

Л.П.СКУГОРОВА

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СООРУЖЕНИЯ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДОВ И ХРАНИЛИЩ

2-е издание,
переработанное и дополненное

*Допущено Государственным комитетом СССР
по народному образованию в качестве учебного пособия
для студентов вузов, обучающихся по специальности
"Проектирование, сооружение и эксплуатация
газонефтепроводов и газонефтехранилищ"*



МОСКВА "НЕДРА" 1989

ББК 39.71

С46

~~УДК 669.017~~:622.692.4 – 03 (075.8)

Рецензент

кафедра "Сооружение газонефтепроводов, газохранилищ
и нефтебаз" Уфимского нефтяного института

Скугорова Л.П.

С 46 **Материалы для сооружения газонефтепроводов и хранилищ:**
Учеб. пособие для вузов.— 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Недра,
1989.— 343 с.: ил.

ISBN 5–247–01237–2

Рассмотрены специальные материалы для сооружения газонефтепроводов, резервуаров и газгольдеров. Во втором издании (1-е изд. – 1975) особое внимание уделено применению антикоррозионных материалов для защиты нефтегазовых объектов. Изложены основные требования к специальным материалам, показаны специфические особенности их производства с учетом влияния на состав и свойства, эксплуатационную надежность и долговечность.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности "Проектирование, сооружение и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ".

С $\frac{2503010500-013}{043(01)-89}$ 314–89

ББК 39.71

ISBN 5–247–01237–2

©Издательство "Недра", 1975
©Издательство "Недра", 1989,
с изменениями

Возрастающие темпы развития нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности и связанный с этим бурный рост мощности магистральных нефтегазопроводов, резервуаров и других объектов выдвигают на первый план вопросы их надежности и экологической безопасности. Энергетический потенциал потока газа, транспортируемого, например, по трубопроводу диаметром 1420 мм на рабочее давление 7,5 МПа, достаточен для питания электростанции мощностью 20 тыс. МВт. Даже кратковременные нарушения в работе такого газопровода, а тем более аварии, могут привести к огромным экономическим и экологическим потерям.

Разрушения трубопроводов для жидких и газообразных продуктов имеют существенные различия. Как правило, разрушения нефтепроводов распространяются на участке протяженностью от нескольких десятков сантиметров до нескольких десятков метров. Разрушения газопроводов обычно имеют значительно большую протяженность, иногда несколько километров. Особенно опасны так называемые лавинные разрушения труб, которые в считанные секунды могут вывести из строя десятки и сотни метров, а в отдельных случаях километры трубопроводов.

Аварии на резервуарах и газгольдерах и других объектах приносят также большой ущерб. При этом теряется большое количество топлива и продуктов, возникают серьезные разрушения вблизи поврежденного объекта и происходят часто необратимые изменения окружающей среды.

Надежность магистральных трубопроводов, резервуаров, газгольдеров и других объектов — основное условие для бесперебойного обеспечения потребителей газом, нефтью и нефтепродуктами. Важный фактор их надежности — правильный выбор материала.

Исходя из условий эксплуатации для строительства объектов газовой и нефтяной промышленности необходим в основном горячекатаный, а также и термически упроченный металл и изделия из него, имеющие различные назначения и свойства.

В недалеком прошлом единственным материалом для изготовления ответственных объектов нефтяной и газовой промышленности была низкоуглеродистая "мягкая" сталь обыкновенного качества с пределом текучести не менее 220–240 МПа. Затем хорошо зарекомендовала себя в СССР и за рубежом низколегированная сталь, имеющая более высокую прочность (предел текучести не менее 330–350 МПа), обладающая хорошей свариваемостью и обрабатываемостью, а также удовлетворительной сопротивляемостью хрупкому разрушению.

Современное производство предъявляет более высокие требования к прочности и качеству металла, применяемого для создания объектов нефтяной и газовой промышленности. Он должен выдерживать большие нагрузки в широком диапазоне природно-климатических температурных условий монтажа и эксплуатации, хорошо противостоять атмосферной и почвенной коррозии с применением различных способов защиты, быть достаточно дешевым, недефицитным и долговечным.

На строительстве газонефтепроводов высоких давлений и больших диаметров, резервуаров и газгольдеров большой вместимости широкое применение получили высокопрочные строительные стали с пределом текучести 450–750 МПа, достигаемым за счет легирования (микролегирования) и термического упрочнения закалкой в сочетании с высоким отпуском, а также благодаря нормализации или контролируемой прокатки.

Как известно, увеличение размеров объектов, в частности увеличение диаметра трубопроводов до 1400 мм, позволяет снизить капиталовложения в транспортировку нефти и газа, повышает их пропускную способность, уменьшает металлоемкость. Внедрение новых высокопрочных сталей с пределом текучести 450–750 МПа снижает расход металла более чем на 10–15 % за счет уменьшения толщины стенки трубопровода резервуара, газгольдера или другого объекта и соответственно сокращает капиталовложения. В дальнейшем для экономии металла при сооружении газонефтепроводов, резервуаров и других объектов большее применение будут находить в качестве заменителей неметаллические материалы, трубы из железобетона, асбоцемента и различных высокопрочных пластмасс. Особенно перспективны стеклопластиковые трубы, а также полиэтиленовые, полипропиленовые, поливинилхлоридные и т.д. Для антикоррозионной изоляции трубопроводов широко используют трубы с заводскими полимерными покрытиями. На трассах трубопроводов лишь изолируют стыки труб намоткой самоприклеивающейся полимерной ленты или другими материалами.

**1. ПРИОРИТЕТ РУССКИХ И СОВЕТСКИХ УЧЕНЫХ
В ОБЛАСТИ МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ**

Русские и советские ученые внесли большой вклад в создание теоретических основ металловедения, а также в производство и применение специальных материалов и труб для сооружения газонефтепроводов и конструкций. Основы научного металловедения заложены русским металлургом Д.К. Черновым. Им открыты полиморфные превращения в стали (критические точки Чернова, 1868 г.). Это позволило доказать, что вместе со структурой изменяются все свойства стали. Д.К. Чернов изучил процесс кристаллизации, создал фундамент современной теории термической обработки стали, сформулировал основные идеи легирования стали и т.д. Великий русский металлург А.А. Байков (1870–1946 гг.) высоко оценил научный вклад Д.К. Чернова в отечественную науку и производство. Он сказал, что значение Д.К. Чернова для металлургии можно сравнить со значением Д.И. Менделеева для химии, и подобно тому, что химия в своем дальнейшем развитии будет идти по пути, указанному Д.И. Менделеевым, так и металлургия будет развиваться в том направлении, которое было указано Д.К. Черновым.

Методы массового производства стали были открыты в середине XIX в. К этому времени относятся первые металлографические исследования железа и его сплавов. В России в 30-х годах XIX в. русский инженер П.П. Аносов применил микроскоп для изучения структуры стали в зависимости от ее химического состава,ковки и термической обработки. За границей первые микроскопические исследования были проведены в 60-х годах XIX в. Первые и достаточно полные монографии о металлографии сплавов на основе железа появились в начале XX в. Они созданы А.А. Ржешотарским (Россия), Мартенсом и Гейном (Германия), Хоу (США).

В начале XX в. большое значение приобрели работы русского ученого Н.С. Курнакова, применившего для исследования металлов и сплавов методы физико-химического анализа и изучившего большое число диаграмм состояния двойных и тройных систем. Большой вклад в развитие теории и технологии термической обработки в этот период внесли отечественные ученые А.Л. Бабошин (1872–1936 гг.), Н.А. Минкевич (1883–1942 гг.), С.С. Штейнберг (1872–1940 гг.) и др. Атомное строение металлических фаз исследовано в работах отечественных рентгенографов Н.В. Агеева, Г.С. Жданова, С.Т. Конобеевского и др.

Механизму и кинетике фазовых превращений в сталях посвящены работы многих советских исследователей: С.С. Штейнберга, В.Д. Садовского, Г.В. Курдюмова, С.Т. Кишкина, А.П. Гуляева, И.Н. Богачева и их учеников.

Большинство металлов было открыто в XIX в., хотя они тогда не все получили промышленное применение. Основную долю по производству и применению имело и имеет железо в виде его сплавов с углеродом — сталей и чугунов, что связано с малой их стоимостью, наилучшими механическими свойствами, возможностью массового изготовления и большой распространенностью исходного сырья (руд) в природе. Во всем мире стали производят больше, чем всех остальных металлов, вместе взятых: на долю стали приходится более 90 %, а на долю всех остальных металлов — меньше 10 %.

Объем производства стали — важный показатель технической и экономической мощи страны. Без обеспечения в необходимом количестве сталью не может развиваться ни одна отрасль промышленности.

До 1913 г. в России производили всего лишь 4,4 млн. т стали, тем не менее она занимала пятое место в мире. Гражданская война и интервенция почти остановили производство стали; в 1920 г. было выплавлено лишь 200 тыс. т стали. Начавшийся затем этап восстановления народного хозяйства привел к тому, что в 1928 г. был достигнут довоенный уровень. В годы первых пятилеток построены такие крупнейшие металлургические комбинаты, как Магнитогорский и Кузнецкий. Перед Великой Отечественной войной выплавлялось уже 18 млн. т стали.

Начало войны и временная оккупация таких металлургических районов страны, как юг Украины и Донбасс, резко снизили выпуск стали. В год окончания войны (1945 г.) изготавливали 12 млн. т стали, а к 1948 г. был достигнут довоенный уровень. В послевоенные годы производство стали плавно и непрерывно нарастало. В 1979 г. наша страна вышла на первое место в мире по производству чугуна и стали, в 1987 г. выплавлено 162 млн. т стали.

Для успешного социально-экономического развития страны, а также решения задач, стоящих в области строительства предприятий нефтяной и газовой промышленности в двенадцатой пятилетке, в 1990 г. металлургическая промышленность должна будет обеспечить производство не менее 50 млн. т листового проката, 20—21 млн. т проката из низколегированной стали и 15—16 млн. т — с упрочняющей обработкой¹. Расширится производство труб нефтяного сортамента, газопроводных и других труб с заводским антикоррозионным покрытием.

Успешное претворение в жизнь этих задач потребует применения на строительстве объектов нефтяной и газовой промышленности новых

¹ Материалы XXVII съезда Коммунистической партии Советского союза. М., Политиздат, 1986, с. 292.

материалов и новых методов их упрочнения, превосходящих лучшие современные образцы.

2. ЭЛЕМЕНТЫ МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ

Металлы и их сплавы в твердом состоянии — кристаллические тела, в которых атомы (положительно заряженные ионы) располагаются в определенном закономерном порядке. Силы их взаимного притяжения и отталкивания уравновешены и твердое тело сохраняет свою форму. Правильное, закономерное расположение атомов в пространстве и определяет кристаллическое строение металлов и сплавов.

Кристаллические решетки у различных металлов и сплавов разные. Простейшая ячейка кристаллической решетки — кубическая. Атомы (ионы) расположены в вершинах куба, соприкасаются друг с другом и колеблются возле точек равновесия, т.е. возле узлов решетки с большой частотой. Наиболее часто у металлов и сплавов, а также у железа и стали встречаются более плотно упакованные ячейки кристаллических решеток: объемно центрированный куб (ОЦК), гранецентрированный куб (ГЦК), гексагональная плотноупакованная (ГПУ) и др. Кристаллическая ячейка ОЦК (рис. 1,а) имеет атомы во всех вершинах куба, а также один атом в его центре на пересечении диагоналей куба. Кристаллическая ячейка ГЦК (рис. 1,б) характеризуется расположением атомов в вершинах куба и в центре каждой его грани на пересечении ее диагоналей. В ячейке гексагональной решетки атомы расположены в вершинах шестиугольных оснований призмы, в центрах этих оснований и внутри призмы (рис. 1,в).

В реальных условиях у кристаллов металла наблюдается то или иное отклонение от правильного кристаллографического строения их решеток. Эти несовершенства принято называть дефектами кристаллического строения металлов и сплавов. К ним относятся точечные дефекты (ва-

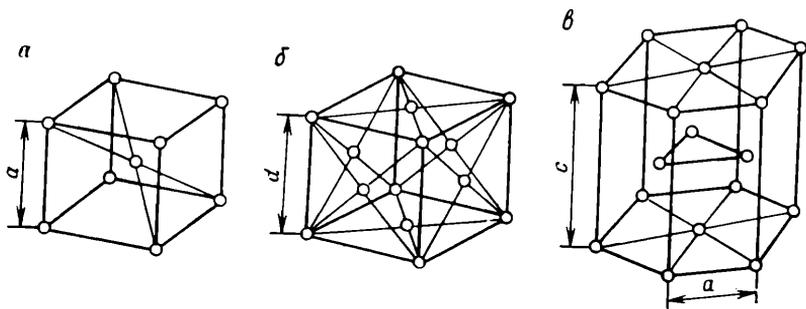


Рис. 1. Элементарные ячейки кристаллических решеток:

а — объемно-центрированный куб (ОЦК); б — гранецентрированный куб (ГЦК); в — гексагональная плотноупакованная (ГПУ); а, с, d — параметры решетки

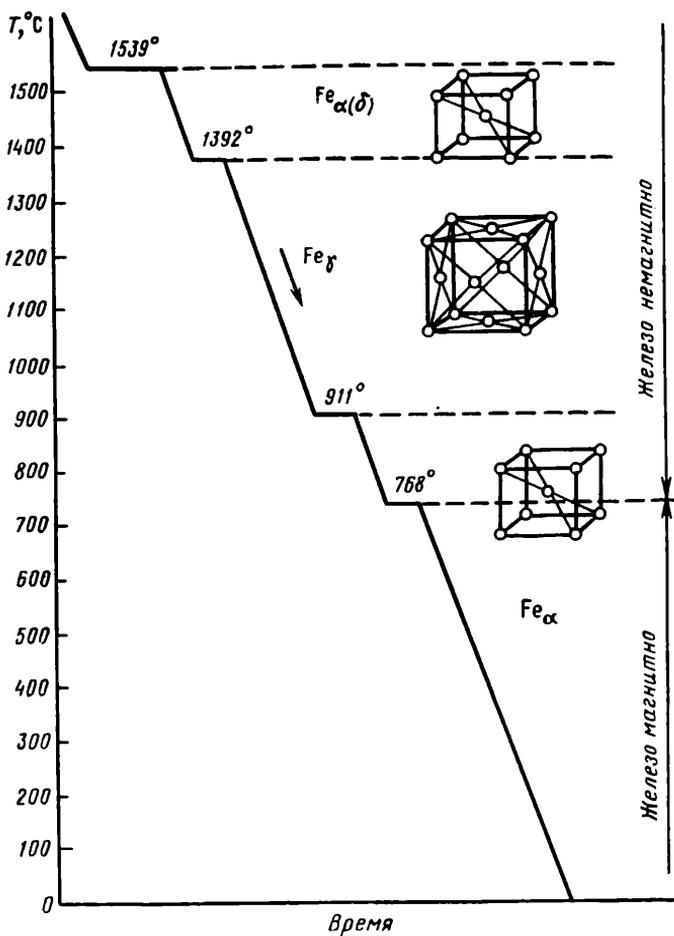


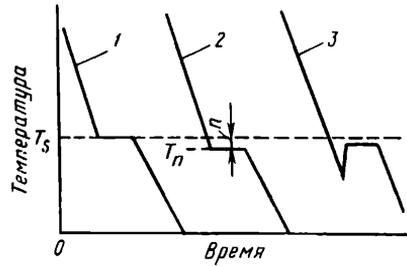
Рис. 2. Кривая охлаждения железа

кансии или свободные узлы кристаллической решетки), линейные дефекты (дислокации) и др.

Некоторые металлы, такие, как железо, кобальт и другие, а следовательно, и сплавы на их основе при нагреве и охлаждении до различных температур в твердом состоянии могут иметь различное кристаллическое строение с определенной кристаллической решеткой в данном интервале температур. Это явление существования одного металла в нескольких кристаллических формах носит название аллотропии, или полиморфизма. Различные кристаллические формы металла называются аллотропическими, или полиморфными, модификациями. Аллотропи-

Рис. 3. Кривые охлаждения чистых металлов:

1 — теоретическая; 2 и 3 — экспериментальные



ческие модификации обозначают греческими буквами (α , β , γ , δ и т.д.), добавляемыми к символу, соответствующему данному элементу.

Твердое железо при различных температурах существует в двух аллотропических модификациях: Fe_α и Fe_γ . В соответствии с этим кривая охлаждения железа (рис. 2) имеет иной вид по сравнению с кривой охлаждения чистого металла без аллотропического превращения в твердом состоянии (рис. 3).

Превращение одной аллотропической формы в другую сопровождается при охлаждении выделением скрытой теплоты кристаллизации. Поэтому на кривой охлаждения железа при температурах аллотропического превращения наблюдаются горизонтальные площадки. Верхняя ветвь кривой охлаждения (см. рис. 2) характеризует охлаждение жидкого железа. При температуре $T = 1539^\circ\text{C}$ наблюдается горизонтальная площадка, что соответствует кристаллизации аллотропической модификации Fe_α . Она имеет кристаллическую решетку ОЦК, свою структуру и свойства, является немагнитной. Ветвь кривой охлаждения в интервале температур $1539\text{--}1392^\circ\text{C}$ является охлаждением твердой модификации $Fe_\alpha(\delta)$. При температуре 1392°C наблюдается вторая горизонтальная площадка, которая соответствует перекристаллизации в твердом состоянии одной аллотропической модификации в другую: $Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$. Модификация Fe_γ имеет кристаллическую решетку ГЦК (границентрированный куб), свою структуру и свойства, является немагнитной.

Далее происходит охлаждение Fe_γ , что характеризуется ветвью кривой охлаждения в интервале температур $1392\text{--}911^\circ\text{C}$. При температуре 911°C наблюдается третья горизонтальная площадка на кривой охлаждения, что соответствует новой перекристаллизации железа в твердом состоянии с перестройкой кристаллической решетки. Здесь происходит переход Fe_γ в Fe_α . Железо Fe_α имеет кристаллическую решетку ОЦК, свою новую структуру и свойства и начиная с температуры 768°C (точка Кюри) становится магнитным. Нижняя ветвь кривой охлаждения от 911°C до комнатной температуры является охлаждением новой твердой модификации железа — Fe_α . При температуре 768°C наблюдается перегиб кривой охлаждения, что отвечает появлению магнитных свойств у железа. Изменения структуры, механических и физических свойств в этой точке не происходит.

Охлаждение жидкого металла, не обладающего полиморфизмом, сопровождается плавным понижением температуры (верхняя ветвь кривой охлаждения) (см. рис. 3). В этом периоде не наблюдается качественного изменения состояния металла, поэтому его называют простым охлаждением металла. При достижении теоретической температуры кристаллизации T_s на кривых охлаждения появляются горизонтальные площадки, показывающие, что температура металла в период кристаллизации остается постоянной. Это объясняется выделением при кристаллизации скрытой теплоты кристаллизации, которая компенсирует отвод тепла в процессе охлаждения металла. Длина горизонтального участка кривой охлаждения соответствует времени протекания кристаллизации, показывая начало и конец процесса. По окончании кристаллизации, т.е. когда завершится переход металла из жидкого в твердое состояние, температура опять снижается — происходит охлаждение металла в твердом состоянии (нижняя ветвь кривой охлаждения). В реальных условиях процесс затвердевания может происходить лишь при переохлаждении металла до реальной температуры кристаллизации T_n (где n — степень переохлаждения), лежащей ниже теоретической температуры кристаллизации T_s . Разность между теоретической и реальной температурами кристаллизации металла называют степенью переохлаждения n . На кривой 3 наблюдается скачок в повышении T_n за счет бурного выделения скрытой теплоты кристаллизации в первый ее момент.

В промышленности для строительных конструкций и газонефтепроводов применяют главным образом сплавы на основе железа, называемые сталями и чугунами. Для изучения состояния сплавов разных концентраций при различных температурах применяют диаграммы состояния — графическое изображение фазового состояния сплавов в зависимости от температуры и концентрации в условиях равновесия при постоянном давлении. Их строят экспериментальным путем по кривым охлаждения для сплавов разных концентраций.

Вещества, составляющие сплав, называют компонентами.

Строение сплавов более сложное по сравнению с чистыми металлами. Свойства сплавов очень разнообразны и зависят от того, какие компоненты составляют сплав, в каких количествах и в какие взаимодействия они вступают в жидком и твердом состояниях. Поэтому в технике наибольшее применение имеют сплавы по сравнению с чистыми металлами.

Компоненты в сплаве могут не взаимодействовать друг с другом и образовывать в твердом состоянии механическую смесь кристаллов обоих компонентов, кристаллизующихся одновременно (рис. 4,а); растворяться друг в друге и образовывать жидкий и твердый растворы (рис. 4,б); вступать в химическое взаимодействие и образовывать химическое соединение, а также промежуточные и сложные фазы (например, твердый раствор на базе химического соединения). Твердые растворы по микроструктуре представляют собой, как и чистые металлы, однород-

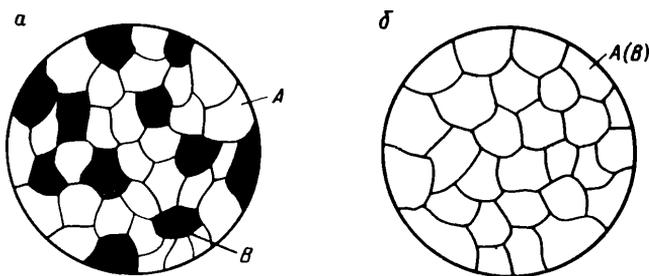


Рис. 4. Схемы микроструктур сплавов:

a – механическая смесь компонентов *A* и *B*; *б* – твердый раствор компонентов *B* и *A*

ные зерна. Твердый раствор однофазен и состоит из одного вида кристаллической решетки. Он образуется на основе одного из компонентов, называемого металлом-растворителем. В кристаллическую решетку металла-растворителя входят атомы другого компонента, называемого растворенным веществом.

Твердые растворы делятся на растворы замещения и внедрения в зависимости от характера размещения атомов растворенного вещества в кристаллической решетке растворителя (рис. 5). В твердых растворах замещения атомы растворенного компонента *B* замещают частично атомы кристаллической решетки компонента-растворителя *A*. В твердых растворах внедрения атомы растворенного компонента *C* внедряются в кристаллическую решетку компонента-растворителя *A*, располагаясь между атомами *A*. Твердые растворы замещения бывают ограниченными и неограниченными. При неограниченной растворимости атомы растворителя *A* могут быть замещены атомами растворенного вещества *B*. Это возможно, если оба компонента имеют одинаковую структуру и кристаллические решетки, малое различие атомных размеров компонентов, а также близкие по строению и физической природе валентные оболочки атомов.

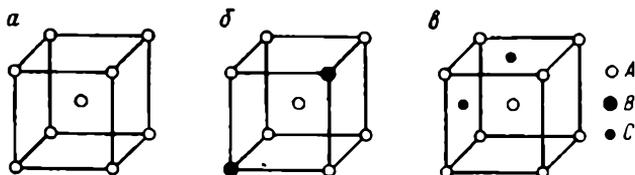


Рис. 5. Твердые растворы на основе металла с кристаллической решеткой ОЦК:

a – чистый металл; *б* – твердый раствор замещения; *в* – твердый раствор внедрения

Твердым раствором на базе химического соединения называют вещество, в кристаллической решетке которого могут находиться атомы другого элемента, заменившего атомы одного из компонентов. Например, вместо Fe_3C будет $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$.

Фазой называют однородную по химическому составу, кристаллическому строению и свойствам часть системы, отделенную от других частей системы границей раздела. Фазами могут быть жидкий раствор компонентов сплава, их твердый раствор, химическое соединение, кристаллы чистых компонентов. Системой называют совокупность фаз, находящихся в равновесии при определенных внешних условиях (температура, давление). Однофазной системой является, например, однородный жидкий раствор компонентов (жидкость). Примером двухфазной системы может служить механическая смесь кристаллов двух компонентов. В качестве компонентов могут быть и устойчивые их химические соединения. Внутреннее строение металлов и сплавов характеризует микро- и макроструктура. Микроструктура – внутреннее строение металлов и сплавов, изучаемое под микроскопом при больших увеличениях (в 50–2000 раз). Она определяется формой и размером фаз, их взаимным расположением. Макроструктура – внутреннее строение металлов и сплавов, изучаемое при небольших увеличениях с помощью лупы (до 10–30 раз) или невооруженным глазом (визуально). Она служит для определения различных дефектов металла, неоднородности его строения и т.д.

Тип диаграммы состояния зависит от взаимодействия компонентов в жидком и твердом состояниях. Если система однокомпонентная, например чистый металл, то диаграмма состояния будет иметь одну ось ординат – шкалу температур. На ней будет нанесена одна точка, соответствующая равновесной температуре перехода из жидкого в твердое агрегатное состояние (и наоборот, из твердого – в жидкое) чистого металла T_n . Эта равновесная температура плавления определяется на кривой его охлаждения. Если в системе два компонента, то вторая ось – ось абсцисс будет шкалой концентраций сплава, так как диаграмму состояния двухкомпонентного сплава строят в двух измерениях (температура – кон-

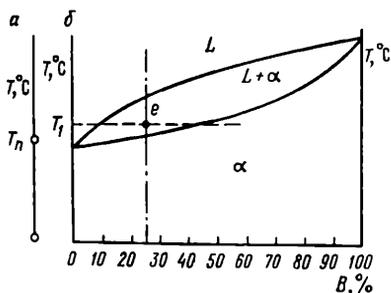


Рис. 6. Диаграммы состояния однокомпонентной системы (а) и двухкомпонентной системы с неограниченной растворимостью B и A в твердом и жидком состояниях (б):

L – жидкий раствор; α – твердый раствор B в A ; $L + \alpha$ – двухфазная область; e – сплав заданной концентрации 25 %-ного B при данной температуре T_1

центрация). Эта диаграмма состояния сплавов имеет две вертикальные шкалы температур, соответствующие по концентрации первому *A* и второму *B* компонентам (рис. 6). Каждая точка на диаграмме состояния характеризует состояние сплава данной концентрации при данной температуре; каждая вертикаль – соответствует сплаву данной концентрации, рассматриваемому при различных температурах.

3. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗО–УГЛЕРОД

Диаграмма состояния железо–углерод (рис. 7) называется цементитной, так как предельное содержание углерода в сплавах ограничено 6,67%. При этом содержании весь углерод находится в связанном состоянии в виде устойчивого химического соединения – карбида железа Fe_3C (цементита). Левая температурная шкала диаграммы состояния (ось ординат) соответствует на оси концентраций (ось абсцисс) содержанию углерода 0%, т.е. чистому железу (первому компоненту), а правая температурная шкала – содержанию 6,67% углерода, т.е. цементиту (второму компоненту).

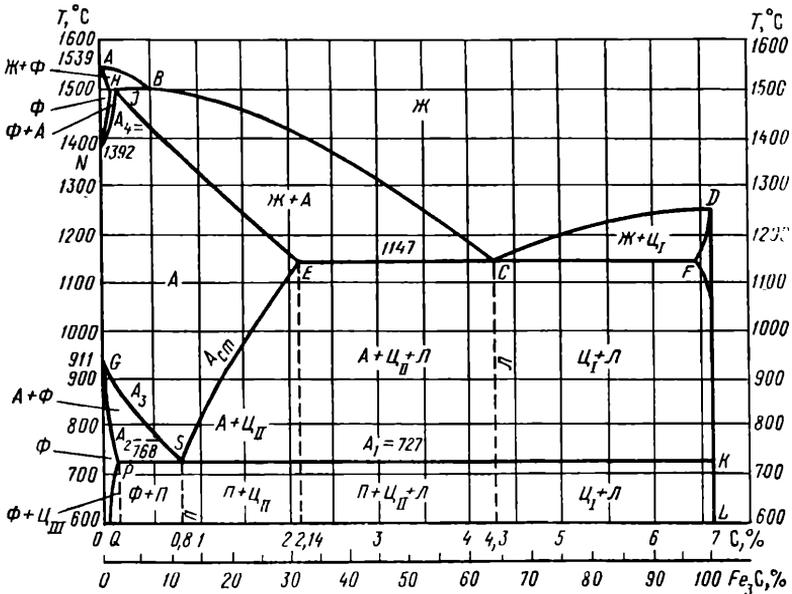


Рис. 7. Диаграмма состояния железо – углерод:

Ж – жидкость; *Ф* – феррит; *А* – аустенит; *П* – перлит; $Ц_I$ – цементит первичный; $Ц_{II}$ – цементит вторичный; *Л* – ледебурит; $Ц_{III}$ – цементит третичный; $A_1, A_2, A_3, A_4, A_{ст}$ – критические точки стали

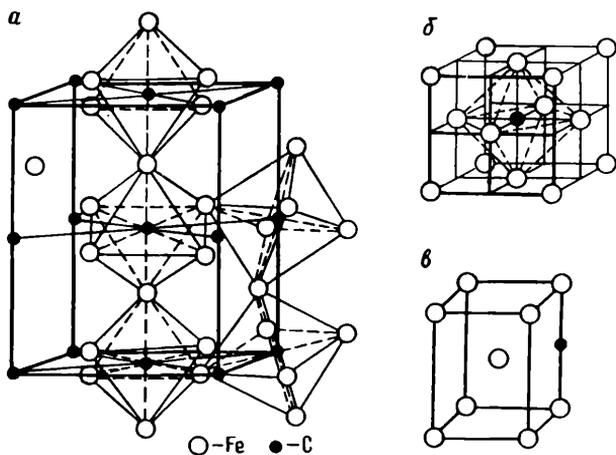


Рис. 8. Кристаллические решетки цементита (а); аустенита (б); мартенсита (в)

Цементит — это химическое соединение железа с углеродом, имеющее очень сложную кристаллическую решетку (рис. 8,а). Он обладает высокой прочностью, твердостью, хрупкостью, высокой температурой плавления 1250 °С. Железо, наоборот, отличается невысокой прочностью, твердостью, хорошей пластичностью. Железо имеет несколько аллотропических форм, обозначаемых Fe_α и Fe_γ (см. рис. 2). Существование каждой аллотропической формы железа отмечено температурным интервалом на левой температурной шкале диаграммы (см. рис. 7). Переход одной аллотропической формы в другую происходит в температурной критической точке. В связи с этим все линии диаграммы состояния железо—углерод начинаются от этих точек *A*, *N*, *G*. Добавление углерода к железу приводит к смещению температурного положения критических точек железа. В результате взаимодействия железа с углеродом в высокотемпературной области образуется твердый раствор углерода в Fe_α , называемый ферритом Φ [область *AHNA*, примыкающая к температурному интервалу существования Fe_α (или $Fe_\alpha(\delta)$) 1539–1392 °С]. В интервале средних температур образуется твердый раствор углерода в Fe_α — аустенит *A* (область *NIESGN*, примыкающая к температурному интервалу существования Fe_γ — 1392–911 °С). В интервале низких температур образуется твердый раствор углерода в Fe_α — феррит Φ (область *OGPQO*, примыкающая к температурному интервалу существования Fe_α — 911–20 °С). Феррит — твердый раствор внедрения атомов углерода в кристаллическую решетку ОЦК железа Fe_α . Аустенит — твердый раствор внедрения атомов углерода в кристаллическую решетку ГЦК железа Fe_γ (рис. 8,б).

На диаграмме состояния железоуглеродистых сплавов наблюдаются области равновесного существования двух смежных фаз: область $NHIN$ и область $PGSP$ – феррита и аустенита (Φ и A), т. е. в железоуглеродистых сплавах аллотропические превращения совершаются в интервале температур.

Температуры плавления железа 1539°C (точка A). При добавлении к нему углерода температуры начала и конца плавления железа (начала и конца кристаллизации) не совпадают, и на диаграмме состояния появляются двухфазные температурные области, где присутствуют жидкая и твердая фазы одновременно: область $ABINA$ – жидкость $Ж$ + феррит Φ ; область $IBCEI$ – жидкость $Ж$ + аустенит A ; область $CDFC$ – жидкость $Ж$ + цементит первичный $Ц_1$. Цементит называют первичным, так как он выпадает из жидкости. Линия $AHIECF$, на которой лежат точки начала плавления (конца кристаллизации), носит название "солидус", а линия $ABCD$, по которой лежат точки конца плавления (начала кристаллизации), – "ликвидус". На диаграмме состояния точку при 4,3%-ном содержании углерода и температуре 1147°C называют эвтектической (точка эвтектики), так как в этой точке при кристаллизации жидкость распадается на механическую смесь двух кристаллов (аустенита и цементита), называемую эвтектикой. Реакция распада $Ж \rightarrow A + Ц$ называется эвтектической и происходит у любого сплава при температуре 1147°C (линия эвтектики на диаграмме состояния). Ниже линии эвтектики железоуглеродистые сплавы в интервале температур $1147\text{--}727^\circ\text{C}$ состоят из двух фаз (аустенита A и цементита $Ц$), т.е. на диаграмме состояния образуется двухфазная область $ECFKSE$ ($A + Ц$).

На диаграмме состояния точку при 0,8%-ном содержании углерода и температуре 727°C называют эвтектоидной (точка эвтектоида), так как при кристаллизации в этой точке происходит распад аустенита (твердой фазы) на механическую смесь двух новых твердых фаз (феррита Φ и цемента $Ц$), называемую эвтектоидом. Реакция распада $A \rightarrow \Phi + Ц$ называется эвтектоидной и совершается у любого сплава при температуре 727°C (эвтектоидная линия на диаграмме состояния).

При эвтектической реакции происходит распад жидкой фазы на две твердые $Ж \rightarrow A + Ц$, а при эвтектоидной – распад твердой фазы на две новые твердые $A \rightarrow \Phi + Ц$.

Железоуглеродистые сплавы любых концентраций ниже температуры 727°C (эвтектоидной линии) состоят из двух фаз: феррита и цементита – область $PSKLOP$ ($\Phi + Ц$).

Железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода до 2,14% называют сталями, сплавы с содержанием углерода от 2,14 до 6,67% – чугунами. Кроме железа и углерода, в сталях и чугунах присутствуют постоянные примеси – марганец, кремний (технологические примеси), сера, фосфор (вредные примеси), а также скрытые, загрязняющие металл (кислород, азот, водород), и случайные (медь, мышьяк, хром, никель и др.) примеси.

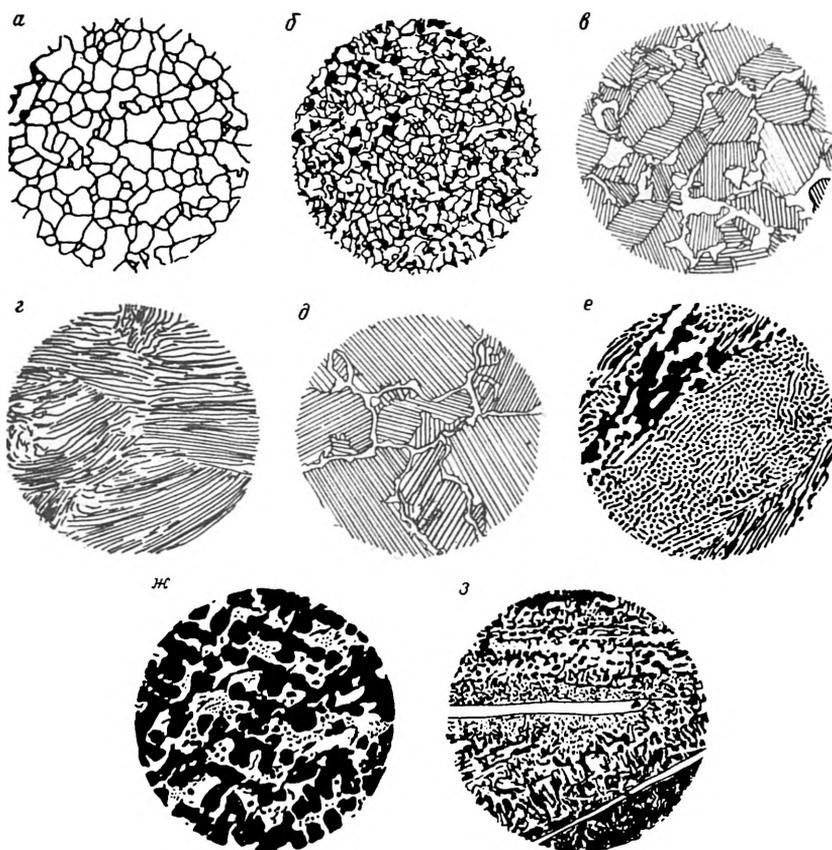


Рис. 9. Микроструктура стали и белого чугуна:

a – технически чистое железо с содержанием углерода 0,02 % при общем содержании примесей 0,1–0,2 %; *б* – доэвтектоидная сталь с содержанием углерода 0,2 %; *в* – доэвтектоидная сталь с содержанием углерода 0,7 %, *з* – эвтектоидная сталь с содержанием углерода 0,8 %; *д* – заэвтектоидная сталь с содержанием углерода 1,2 %; *е* – эвтектический белый чугун с содержанием углерода 4,3 %; *ж* – доэвтектический белый чугун с содержанием углерода 3,1 %; *з* – заэвтектический белый чугун с содержанием углерода 4,8 %

По микроструктуре стали делятся на доэвтектоидные при содержании углерода менее 0,8 %, эвтектоидные при содержании углерода ~0,8 % и заэвтектоидные при содержании углерода от 0,8 до 2,14 % (рис. 9) Сплав с содержанием примесей 0,1–0,2 % называют технически чистым железом (см. рис. 9, *a*). Для научных целей можно получить железо высокой чистоты около 0,01 % примесей. Микроструктура эвтектоидных сталей представляет собой механическую (эвтектоидную) смесь пласти-

нок феррита и цементита, называемую перлитом (см. рис. 9, з). Перлит образуется по эвтектоидной реакции $A \rightarrow \Phi + \Pi = \Pi$. Микроструктура доэвтектоидных сталей представляет собой перлит со скоплением по его границам зерен избыточного феррита (см. рис. 9, б и в). Феррит образуется из аустенита, начиная с линии GS (см. рис. 7), которая является линией переменной растворимости углерода в аустените. Линия QP – линия переменной растворимости углерода в феррите при различных температурах (из феррита выделяется цементит третичный Π_{III}). С уменьшением содержания в стали углерода количество избыточного феррита увеличивается, а перлита – уменьшается. Микроструктура заэвтектоидных сталей представляет собой перлит с расположенным по его границам вторичным цементитом Π_{II} в виде тонкой сетки (см. рис. 9, д). Вторичный цементит выпадает из аустенита по линии SE (см. рис. 7), являющейся линией переменной растворимости углерода в аустените при различных температурах. Так как Π_{II} выпадает из твердой фазы, то его называют вторичным, в отличие от первичного Π_I выпадающего из жидкости.

В зависимости от содержания углерода в углеродистых сталях изменяются и механические свойства (рис. 10) с увеличением содержания углерода повышается прочность и понижается пластичность сталей.

Чугуны по микроструктуре, в соответствии с диаграммой состояния железо–углерод, делятся на доэвтектические при содержании углерода от 2,14 до 4,3 %, эвтектические при содержании углерода 4,3 % и заэвтектические при содержании углерода от 4,3 до 6,67 %. Эти чугуны называют белыми, так как при разрушении их излом имеет матово-белый цвет. Микроструктуру эвтектического белого чугуна называют ледебуритом.

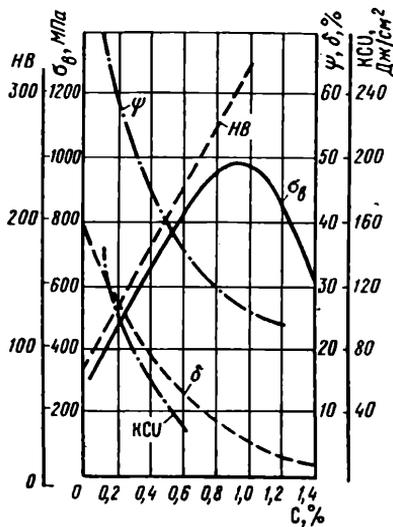


Рис. 10. График зависимости механических свойств стали от содержания C:

HV – твердость по Бринеллю; $\sigma_{в}$ – временное сопротивление; ψ – относительное поперечное сужение; δ – относительное удлинение; KCU – ударная вязкость

том (см. рис. 9,е), представляющим собой смесь перлита с цементитом (вторичным) Ц_{II} и эвтектическим при температуре ниже 727°C . Цементит (вторичный) структурно не обнаруживается, так как он объединяется с цементитом эвтектического происхождения. Поэтому считают, что ледебурит L состоит из перлита P и цементита Ц ($L = P + \text{Ц}$). В интервале температур $727-1147^\circ\text{C}$ ледебурит представляет собой смесь аустенита с цементитом ($L = A + \text{Ц}$). Микроструктура белых доэвтектических чугунов состоит из смеси ледебурита, перлита и цементита (вторичного) (см. рис. 9,ж); микроструктура белого заэвтектического чугуна – из ледебурита и цементита (первичного) (см. рис. 9,з).

Белые чугуны в промышленности не получили применения из-за большой хрупкости вследствие наличия большого количества углерода в виде цементита. Применяют чугуны с включениями графита вместо цементита.

4. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗО–ГРАФИТ

Диаграмма состояния железо–графит (рис. 11, пунктирные линии) повторяет те же линии, что и диаграмма состояния железо–углерод (сплошные линии). Линии диаграммы состояния железо–графит несколько смещены относительно линий диаграммы состояния железо–углерод. Это значит, что в эвтектической точке C' при другой концентрации углерода 4,26% и температуре 1153°C будет происходить при охлаждении распад жидкости на аустенит и графит (графитная эвтектика). В эвтектоидной точке S' при 0,7%-ном содержании С и температуре

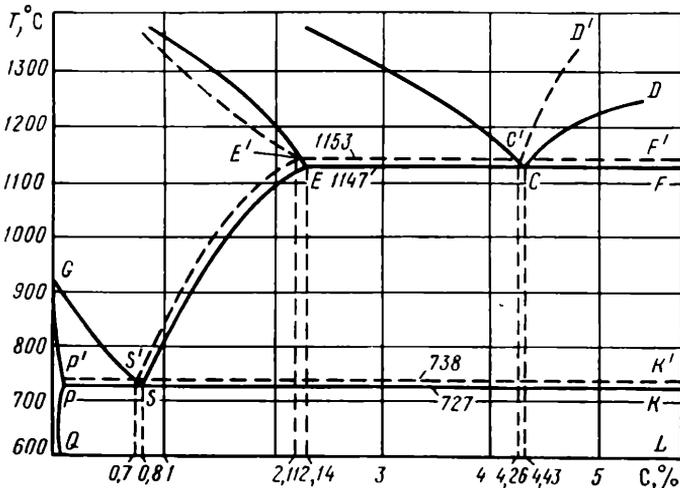


Рис. 11. Диаграмма состояния железо – графит (в упрощенном виде): сплошные линии – цементитная система; пунктирные линии – графитная система

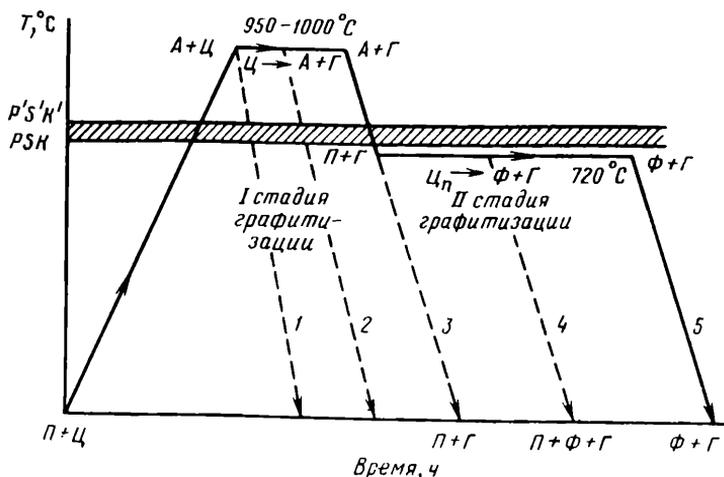


Рис. 12. Схема образования структур при графитизации

738 °С будет происходить при охлаждении распад аустенита на феррит и графит (графитный эвтектоид). Соответственно линия $E^c C^c F^c$ — эвтекктическая линия, линия $P^c S^c K^c$ — эвтектоидная линия. Ниже этих линий располагаются двухфазные области: $E^c C^c F^c K^c S^c E^c$ — аустенит и графит и $P^c S^c K^c L Q P^c$ — феррит и графит.

На линии ликвидус левее точки S' при охлаждении сплавов из жидкости выделяется аустенит, а правее точки S' — графит. Процесс образования графита носит название графитизации. Для протекания процессов графитизации в соответствии с диаграммой состояния железо—графит охлаждение должно быть медленным. При более быстром охлаждении образуются белые чугуны. Кроме рассмотренного процесса образования графита, при кристаллизации железоуглеродистых сплавов может наблюдаться другой способ образования графита в результате распада цементита при нагревании. Цементит Fe_3C — неустойчивое соединение. При определенных условиях (температуре) он распадается на феррит и графит: $C \rightarrow \Phi + \Gamma$

Допустим, что охлаждение было достаточно быстрым и получился белый чугун, состоящий из ледебурита (перлит + цементит). Для графитизации белый чугун нагревают выше линии $P^c S^c K^c$ (рис. 12), в результате чего происходит превращение $\Pi + Ц \rightarrow A + Ц$. В процессе выдержки при высокой температуре протекает распад цементита с выделением графита: $C \rightarrow A + \Gamma$ (I стадия графитизации). При охлаждении ниже линии $P^c S^c K^c$ происходит превращение $A \rightarrow \Pi$, и если провести полное охлаждение, то структура чугуна будет состоять из $\Pi + \Gamma$ (прямая 3). Такой чугун, считают, имеет перлитную основу. Если чугун выдержать при темпе-

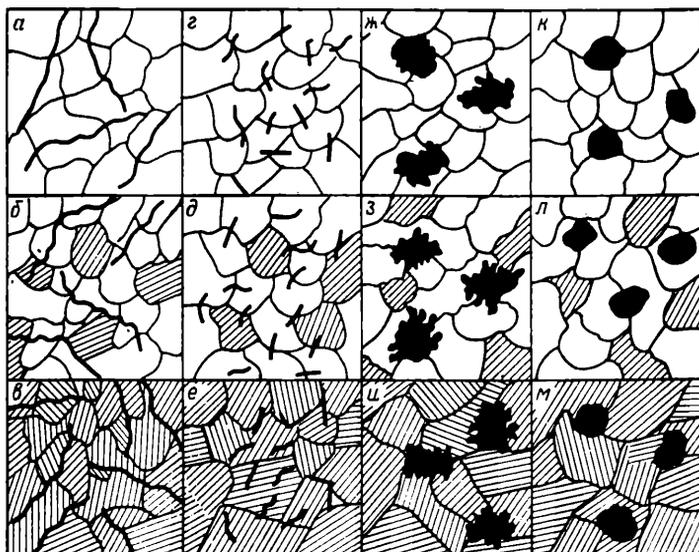


Рис. 13. Микроструктуры серого чугуна с графитом пластинчатой формы на ферритной (а), ферритно-перлитной (б), перлитной (в) основе и с вермикулярным графитом (червеобразным) на ферритной (з), ферритно-перлитной (д), перлитной (е) основе; ковкого чугуна с хлопьевидным графитом на ферритной (ж), ферритно-перлитной (з) и перлитной (и) основе; высокопрочного чугуна с шаровидным графитом на ферритной (к), ферритно-перлитной (л) и перлитной (м) основе

ратуре ниже линии $P' S' K'$, то цементит в перлите распадется ($\Pi \rightarrow \Phi + \Gamma$) частично или полностью при большей выдержке (II стадия графитизации). В результате структура чугуна может состоять из $\Pi + \Phi + \Gamma$ или $\Phi + \Gamma$ при полном охлаждении (соответственно прямые 4 и 5). Эти чугуны называют чугунами соответственно на перлитно-ферритной и ферритной основах. Если белый чугун нагреть выше линии $P' S' K'$ и сразу охладить, то он приобретет исходную структуру $\Pi + \text{Ц}$ (прямая 1). Если белый чугун нагреть выше линии $P' S' K'$ и осуществить небольшую выдержку при этой температуре, то произойдет частичный распад $\text{Ц} \rightarrow A + \Gamma$, и после полного охлаждения чугун будет иметь структуру $\text{Ц} + \Pi + \Gamma$ (половинчатый чугун) (прямая 2)

Чугуны с включениями графита подразделяются главным образом на серые, ковкие и высокопрочные чугуны, а также и другие их разновидности, в которых на ферритной, перлитной или ферритно-перлитной основе располагается свободный углерод в виде графита (рис. 13). В серых чугунах графит присутствует в виде прожилков (чешуек), в ковких чугунах — в виде хлопьев и в высокопрочных чугунах — в шаровидной (сферической) форме. В связи с изменением формы включений графита

в чугунах существенно изменяются их свойства. Чугун, как и сталь, представляет собой сплав железа с углеродом (2,14–6,67 %) в сочетании с различными примесями (марганец, кремний, сера, фосфор и др.), но при большем их содержании.

Серые чугуны маркируют буквами СЧ и двузначными числами. Например, СЧ15, где число показывает значение предела прочности при растяжении: $\sigma_B = 150$ МПа. Чем крупнее прожилки графита в сером чугуне, тем хуже его механические свойства.

Для получения ковкого чугуна белый чугун (доэвтектический) подвергают длительному нагреву (отжигу), что приводит к получению в нем включений графита в виде хлопьев (см. рис. 13,з–е). Ковкие чугуны имеют лучшие механические свойства, чем серые, так как обладают некоторой пластичностью. Их маркируют буквами КЧ, а затем числами, обозначающими также предел прочности при растяжении.

Высокопрочные чугуны получают введением в ковш с жидким чугуном небольших добавок, например магния, что приводит к образованию включений графита шаровидной формы (см. рис. 13,ж). Маркируют его буквами ВЧ и числами, обозначающими предел прочности при растяжении. Например, ВЧ40, ВЧ45, ВЧ100. Высокопрочный чугун с шаровидным графитом по свойствам приближается к стали, он обладает определенным запасом пластичности и даже вязкости в зависимости от структуры (марки).

Получение в чугунах углерода в виде графита различных форм и размеров, а также введение в них легирующих элементов приводит к изменению их механических свойств и позволяет в ряде случаев заменять ими стальное литье и поковки при почти равноценных механических свойствах.

5. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Режим термической обработки. Термическая обработка заключается в температурном воздействии нагрева и охлаждения на сталь для изменения внутреннего ее строения и получения необходимых свойств. Эту обработку можно изобразить графически в координатах температура T – время t (рис. 14). Левый луч графика обозначает нагрев стали до заданной температуры, горизонтальный участок – время выдержки t_B при ней и правый луч – охлаждение со скоростью, зависящей от вида термической обработки.

Температуру нагрева стали под термическую обработку выбирают в зависимости от ее химического состава и положения ее критических точек, в определяемых на диаграмме состояния железоуглеродистых сплавов (см. рис. 7). В сталях различают следующие критические точки: А при температуре 217 °С, соответствующие магнитному превращению в

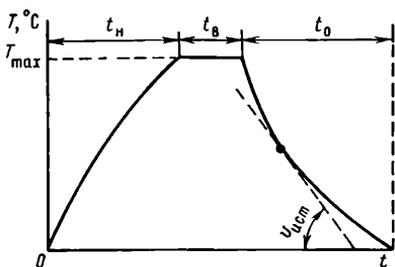


Рис. 14. График режима простой термической обработки:

t_n — время нагрева; $t_в$ — время выдержки; t_o — время охлаждения; T_{max} — температура нагрева; $v_{ист}$ — истинная скорость охлаждения в данной точке ($v_{ист} = dT/dt$)

цементите; A_1 — на линии эвтектоидного превращения при температуре 727°C ; A_2 при температуре 768°C , соответствующей магнитному превращению в железо; A_3 при переменных температурах по линиям GS и SE (точки A_3 на линии SE обозначают $A_{ст}$). При рассмотрении процесса охлаждения к обозначению точек A добавляется индекс "r" (A_r), процесса нагрева — "c" (A_c).

Температура нагрева зависит также и от вида термической обработки. Время выдержки при данной температуре нагрева выбирают в зависимости от размера обрабатываемой детали и эффективности нагревающей среды. Его назначают около 1,5–2 мин на 1 мм сечения изделия. Скорость охлаждения зависит от вида термической обработки, исходя из необходимости получения заданных свойств.

Превращения в стали при нагреве. При нагреве стали выше критической эвтектоидной точки A_{c1} происходит образование аустенита. Превращение происходит при некотором перегреве в интервале температур. В перлите, на границе раздела фаз феррита и цементита, зарождаются и растут зерна аустенита за счет растворения в них цементита. Этот процесс зарождения новых зерен и их роста происходит до полного замещения зернами аустенита зерен перлита. Процесс превращения происходит диффузионным путем, т.е. путем перемещения атомов углерода при нагреве. Атомы железа при этом перестраиваются из кристаллической решетки ОЦК в решетку ГЦК аустенита. Завершение процесса образования аустенита происходит при некотором перегреве выше A_{c1} . Образовавшиеся зерна аустенита при дальнейшем их нагреве выше точки A_{c1} растут. Их размер будет тем больше, чем выше температура нагрева.

При последующем охлаждении с высоких температур из крупнозернистого аустенита образуется более грубозернистая структура, чем из мелкозернистого. Поэтому выбор температуры нагрева при термической обработке ограничивают определенными интервалами. Причем склонность к росту зерна у разных сталей различная. Стали, раскисленные в процессе выплавки только марганцем и кремнием, склонны к росту зерна с повышением температуры. Их называют наследственно крупнозернистыми. Стали, раскисленные дополнительно алюминием в процессе их выплавки, не обладают склонностью к росту зерна, и их называют наследственно мелкозернистыми.

Перлитное превращение при охлаждении аустенита. В процессе охлаждения стали в аустенитном состоянии (из области высоких температур) превращение аустенита происходит только после его переохлаждения ниже эвтектоидной температуры $A_{r1} = 727^\circ\text{C}$. Это объясняется изменением свободной энергии фаз и структур сплавов при нагреве и охлаждении. При низких температурах меньшим запасом свободной энергии обладает перлит (F_n) по сравнению с аустенитом (F_A), поэтому при переохлаждении стали аустенит превращается в пластинчатый перлит: $A \rightarrow P = \Phi + \Psi$ (ферритно-цементитную смесь). Рассмотрим процессы, когда каждый образец стали, после нагрева до аустенитного состояния, быстро переносят в ванную с определенной температурой, соответствующей заданной степени переохлаждения ниже точки A_{r1} , где и выдерживают их до завершения превращения, т.е. превращение аустенита протекает изотермически (при постоянной температуре).

Чем больше степень переохлаждения аустенита, тем мельче образующая из него ферритно-цементитная смесь. Полученные перлитные структуры называют по-разному. При малых степенях переохлаждения аустенита в интервале температур $727-650^\circ\text{C}$ полученную структуру называют перлитом: $A \rightarrow P$. При большей степени переохлаждения в интервале температур $650-600^\circ\text{C}$ полученную структуру после превращения аустенита называют сорбитом S (более мелкая, чем перлит, пластинчатая ферритно-цементитная смесь): $A \rightarrow S$. При еще больших степенях переохлаждения в интервале температур $600-500^\circ\text{C}$ полученную структуру называют троститом T (более тонкопластинчатая ферритно-цементитная смесь по сравнению с сорбитом): $A \rightarrow T$.

Превращение аустенита в перлитные структуры ($\Phi + \Psi$) протекает в интервале температур, т.е. наблюдается начало и конец превращения: $A \rightarrow P = \Phi + \Psi$.

Образование различных структур при разных степенях переохлаждения аустенита наглядно иллюстрирует диаграмма изотермического превращения (распада) аустенита, построенная по экспериментальным данным в координатах температура T – время t (рис. 15). Прямая A_1 соответствует температуре 727°C (нижняя критическая точка стали). При каждой температуре изотермического превращения аустенита на диаграмму наносят точки начала ($a_1 - a_6$) и конца ($b_1 - b_6$) превращения аустенита. Затем точки начала распада аустенита соединяют одной линией (левая линия), а точки конца распада аустенита – другой линией (правая линия). Такая диаграмма изотермического распада аустенита носит название *С-кривой*. Между осью температур и линией начала распада аустенита наблюдается область, в которой аустенит еще не распадается (инкубационный период). Образующиеся при распаде аустенита перлитные структуры (перлит, сорбит, тростит) находятся в интервале температур до изгиба *С-кривой*. Между линиями начала и конца распада аустенита *С-кривой* структура стали состоит из аустенита и соот-

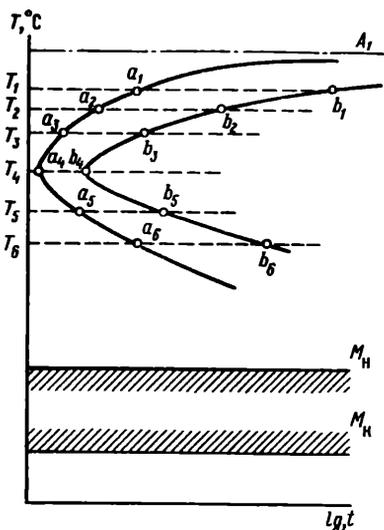


Рис. 15. Диаграмма изотермического превращения аустенита для эвтектоидной стали

ветствующих перлитных структур. Для до- и заэвтектоидной стали у верхней части С-кривой на диаграмме изотермического превращения аустенита имеются соответственно линия предварительного выделения феррита и линия предварительного выделения вторичного цементита.

Мартенситное превращение аустенита. При очень больших степенях переохлаждения в интервале температур 200–250 °С распада аустенита на перлитные структуры ($\Phi + \text{Ц}$) не происходит. В условиях такого резкого переохлаждения диффузия атомов углерода не протекает. Успевают лишь атомы железа перестроиться из кристаллической решетки аустенита ГЦК в кристаллическую решетку феррита ОЦК, а углерод, растворенный в аустените, остается в новой решетке, что приводит к сильному ее искажению, и кристаллическая решетка получается тетрагональной – вытянутый куб (см. рис. 8, в). Структура закаленной стали называется мартенситом. Мартенсит – пересыщенный твердый раствор углерода в железе Fe_α . Его микроструктура имеет игольчатый вид. Он обладает очень высокой прочностью, твердостью НВ 600 (по Бринеллю) и практически нулевой пластичностью и вязкостью.

Мартенситное превращение протекает в интервале температур: существует начало M_H и конец M_K мартенситного превращения (см. рис. 15). Чем больше в стали углерода, тем при более низких температурах будет происходить превращение аустенита в мартенсит ($A \rightarrow M$), тем ниже температура точек M_H и M_K . Например, при 0,6%-ном содержа-

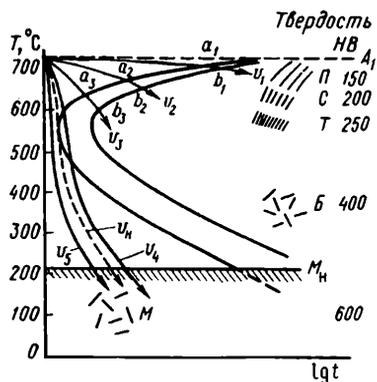


Рис. 16. Наложение на диаграмму изотермического превращения аустенита кривых непрерывного охлаждения:

($a_1 - a_3$ и $b_1 - b_3$ см. рис. 15)

нии углерода в стали мартенситное превращение заканчивается при температурах ниже нуля. Это значит, что для получения полного превращения $A \rightarrow M$ необходимо охлаждать сталь до отрицательных температур (ниже 0).

Обычно для высокоуглеродистых сталей в условиях резкого их переохлаждения полного превращения аустенита в мартенсит не происходит, всегда остается часть непревращенного аустенита, называемого остаточным аустенитом. Чем больше сталь содержит углерода, тем больше в ее микроструктуре будет наблюдаться остаточного аустенита. Образование мартенсита сопровождается увеличением его объема и напряженного состояния кристаллической решетки и структуры. Структуры распада аустенита располагаются по возрастанию объема в следующем порядке: аустенит, перлит, сорбит, тростит, мартенсит.

Бейнитное превращение аустенита. При переохлаждении до температур 500–250 °С, расположенных ниже изгиба S -кривой (см. рис. 15), аустенит превращается в бейнит – промежуточную структуру, образование которой характеризуется сочетанием диффузионного перлитного ($A \rightarrow P$) и бездиффузионного мартенситного ($A \rightarrow M$) видов превращения в отдельных участках переохлажденного аустенита. Это происходит в результате перераспределения углерода в таких участках. В зависимости от температуры изотермического превращения различают верхний и нижний бейнит. Верхний бейнит образуется при более высоких температурах, имеет перистое строение, напоминающее перлит, его твердость НВ 350; нижний бейнит имеет игольчатое строение, похожее на строение мартенсита, его твердость НВ 450. В отличие от мартенсита бейнит наряду с несколько меньшей твердостью и прочностью обладает повышенной вязкостью.

Превращение аустенита при непрерывном охлаждении. Термическую обработку стали проводят после нагрева до соответствующей температуры при непрерывном охлаждении. Кривые охлаждения строят в координатах температур T – время t , поэтому их можно нанести на диаграмму изотермического превращения аустенита (рис. 16). Верхняя кривая охлаждения ν_1 пересекает S -кривую в области распада аустенита при высоких температурах, соответствующих небольшому переохлаждению. Значит, при охлаждении стали с медленной непрерывной скоростью аустенит будет распадаться на перлит P , как и при изотермическом превращении, с небольшим переохлаждением. При увеличении скорости охлаждения (кривые ν_2 и ν_3) аустенит будет превращаться в сорбит S и тростит T соответственно, так как эти кривые ν_2 и ν_3 пересекают S -кривую при более низких температурах и более высоких степенях переохлаждения. При охлаждении стали с большой скоростью (кривая охлаждения ν_4 касается изгиба S -кривой) превращения аустенита в перлитные пластинчатые структуры ($\Phi + C$) не происходит (нет пересечения S -кривой). Аустенит переохлаждается до температуры начала мартенсит-

ного превращения M_n и превращается в мартенсит M . Эта минимальная скорость охлаждения стали, необходимая для переохлаждения аустенита до мартенситного превращения, называется критической скоростью охлаждения. При охлаждении стали со скоростью, несколько меньшей критической, происходит частичное превращение аустенита в перлитную структуру – тростит (частичное пересечение кривой v_4 с S -кривой). Далее сильно переохлажденный аустенит превращается в мартенсит. Образовавшаяся структура после охлаждения будет состоять из тростита и мартенсита (тростомартенсит).

Бейнитную структуру можно получить у стали, если после нагрева ее переохладить ниже изгиба S -кривой и выдержать при этой температуре до полного распада аустенита ($A \rightarrow B$).

Охлаждение стали с любой скоростью, превышающей критическую, приводит к превращению аустенита в мартенсит (например, кривая v_5), называемому закалкой. Если сталь содержит большое количество углерода (0,6 % и более), то кроме мартенсита в структуре стали будет наблюдаться остаточный аустенит $A_{ост}$.

Более наглядное представление о превращении аустенита при непрерывном охлаждении стали дают диаграммы анизотермического превращения аустенита (рис. 17). Их строят на основании наблюдения за процессом непрерывного охлаждения стали с различными скоростями после нагрева до соответствующих температур, превышающих критические точки. Точки начала и конца превращения в стали при каждой скорости охлаждения наносят на кривые охлаждения, построенные в координатах температура T – время t . Интервалы одинаковых превращений объединяют в области перлитного (перлит, сорбит, тростит) и мартенситного превращения аустенита.

Превращения мартенсита и остаточного аустенита при нагреве. Мартенситная структура закалки стали неустойчива и сильно напряжена. При последующем нагреве мартенситной структуры стали наблюдаются следующие ее превращения.

При нагреве до температуры 100–200 °С происходят процессы, способствующие выделению углерода из мартенсита. Снимаются внутренние напряжения в стали, уменьшается тетрагональность кристаллической решетки. Она становится почти кубической. Прочность и пластичность практически не изменяются. Такую структуру стали называют "отпущенный мартенсит" (первое превращение).

Нагрев при температуре 200–300 °С приводит к распаду мартенсита с выделением углерода.

В высокоуглеродистых сталях, в которых кроме мартенсита присутствует аустенит $A_{ост}$, происходит его превращение в отпущенный мартенсит $A_{ост} \rightarrow M$. Это сопровождается повышением прочности и твердости стали (второе превращение).

Нагрев при температуре 300–400 °С приводит к полному распаду

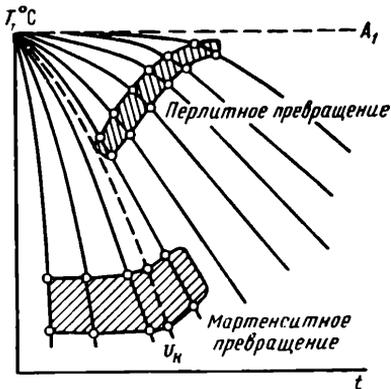


Рис. 17. Анизотермическая диаграмма превращения аустенита (схема)

v_k – критическая скорость охлаждения стали (закалка)

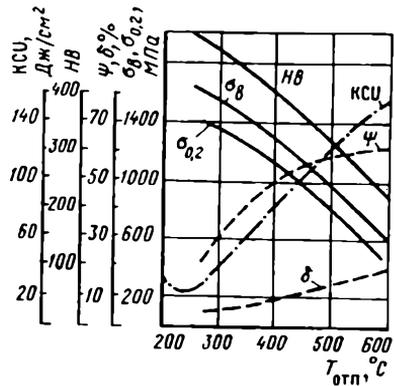


Рис. 18. График зависимости механических свойств стали от температуры отпуска $T_{отп}$:

KCU – ударная вязкость; HB – твердость по Бринеллю; ψ – относительное поперечное сужение; σ – относительное удлинение; σ_B – временное сопротивление; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести

мартенсита на мелкозернистую смесь феррита и цементита – тростит (третье превращение).

При более высокой температуре нагрева 400–650 °C происходит укрупнение (коагуляция) и округление (сфероидизация) зерен феррита и цементита. Такая более крупная зернистая смесь феррита и цементита называется сорбитом (четвертое превращение).

С увеличением температуры нагрева до 300–650 °C изменяются механические свойства стали (рис. 18): уменьшаются прочность и твердость, повышаются пластичность и вязкость стали. Термическая обработка, заключающаяся в последующем нагревании закаленной стали с мартенситной структурой, называется отпуском.

ВИДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Виды термической обработки стали русский ученый А.А. Бочвар подразделил на четыре группы: отжиг первого рода, отжиг второго рода, закалка и отпуск. При этом свойства стали изменяются только от термического воздействия на металл. Кроме этих групп основных видов термической обработки стали широко применяются два сложных метода ее упрочнения: химико-термическая и термомеханическая обработка стали. Химико-термическая обработка стали сочетает химическое и термическое воздействие на металл, а термомеханическая – термическое и пластическое.

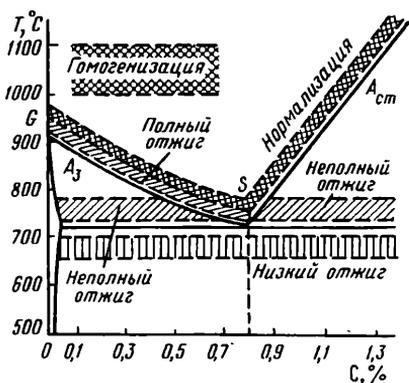


Рис. 19. Интервалы температур нагрева углеродистых сталей в зависимости от содержания углерода C для различных видов отжига

Отжиг — вид термической обработки, при котором изделия нагревают до определенной температуры, выдерживают длительное время в зависимости от их размера, а затем медленно охлаждают вместе с печью.

Отжиг первого рода подразделяется на диффузионный и низкий.

Диффузионный отжиг (гомогенизация) заключается в нагреве стали до высоких температур $1000\text{--}1100\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 19), длительной выдержке и последующем медленном охлаждении вместе с печью с целью фазовой перекристаллизации. Применяют для слитков и крупных стальных отливок, выравнивания химической неоднородности их состава в зернах и зонах, т.е. для уменьшения дендритной и зональной ликвации. Ввиду сильного роста зерен при диффузионном отжиге заготовки после него подвергают дополнительной термической обработке, например обычному отжигу.

Низкий отжиг заключается в нагреве стали ниже нижней критической точки A_{c1} , выдержке и последующем медленном охлаждении вместе с печью. Применяют для снятия внутренних напряжений (например, после сварки). Такой отжиг протекает без фазовой перекристаллизации. Рекристаллизационный (низкий) отжиг используют после холодной пластической деформации (наклепа) для улучшения пластических свойств стали.

Таким образом, отжиг первого рода применяют, когда предшествующая обработка приводит металл в неустойчивое состояние. Нагрев при отжиге увеличивает тепловую подвижность атомов, поэтому процессы, приводящие металл в устойчивое состояние (снятие напряжений, уменьшение искажений кристаллической решетки, диффузия и т.п.), достигают заметных скоростей.

Отжиг второго рода подразделяется на полный, неполный и изотермический. Разновидностью отжига является нормализация. Цель отжига второго рода — фазовая перекристаллизация и снятие внутренних напряжений. В процессе отжига изменяются форма и размер фаз, в результате

чего получается структура, состоящая из феррита и цементита (карбидов) с наименьшей твердостью и большой пластичностью.

Полный отжиг заключается в нагреве стали выше верхней критической точки A_{c3} (см. рис. 19) на 30–50 °С, выдержке и последующем медленном охлаждении вместе с печью. Применяют его для доэвтектоидной стали. Исходная структура, состоящая из феррита и перлита, при нагреве превращается в мелкозернистый аустенит. При медленном охлаждении аустенит распадается с образованием мелкозернистой ферритно-перлитной структуры. Заэвтектоидную сталь полному отжигу не подвергают.

Неполный отжиг заключается в нагреве стали выше нижней критической точки A_{c1} на 30–80 °С, но ниже верхней критической точки A_{c3} , выдержке и последующем медленном охлаждении вместе с печью. Применяют его для эвтектоидной и заэвтектоидной стали. Исходная структура заэвтектоидной стали, состоящая из перлита и вторичного цементита, после нагрева состоит из аустенита и цементита ($A + C$). При медленном охлаждении цементит получается зернистым, поэтому после отжига сталь состоит из зернистого перлита и цементита. Эвтектоидная сталь после отжига второго рода имеет также структуру зернистого перлита. Неполный отжиг заэвтектоидной стали называют сфероидизацией.

Неполному отжигу доэвтектоидную сталь подвергают редко, так как перекристаллизацию претерпевает один перлит, а феррит остается неизменным. Иногда его применяют для поковок и сортового проката из доэвтектоидной стали, чтобы снять внутренние напряжения и улучшить обрабатываемость резанием.

Изотермический отжиг – вид обработки, при которой сталь нагревают до соответствующей температуры в зависимости от содержания углерода, а затем быстро охлаждают до температуры, лежащей ниже точки A_{r1} на 100–150 °С, выдерживают при ней до полного распада аустенита и охлаждают на воздухе. При этом сокращается время полной обработки и получается более равномерная микроструктура стали, чем при обычном отжиге.

Нормализация – вид термической обработки, при которой сталь с любым содержанием углерода нагревают выше точек A_{c3} и A_{cT} , выдерживают при этой температуре, а затем охлаждают на спокойном воздухе (в цехе).

После нормализации в микроструктуре стали наблюдается по сравнению с перлитом отжига более тонкопластинчатая смесь феррита и цементита, называемая сорбитом. Сорбит имеет несколько большую прочность и пластичность, чем перлит, поэтому нормализация часто является окончательной термической обработкой, когда у изделий не требуется высокой прочности. При нормализации устраняют структурную неоднородность и внутренние напряжения в стали. Цель нормализации – устранение некоторых дефектов структуры стали после преды-

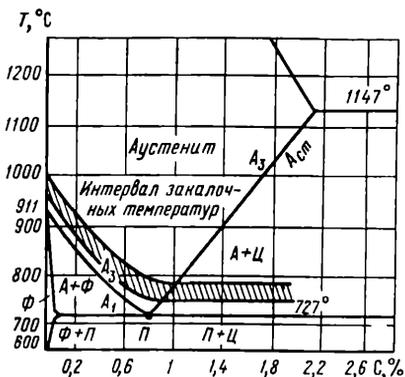


Рис. 20. Интервалы температур закалки углеродистых сталей в зависимости от содержания углерода С

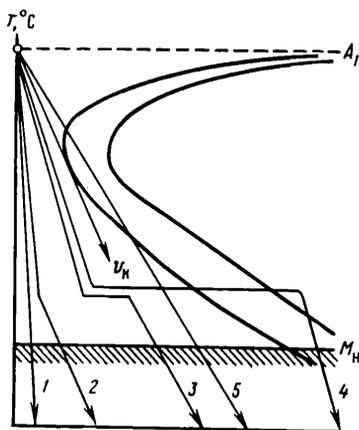


Рис. 21. Кривые охлаждения стали для различных видов закалки

дущих операций горячей обработки (литья, прокатки,ковки и т.п.) или предварительная подготовка структуры стали к последующим технологическим операциям (закалке, обработке резанием).

Закалка — вид термической обработки, при которой изделие нагревают до соответствующей температуры в зависимости от химического состава (рис. 20), выдерживают при этой температуре, а затем охлаждают с большой скоростью, превышающей критическую для данной стали, с целью получения наивысшей твердости и прочности. Среднеуглеродистые стали, как правило, охлаждают при закалке в воде, высокоуглеродистые и конструкционные легированные стали — в масле, а некоторые высоколегированные стали — на воздухе и в солях с учетом их критической скорости охлаждения. Вода охлаждает намного сильнее масла. Добавление к воде солей, щелочей увеличивает ее закалывающую способность.

Закалка подразделяется на полную, неполную, изотермическую, а также другие разновидности, позволяющие снижать остаточные напряжения в стали.

Полная закалка — термическая обработка, при которой сталь нагревают до температуры, превышающей верхнюю критическую точку A_{c3} на 30–50 °С, и охлаждают со скоростью, превышающей критическую v_k (рис. 21, прямая 1). Применяют ее для среднеуглеродистой доэвтектоидной стали, структура которой после закалки представляет собой мартенсит, обладающий высокой твердостью и прочностью.

Неполная закалка — термическая обработка, при которой сталь нагревают до температуры, превышающей нижнюю критическую точку A_{c1}

на 30–50 °С (ниже верхней критической точки A_{c3}), и охлаждают со скоростью, превышающей критическую v_k . Неполную закалку применяют для эвтектоидной и заэвтектоидной углеродистых сталей. Исходная структура заэвтектоидной стали состоит из перлита и вторичного цементита. При нагреве выше A_{c1} происходит превращение перлита в аустенит ($P \rightarrow A$), а цементит остается нерастворенным. При быстром охлаждении происходит превращение $A \rightarrow M$, и в результате структура заэвтектоидной стали состоит из мартенсита, цементита и остаточного аустенита. Наличие в структуре цементита повышает твердость и износостойчивость стали. Структура закаленной эвтектоидной стали состоит из мартенсита и остаточного аустенита.

Неполной закалкой считают и термическую обработку, при которой сталь нагревают до соответствующей температуры в зависимости от ее химического состава, но охлаждают со скоростью, меньше критической. В этом случае структура стали включает не чистый мартенсит, а тростомартенсит (прямая 5) и имеет пониженную твердость.

Изотермическая закалка – термическая обработка, при которой сталь нагревают до соответствующей температуры в зависимости от ее химического состава, затем быстро охлаждают до температуры 250–350 °С, выдерживают при этой температуре, после чего охлаждают на воздухе (кривая 4). При изотермической выдержке происходит превращение аустенита в бейнит, обладающий по сравнению с мартенситом несколько меньшей прочностью и твердостью, но обычно повышенной вязкостью.

Прерывистую закалку проводят с охлаждением изделий в двух средах: сначала в быстроохлаждающей среде (воде), а затем в медленноохлаждающей (масло или воздух) (кривая 2). Это приводит к тому, что в мартенситном интервале температур сталь охлаждается медленно, что приводит к уменьшению внутренних напряжений. Применяют ее, например, для закалки инструмента из высокоуглеродистой стали. Процесс требует высокой квалификации термиста.

Ступенчатая закалка (кривая 3) заключается в нагреве стали до соответствующей температуры, а затем в охлаждении ее в расплавленных солях при температуре, несколько превышающей начало мартенситного превращения M_n . После изотермической выдержки, необходимой для выравнивания температуры по всему сечению изделия (без распада аустенита), осуществляют охлаждение на воздухе. Это приводит к уменьшению остаточных закалочных напряжений. Применяют для углеродистых сталей размером только до 10 мм.

Прокаливаемость стали – способность стали закаливаться на определенную, ей свойственную глубину. Закаливаемость – способность стали получать структуру мартенсита с максимальной твердостью, зависящую от содержания в ней углерода.

При закалке деталей сквозная их прокаливаемость не достигается,

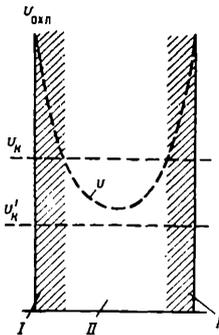


Рис. 22. Прокаливаемость стали в зависимости от скорости охлаждения $v_{\text{охл}}$ по ее сечению

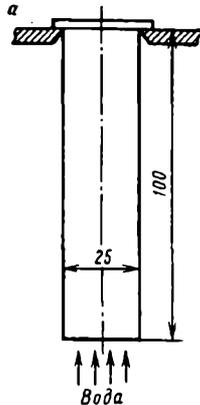
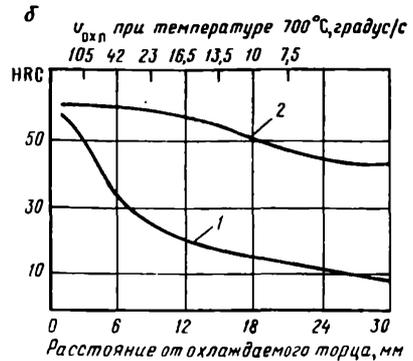


Рис. 23. Испытание стали на прокаливаемость методом торцевой закалки:

а — схема закалки образца; б — изменение твердости и скорости охлаждения для неглубоко- (1) и глубокопрокаливаемых (2) сталей



так как поверхность охлаждается быстрее, чем сердцевина. Скорость закалки на поверхности выше критической скорости v_k , поэтому начиная от поверхности к сердцевине детали будут получаться различные структуры с разными свойствами: на поверхности детали мартенсит M (закаленная зона I при $v > v_k$), затем тростит ($v < v_k$) и в центре сорбит или перлит (незакаленная зона II при $v < v_k$ (рис. 22). Если условия охлаждения те же, но у стали другая критическая скорость v_k , то и сердцевина детали будет охлаждаться со скоростью $v > v'_k$. Тогда деталь по всему сечению будет иметь мартенситную структуру, так как прокалится насквозь. Следовательно, чем меньше у стали v_k , тем глубже будет ее прокаливаемость.

За глубину прокаливаемости стали принимают расстояние от поверхности детали до слоя с полумартенситной структурой (50% мартенсита и 50% тростита), которой соответствует твердость HRC 50 (по Роквеллу). Для оценки прокаливаемости принимают диаметр максимального сечения D_k , которое в данном охладителе (в воде $D_{к.в}$, в масле $D_{к.м}$, в идеальной среде D_{∞}) прокалится насквозь. Вода более интенсивный охладитель, чем масло, и $D_{к.в}$ больше, чем $D_{к.м}$, т.е. при охлаждении в воде прокаливаемость больше, чем в масле.

Прокаливаемость стали определяют экспериментально с использованием специальных методов. Наиболее известен метод торцевой закалки, при которой образец охлаждают с торца (рис. 23,а). По мере удаления от торца скорость охлаждения и твердость уменьшаются (рис. 23,б). Твердость измеряют на поверхности образца после его охлаждения. По-

лученные кривые для разных сталей 1 и 2 показывают, что у торца образца образуется мартенситная структура (максимальная твердость), затем полумартенситная структура (мартенсит + тростит) и происходит уменьшение твердости, а далее – незакаленная (исходная) структура. За границу между закаленной и незакаленной зонами принимают слой с полумартенситной структурой твердостью HRC 50. На практике для данной марки стали строят не одну кривую, а две линии – полосы прокаливаемости, полученные экспериментально на большом числе образцов разных плавок данной марки. Эти полосы охватывают разброс значений твердости стали после закалки в зависимости от колебания химического состава, размера зерна и других факторов для данной марки стали, что позволяет более точно определить ее прокаливаемость.

Отпуск – термическая обработка, при которой закаленную сталь, находящуюся в неравновесном мартенситном состоянии, нагревают не выше точки $A_{c1} = 727\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдерживают при заданной температуре в течение длительного времени и охлаждают. При отпуске происходит распад мартенсита и сталь приобретает новую структуру и свойства.

По условиям нагрева отпуск подразделяют на низкий, средний, высокий и многократный.

При низком отпуске закаленную сталь нагревают до температуры $150\text{--}250\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдерживают, а затем охлаждают с любой скоростью. Такой отпуск применяют для снятия внутренних напряжений при сохранении высокой твердости изделия. Низкому отпуску обычно подвергают закаленные цементированные, цианированные и азотированные детали машин, а также детали из инструментальных углеродистых и легированных сталей. Структура стали после низкого отпуска – отпущенный мартенсит.

Средний отпуск закаленной стали проводят при температуре $350\text{--}450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Структура отпущенной стали – тонкозернистый тростит. Применяют средний отпуск для получения высокого предела упругости у стальных пружин, рессор и т.п.

При высоком отпуске закаленную сталь нагревают до температуры $450\text{--}650\text{ }^{\circ}\text{C}$ и охлаждают после необходимой выдержки с любой скоростью для стали, не склонной к отпускной хрупкости. У сталей, склонных к отпускной хрупкости, в процессе отпуска (при малой скорости охлаждения после нагрева) происходит резкое снижение ударной вязкости. Сталь, склонную к отпускной хрупкости, необходимо после нагрева быстро охладить в масле или воде. Высокий отпуск применяют для получения стали с наиболее благоприятным сочетанием механических свойств. При увеличении температуры отпуска пластические свойства углеродистой стали повышаются, а прочностные понижаются. Закалка с последующим высоким отпуском, обеспечивающим наилучшее сочетание пластических и прочностных свойств, называется термическим улучшением, или термическим упрочнением. Структура высокоотпущенной

стали – зернистый сорбит (смесь зерен феррита и цементита). Высокий отпуск используют для деталей машин и строительных конструкций, а также для инструментальной быстрорежущей стали.

Отпуск многократный представляет собой разновидность отпуска, при котором проводят многократное (2–4 раза) повторение цикла заданный нагрев – выдержка – полное охлаждение. Многократный отпуск применяют для изделий из быстрорежущей инструментальной стали с целью получения более полного превращения остаточного аустенита в мартенсит и соответственно повышения твердости и износостойкости.

Обработка стали холодом предложена А.П. Гуляевым в 1937 г. Она заключается в охлаждении закаленной стали, в структуре которой имеется остаточный аустенит, до температуры ниже 20°C в соответствии с интервалом ее мартенситного превращения $M_{\text{H}} - M_{\text{K}}$. У сталей с содержанием углерода свыше 0,5 % температура конца мартенситного превращения M_{K} лежит ниже 0°C . Обработка стали холодом ниже 0°C вызовет дополнительное образование мартенсита из остаточного аустенита. В результате обработки холодом и дополнительного образования мартенсита из остаточного аустенита повышаются твердость стали и ее магнитные характеристики, а также стабилизируются размеры деталей, так как завершается превращение $A_{\text{ост}} \rightarrow M$, связанное с увеличением объема. В качестве охладителя применяют, например, смесь твердой углекислоты и ацетона, дающую температуру -78°C .

7. ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБРАБОТКА СТАЛИ

Термомеханическая обработка стали (ТМО) основывается на совмещении термического и механического методов воздействия на металл с целью упрочнения. Термический метод вызывает фазовые изменения и состоит из закалки и отпуска. Механический метод заключается в пластической деформации стали прокаткой, ковкой, штамповкой и другими способами, обычно в аустенитном состоянии.

Распространение имеют два вида ТМО: высокотемпературная (ВТМО) и низкотемпературная (НТМО). При ВТМО сталь нагревают выше точки A_{C_3} . Затем ее в аустенитном состоянии при этой температуре подвергают деформации на 20–30 % и охлаждают со скоростью $v > v_{\text{K}}$ для получения мартенситного превращения $A \rightarrow M$. Деформация аустенита при высокой температуре приводит к получению более мелкоигльчатого мартенсита по сравнению с обычной закалкой. Такой мартенсит обладает несколько повышенной прочностью и, что особенно важно, повышенной пластичностью и вязкостью.

При НТМО сталь нагревают выше точки A_{C_3} , переохлаждают до температуры $500-600^{\circ}\text{C}$, пластически деформируют на 75–95 % при этой температуре в состоянии неустойчивого аустенита и быстро охлаждают со скоростью $v > v_{\text{K}}$. Чем больше деформирован и упрочнен аустенит,

тем выше будет прочность мартенсита. При этом пластичность понижается.

При выполнении ТМО заключительная операция – отпуск. Наиболее часто применяют низкий отпуск.

Известны и другие виды ТМО. Например ТМО, при которой после деформации сталь подвергают перлитному ($A \rightarrow П$) или бейнитному ($A \rightarrow Б$) превращению. Этот принцип используют при контролируемой прокатке с регулированием механического и теплового режимов прокатки, нашедшей широкое применение в производстве высокопрочных низколегированных сталей для газонефтепроводных труб большого диаметра. При контролируемой прокатке сталь нагревают до высоких температур, а заканчивают прокатку при низкой температуре ($800\text{ }^\circ\text{C}$), что позволяет сохранить мелкозернистую структуру аустенита, который и распадается, например, по перлитному типу при температуре $650\text{ }^\circ\text{C}$ с выделением упрочняющих фаз (мелкодисперсных карбидов, нитридов и т.п.), называемым дисперсионным твердением.

8. ПОВЕРХНОСТНАЯ ЗАКАЛКА СТАЛИ

Поверхностная закалка заключается в нагреве поверхностного слоя детали до температуры, превышающей точку A_{c3} (рис. 24), с последующим быстрым охлаждением со скоростью $v > v_k$. Температура детали от поверхности к сердцевине постепенно изменяется: в поверхностном слое *I* произойдет полная закалка ($T > A_{c3}$), в слое *II* – неполная закалка ($T < A_{c3}$) и в сердцевине *III* останется незакаленная зона ($T < A_{c1}$). Соответственно при охлаждении на поверхности детали образуется твердая, износостойкая мартенситная структура, а в сердцевине сохранится исходная пластичная структура, обеспечивающая высокую динамическую прочность детали.

Наибольшее применение имеет закалка индукционным нагревом ТВЧ (высокочастотная закалка), предложенная и разработанная П.В. Вологдиным. Нагрев происходит очень быстро, поэтому окалина не образуется, коробление происходит незначительное, так как нагрев и охлаждение осуществляют только с поверхности. Нагрев ТВЧ высокопроизводи-

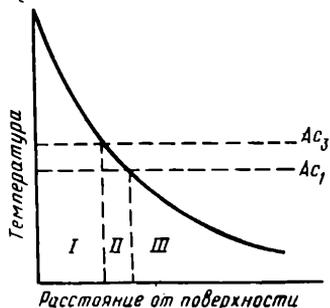


Рис. 24. График изменения температуры нагрева детали T при поверхностной закалке

телен, позволяет закаливать детали различной конфигурации. Процесс закалки полностью автоматизирован. Глубина закалки точно регулируется, возможна и сплошная прокаливаемость.

Для каждой детали создают индуктор в виде петли или витка из трубок красной меди. Нагреваемую деталь помещают внутри витка индуктора. Переменный электрический ток высокой частоты проходит по индуктору, что приводит к возникновению внутри индуктора переменного магнитного поля. Это магнитное поле индуцирует (наводит) в металле детали, находящейся внутри индуктора, электрические вихревые токи (токи Фуко), которые вызывают нагрев поверхности детали до высокой температуры в течение нескольких секунд. Охлаждение проводят водяным душем с помощью специального душирующего устройства (спрейера). После выключения нагрева охлаждающую воду обычно подают через многочисленные отверстия на внутренней поверхности индуктора.

После закалки ТВЧ детали подвергают низкому отпуску. Применяют также закалку с самоотпуском, при которой охлаждение прерывают с таким расчетом, чтобы оставшаяся в детали теплота была достаточной для выполнения заданного отпуска. Ввиду значительной стоимости индуктора и установки закалку ТВЧ используют только при массовом и серийном производстве деталей.

9. ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

Химико-термической обработкой называют процесс поверхностного насыщения стали каким-либо элементом с последующей термической обработкой, что приводит к изменению состава, структуры и свойств ее поверхности.

Насыщение поверхности стали происходит диффузионным путем: при нагреве до определенной температуры в течение заданного времени для получения поверхностного слоя нужной толщины. При этом протекают следующие процессы: распад молекул в насыщающей внешней среде с образованием атомов насыщающего элемента (диссоциация), поглощение этих атомов поверхностью стали (адсорбция), проникновение насыщающих атомов в глубину стали (диффузия).

Насыщение стали углеродом носит название цементации, азотом — азотирования, одновременно углеродом и азотом — цианирования и т.д. Применяемая после цементации, азотирования, цианирования термическая обработка обычно состоит из закалки и низкого отпуска. Это позволяет получить твердую, износостойкую поверхность в сочетании с прочной или пластичной и вязкой ее сердцевиной, в зависимости от применяемой марки стали (легированная или углеродистая).

Цементация стали. Насыщение углеродом стали осуществляют в газовой и твердой средах.

Газовая цементация имеет наибольшее применение. Цель цементации — получение твердой, износостойкой поверхности детали обычно с мягкой, пластичной сердцевиной. Цементации подвергают детали из стали с низким содержанием углерода — до 0,25 % (возможно и до 0,35 %). После цементации концентрация углерода на поверхности детали достигает 0,8–1 % (заэвтектоидная структура, состоящая из перлита и сетки цементита). Содержание углерода постепенно убывает к сердцевине, состоящей из феррита и перлита (дозэвтектоидная структура). При этом плавно изменяется и микроструктура. Цементацию осуществляют при нагреве выше точки A_{c3} до температуры 900–950 °С.

Газовая цементация протекает быстро. Для получения, например, цементированного слоя 1,8 мм при температуре 930 °С требуется 8 ч. Ее осуществляют в герметически закрытых печах. Цементирующий газ нужного состава приготавливают отдельно и подают в печь. Цементирующие газы — окись углерода и предельные углеводороды (метан, этан, пропан, бутан и др.). Наиболее часто применяют естественный природный газ (92–96 % метана) и др. При нагревании происходит разложение цементирующих газов с образованием атомарного углерода, который и диффундирует в сталь, образуя на ее поверхности цементированный слой.

При твердой цементации детали запakovывают в ящик, наполненный науглероживающим веществом — карбюризатором, которым служит древесный уголь с 10–30%-ными добавками углекислых солей, активизирующих карбюризатор. Процесс протекает очень долго — не один десяток часов для получения слоя нужной толщины.

Для получения высокой твердости и износоустойчивости цементированного слоя после цементации проводят закалку с температуры нагрева 820–850 °С и последующий низкий отпуск при температуре 150–200 °С. Применяют и другие варианты закалки. После закалки и низкого отпуска структура поверхности стали представляет собой отпущенный мартенсит твердостью HRC 58–62. Структура сердцевины углеродистых сталей состоит из феррита и перлита, легированных — обычно из тростита или сорбита в зависимости от размера детали и марки стали. Цементации подвергают зубчатые колеса, поршневые пальцы, червяки, ролики подшипников и др.

Азотирование — процесс насыщения стали азотом. Азотированный слой сам по себе имеет высокую твердость и износостойкость, и его образование на поверхности деталей не приводит практически к изменению их размеров. Поэтому азотирование проводят на деталях окончательно обработанных (после закалки с высоким отпуском и шлифовки для доводки размеров). При азотировании детали нагревают в специальной герметически закрытой печи, через которую пропускают насыщающий газ — аммиак NH_3 . Аммиак разлагается при температуре 500–700 °С с образованием атомарного азота, который диффундирует в поверхностные слои стали, образуя азотированный слой.

Азотирование применяют в основном для двух целей: повышение твердости и износостойкости и повышение коррозионной стойкости деталей. Для первой цели применяют специальные стали с содержанием легирующих элементов (например, хром, молибден, алюминий). В данном случае азотирование проводят при температуре 500–550 °С. Атомарный азот, диффундируя в сталь, вступает в химическое взаимодействие с железом и легирующими элементами, образуя нитриды железа Fe₂N, хрома CrN, алюминия AlN и др. Эти нитриды придают азотированному слою очень высокую твердость до HV 1200 (по Виккерсу). Процесс азотирования длительный (до 90 ч), что является его недостатком. Азотирование применяют для повышения износостойкости цилиндров моторов и насосов, зубчатых колес, штампов, пуансонов и т.д.

Для повышения коррозионной стойкости азотированию подвергают льюбые стали (обычно углеродистые) при температуре 600–700 °С в течение 0,5–1 ч. Такое азотирование называют декоративным.

Цианирование заключается в одновременном насыщении поверхности стали углеродом и азотом. Его осуществляют обычно в жидкой среде – расплавленных цианистых солях. Цианирование в газовой среде называют нитроцементацией. Диффузионному насыщению подвергают стали с содержанием углерода 0,2–0,4 %. При цианировании и нитроцементации достигаются высокая твердость и износостойкость поверхности деталей после закалки и последующего низкого отпуска. Сердцевина сохраняется пластичной.

При получении слоя небольшой толщины до 0,3 мм цианирование проводят при температуре 820–860 °С в цианистых солях, содержащих NaCN, NaCl, Na₂CO₃. Детали закаливают непосредственно из ванны, твердость их поверхности составляет HRC 58–62 после низкого отпуска. При получении слоя толщиной до 2 мм цианирование проводят при температуре 930–960 °С в цианистых солях, содержащих NaCN, NaCl, BaCl₂. Детали, вынув из ванны, охлаждают, а затем подвергают закалке и низкому отпуску. Недостаток цианирования – ядовитость цианистых солей.

Нитроцементацию осуществляют при температуре 850–870 °С в газовой смеси, состоящей из эндотермического газа (20 % CO, 40 % H₂, 40 % N₂) с добавлением 5–15 % природного газа и 3–8 % аммиака. Твердость поверхности деталей после закалки и низкого отпуска составляет HRC 60–62.

Диффузионная металлизация представляет собой диффузионный процесс насыщения поверхности стальных деталей следующими металлами и металлоидами: хромом – хромирование, алюминием – алитирование, кремнием – силицирование, бором – борирование и т.д. Эти процессы проводят для повышения жаростойкости до температуры 1000 °С – хромирование, алитирование и др.; коррозионной стойкости и твердости до HV 2000 – борирование; износостойкости деталей – хро-

мирование, борирование и др. Насыщение элементами осуществляют в твердых, жидких и газовых средах при температуре 1000–1200 °С длительное время.

При диффузионной металлизации в твердой среде детали запаковывают в ящик с металлизатором и активаторами, в жидкой среде – детали опускают в расплавленный металл (например, алюминий), в газовой среде детали обрабатывают хлоридами различных металлов или металлоидов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие аллотропические превращения претерпевает железо при нагревании и охлаждении?
2. В какие взаимодействия вступает железо с углеродом? Что такое феррит, аустенит, цементит, перлит, ледебурит?
3. Какие сплавы называют сталями и чугунами? Охарактеризовать их микроструктуру.
4. Что такое фаза, микро- и макроструктура?
5. Что такое белый, серый, ковкий и высокопрочный чугуны? Как они маркируются и какими свойствами отличаются друг от друга?
6. Назовите виды термической обработки стали, ее сущность?
7. Что такое отжиг стали? Его виды, назначение и микроструктуры в зависимости от содержания углерода?
8. Что такое нормализация стали? Ее назначение и микроструктура в зависимости от содержания углерода?
9. Что такое закалка стали? Ее назначение и микроструктуры в зависимости от содержания углерода и температуры нагрева?
10. Как строится С-диаграмма и какие образуются микроструктуры при различных степенях переохлаждения стали?
11. Что такое критическая скорость охлаждения стали?
12. Виды закалики стали в зависимости от скорости и характера охлаждения?
13. Что такое закаливаемость и прокаливаемость стали?
14. Что такое отпуск стали? Его разновидности и микроструктуры в зависимости от назначения стали и требуемых свойств?
15. Когда применяют закалку ТВЧ и в чем она заключается?
16. Что представляет собой термомеханическая обработка стали? Ее виды, назначение, достоинства?
17. Какое назначение имеет химико-термическая обработка? Ее виды?

10. КЛАССИФИКАЦИЯ СТАЛИ

Общее представление об особенностях наиболее широко применяемых сталей дает их классификация по следующим признакам: способу выплавки, степени раскисления, химическому составу, качеству, состоянию металла при поставке, прочности, применению и т.д.

Все признаки классификации стали взаимосвязаны между собой. Выбор способа выплавки стали и других его особенностей зависит от химического состава и назначения стали. Химический состав стали зависит от требуемых механических и других свойств.

Способ выплавки стали и его технологические особенности, степень раскисления, разливка определяют загрязнение стали такими вредными примесями, как сера и фосфор, газы, неметаллические включения, а также характер микроструктуры, размер зерна, ликвацию и т.д.

По способу выплавки сталь подразделяют в основном на мартеновскую, конвертерную и электросталь. По условиям проведения выплавки (тип футеровки печи или конвертера, флюса и шлаков) сталь называют кислой или основной.

Процесс выплавки вызывают кислым, когда футеровка печи (конвертера), флюс, шлаки состоят главным образом из кварцита и кварца, т.е. из веществ, содержащих кремнезем SiO_2 (кислотный оксид). Основным называют процесс выплавки стали, когда футеровка печи (конвертера), флюс, шлаки состоят преимущественно из известняка, доломита, доломитизированного известняка или магнезита, составной частью которых являются основные оксиды кальция CaO и магния MgO . Поэтому сталь, выплавляемую, например, мартеновским способом, соответственно называют мартеновской кислотой или мартеновской основной сталью в зависимости от условий проведения плавки.

Основной процесс выплавки стали по сравнению с кислым дешевле, так как в нем сталь очищают от вредных примесей серы и фосфора путем введения извести. При этом не требуется чистоты исходной шихты.

Кислый мартеновский процесс выплавки стали и электрошлак в дуговых или индукционных печах позволяют получать более качественную и дорогостоящую сталь по сравнению с основным мартеновским

процессом, причем электросталь является более высококачественной и дорогой. Эти способы применяют для получения легированных и высоколегированных сталей.

Конвертерный кислый способ выплавки стали называют бессемеровским, конвертерный основной способ – томасовским. При этих способах выплавки сталь получали в конвертерах при продувке чугуна снизу воздухом, поэтому она имела много загрязняющих газовых включений (азота, кислорода, водорода и т.д.), а также других примесей (серы, фосфора и т.д.), снижающих ее качество и ухудшающих свойства. В последние годы бессемеровский и томасовский способы выплавки стали не применяют. Их полностью заменил новый конвертерный способ – кислородно-конвертерный, при котором наиболее дешевую сталь получают в конвертерах с основной футеровкой при продувке чугуна сверху технически чистым кислородом, не отличающуюся по химическому составу и свойствам от мартеновской основной стали. Наиболее высокопроизводительный способ выплавки стали – конвертерный, а также в крупных электропечах. Производство стали этими способами все более возрастает.

В настоящее время в металлургическом производстве шире применяют новые прогрессивные методы и процессы, повышающие качество стали: выплавка стали в вакууме, электрошлаковый электродуговой переплав, внепечные методы обработки стали и др.

По степени раскисления сталь делится на спокойную, кипящую и полуспокойную. Качество и свойства стали зависят от степени раскисления. Под раскислением стали понимают снижение концентрации растворенного в ней кислорода. Это происходит в результате введения в жидкую сталь элементов, реагирующих с кислородом (марганец, кремний, алюминий и др.), – раскислителей. Важнейший этап раскисления стали – удаление из нее продуктов раскисления – неметаллических включений: алюмосиликатов, глинозема и других частичек оксидов. Образование неметаллических включений происходит от момента введения раскислителей в жидкий металл в печи или ковше до окончания его кристаллизации в изложнице. Решающее влияние на качество стали оказывают неметаллические включения, образовавшиеся при охлаждении и кристаллизации стали в изложнице, так как в отличие от включений, образующихся в печи или ковше, они не могут всплыть и остаются в стали.

Спокойной называют хорошо раскисленную сталь за счет введения раскислителей (марганец, кремний, алюминий) в жидкую сталь на всех стадиях выплавки: в печь, в желоб и в ковш. В слитке спокойной стали, хорошо раскисленной и отливой в изложницу с утепленной надставкой, образуется усадочная раковина только в верхней части слитка, а в объеме всего слитка практически не содержится газовых пузырей и раковин. В спокойной стали содержится 0,12–0,35 % кремния. Верхнюю

часть слитка спокойной стали с концентрированной усадочной раковиной обычно отрезают, и весь слиток становится качественным.

При выплавке кипящей стали по ходу плавки вводят лишь марганец, а кремний и другие раскислители не применяют. Поэтому в кипящей стали обнаруживаются лишь следы кремния ($\leq 0,05\%$). Кипящая сталь по сравнению со спокойной сталью того же состава перед выпуском из печи содержит повышенное количество кислорода. При заполнении изложниц такая сталь начинает сильно искрить и кипеть мелкими пузырями, так как по всему ее незастывшему объему при кристаллизации происходит раскисление по реакции



Эту реакцию называют реакцией самораскисления стали. Она идет в дополнение к раскислению стали марганцем в печи и ковше. Снижение концентрации кислорода в стали происходит преимущественно по реакции самораскисления. Образующийся по реакции монооксид углерода приводит к тому, что слиток кипящей стали после затвердевания содержит в головной части слитка усадочную рыхлость вместо усадочной раковины и сотовые пузыри в виде более или менее ярко выраженной зоны на определенном расстоянии от поверхности слитка во всем объеме. В наружной части слитка наблюдается плотная зона металла, имеющая очень чистую поверхность.

В полуспокойной стали кремния содержится меньше $0,17\%$. По технологии выплавки и разливки процесс получения полуспокойной стали – промежуточный процесс выплавки и разливки между спокойной и кипящей сталями. Усадочная раковина полуспокойной стали распределена на многочисленные пузыри и пустоты, внутренняя поверхность которых зеркально чистая, что приводит к их заварке при горячей прокатке. Структура слитка полуспокойной стали близка к структуре слитка спокойной стали, и в то же время такой слиток дает более высокий выход проката.

Спокойная сталь лучше кипящей, раскисленной только марганцем. Но и кипящие стали имеют применение, так как они дешевле, производство их дает меньше отходов (в отходы у спокойной стали идет верхняя часть слитка с усадочной раковиной), а раковины и пустоты в основном завариваются при прокатке. Кипящую сталь применяют для ненагруженных элементов конструкций.

По химическому составу сталь подразделяется на углеродистую и легированную. Углеродистая сталь в зависимости от содержания углерода делится на низкоуглеродистую (с содержанием углерода до $0,25\%$), среднеуглеродистую (с содержанием углерода $0,25-0,6\%$) и высокоуглеродистую (с содержанием углерода $0,6-2\%$).

В углеродистой стали, кроме железа и углерода, содержатся по-

стоянные (обычные) примеси, подразделяющиеся: на технологические, вводимые в сталь по условиям ее выплавки для раскисления (марганец, кремний); на вредные, попадающие в сталь из руды, печных газов (сера и фосфор); на скрытые – газы (кислород, водород, азот), попадающие в сталь из воздуха; на случайные, попадающие в сталь из металлического лома или руды (медь, никель, хром и др.).

Легированной называется сталь, в которой, кроме обычных примесей, содержатся специальные, вводимые в определенных сочетаниях легирующие элементы (хром, никель, молибден, вольфрам, ванадий, алюминий, титан и др.), а также марганец и кремний в количествах, превышающих обычное их содержание (1 % и выше). Легированная сталь в зависимости от содержания легирующих элементов делится на низколегированную (с содержанием легирующих элементов не более 2,5 %), среднелегированную (с содержанием легирующих элементов 2,5 – 10 %) и высоколегированную (с содержанием легирующих элементов свыше 10 %).

От химического состава зависит также и качество стали.

По качеству сталь делится на сталь обыкновенного качества, качественную, высококачественную и особовысококачественную. Качество стали зависит от состава шихты, технологического процесса ее выплавки, разливки и других металлургических факторов. Чем выше качество стали, тем уже пределы содержания в ней углерода, а также марганца, кремния и других элементов, меньше содержание вредных примесей серы и фосфора, меньше количество неметаллических включений, больше однородность микроструктуры и уже пределы колебания показателей механических свойств. Обычно качество стали характеризуют наличием вредных примесей – серы и фосфора, так как от их содержания зависят и другие признаки.

Сталью обыкновенного качества является углеродистая сталь, содержащая до 0,7 % углерода, широко применяемая в строительстве. В стали обыкновенного качества серы содержится в основном не более 0,055 %, а фосфора $\leq 0,045$ %.

Качественной сталью могут быть углеродистая и легированная, выплавляемые с соблюдением более строгих требований к составу шихты, процессам плавки и разливки. Содержание серы и фосфора не более 0,035 – 0,04 % (каждого из элементов).

Высококачественными сталями бывают легированные и высокоуглеродистые. Марка высококачественной стали, кроме общепринятых для обозначения цифр и букв, имеет дополнительную букву "А", например, сталь марки 12ХН2А. В высококачественных сталях серы и фосфора должно содержаться не более 0,025 – 0,03 %.

Особокачественную сталь изготавливают методом дугового электрошлакового переплава (к марке стали добавляют букву "Ш"). Содержание серы и фосфора в ней не более 0,015 %. Применяют ее в машиностроении.

Таблица 1. Группы и классы прочности строительной стали

Группа	Класс	Механические свойства на растяжение, не менее			Ударная вязкость КСУ, Дж/см ² , не менее			Состояние металла при поставке	
		σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	$T = -20$ °С	$T = -40$ °С	$T = -70$ °С		после механического старения
Обычная	C38/23	380	230	25	30-35	-	-	30	Горячекатаная
Повышенная	C44/29	440	290	21	-	30	30	30	Горячекатаная и термоупрочненная
	C46/33	460	330	21	-	30	30	30	Горячекатаная
Высокая	C52/40	520	400	19	-	30-50	30	30-40	Термоупрочненная
	C60/45	600	450	16	-	30-50	-	30-40	"-"
	C70/60	700	600	12	-	30	-	-	"-"
	C85/75	850	750	10	-	-	-	-	"-"

По состоянию металла при поставке сталь подразделяют на горячекатаную, термически упрочненную и контролируемой прокатки. Строительные стали обычно подвергают следующим видам термообработки: нормализация и закалка в сочетании с высоким отпуском. Стали для деталей машин обрабатывают всеми методами, рассмотренными в гл. 1, в зависимости от предъявляемых к ним требований. Технология контролируемой (термомеханической) прокатки отличается от обычной тем, что прокатку ведут в несколько стадий с применением определенной комбинации температуры и степени обжатия. Целенаправленное взаимодействие процессов кристаллизации, фазовых превращений и выделения в структуре стали мелкодисперсных частиц карбидов и нитридов позволяет достичь требуемых высоких прочностных и вязких показателей свойств.

По прочности строительную сталь подразделяют в зависимости от минимальных значений временного сопротивления σ_B и предела текучести σ_T на три группы: обычной, повышенной и высокой прочности. Каждая группа делится на классы прочности (табл. 1).

Стали для деталей машин на классы не подразделяют, так как они имеют большое разнообразие свойств в зависимости от упрочняющей

Таблица 2. Классы прочности стали для газонефтепроводов

Класс	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа, не менее	Предел текучести σ_T , МПа, не менее	Относительное удлинение δ_5 , %, не менее
K34	333	206	24
K38	372	235	22
K42	412	245	21
K50	485	343	20
K52	510	353	20
K55	539	372	20
K60	588	412	16

термической обработки и назначения. Сталь для газонефтепроводов подразделяют на классы по минимальному значению временного сопротивления (табл. 2).

По применению сталь подразделяют в зависимости от специфических технических требований, исходя из рабочих условий эксплуатации, на сталь для газонефтепроводов, резервуаров, газгольдеров и других листовых конструкций; арматурную сталь для армирования железобетонных конструкций; деталей машин и др.

11. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СТАЛИ

Материалы, применяемые для сооружения резервуаров, газгольдеров и других объектов, а также для деталей машин, предназначены воспринимать значительные рабочие нагрузки. Основные размеры несущих элементов этих конструкций, вид и марки металлических материалов для их изготовления выбирают на основании данных механического расчета на устойчивость и прочность, исходя из рабочих условий эксплуатации конструкции или детали.

Технические требования к стали для тех или иных элементов конструкций или деталей машин определяются совокупностью физико-механических свойств и технико-экономических показателей. Основные из них – химический состав, механические и технологические свойства материала. Кроме того, к стали предъявляют дополнительные требования: склонность к хрупкому разрушению; склонность к старению; способность подвергаться пластической деформации; характер внутреннего строения металла (оказывающего влияние на однородность показателей механических и технологических свойств) и качество его поверхности; долговечность материала при коррозионном воздействии атмосферной среды и рабочего продукта; стоимость и др.

Химический состав стали

Химический состав определяет свойства и качество материала, технико-экономическую целесообразность его применения в конструкции. Если данный материал включает в себя дефицитные и дорогостоящие легирующие компоненты, то может оказаться экономически неоправданным его применение, несмотря на сравнительно высокие механические и технологические свойства металла.

Изменяя химический состав материала и технологию его упрочнения, можно в широких пределах варьировать показателями его механических и технологических свойств.

Углерод особенно сильно влияет на свойства и структуру стали. С увеличением содержания углерода изменяются ее механические свойства, так как в структуре наблюдается увеличение цементита и уменьшение феррита, ухудшается свариваемость стали. Поэтому для строительных конструкций применяют сталь с содержанием не более 0,2 % С.

Марганец Mn, растворяясь в феррите и цементите, повышает прочность стали (рис. 25). При содержании его свыше 1 % наблюдается снижение пластичности и вязкости стали наряду с повышением прочности, так как образуются карбиды марганца. Поэтому в углеродистых сталях допускается содержание марганца не более 0,8 %. В низколегированных строительных сталях, в которых марганец является легирующим элементом, его максимальное содержание составляет менее 2 %. Увеличение содержания марганца приводит к повышению анизотропии свойств стали, склонности к росту зерна наряду с положительным его влиянием на ее прочность.

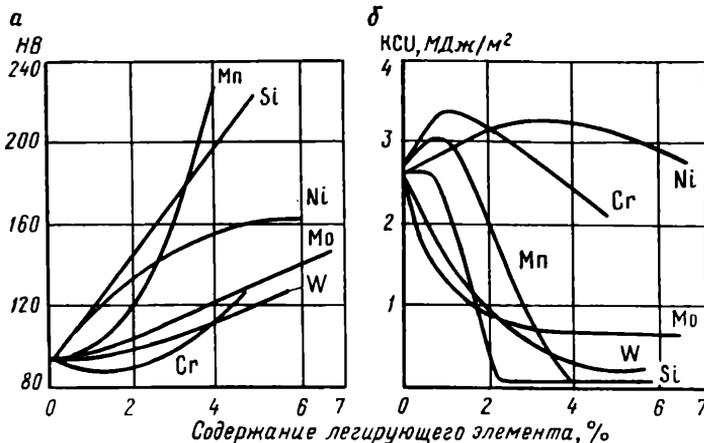


Рис. 25. График влияния легирующих элементов на твердость HB (а) и ударную вязкость КСУ феррита (б)

Кремний Si не обнаруживается в структуре стали, так как полностью растворяется в феррите, не образуя карбидов. Но часть кремния, который при выплавке стали присутствует в виде оксида кремния и не успевает всплыть в шлак, может остаться в стали в виде неметаллических включений SiO_2 , что нежелательно. Растворяясь в феррите, кремний увеличивает прочность, но, в отличие от марганца, уменьшает пластичность и вязкость стали. При содержании кремния свыше 1 % резко снижается вязкость стали, повышается антикоррозионность и вместе с тем увеличивается склонность к графитизации и ликвации, а также ухудшается свариваемость. Поэтому в низколегированных строительных сталях, в которых кремний является легирующим элементом, максимальное содержание его составляет не более 1,2 %.

В настоящее время марганец и кремний – основные легирующие элементы строительной стали. Другим легирующим элементом, наиболее часто вводимым в строительную сталь для повышения ее прочности, служит хром Cr (до 1 %), а также никель Ni (до 2 %); увеличивая прочность стали, хром и никель повышают также ее пластичность и вязкость (см. рис. 25). Кроме того, хром, никель и медь повышают антикоррозионность стали. Вольфрам W повышает прочность стали менее интенсивно, чем марганец и кремний, но резко снижает ее вязкость и пластичность при любом содержании, поэтому для строительных сталей его не применяют.

В связи с наблюдающейся тенденцией увеличения объемов резервуаров до 100 000 м³ и выше, увеличением диаметров трубопроводов до 1420 мм и более возникла необходимость применения высокопрочной строительной стали. В таких высокопрочных сталях наряду с обычными для строительной стали легирующими элементами марганцем, кремнием, хромом и другими – присутствуют дополнительные легирующие элементы: карбидообразующие – ванадий, титан, ниобий; карбидообразующие и борнитридообразующие – азот и ванадий, азот и титан, азот и алюминий (дисперсионно-твердеющие стали).

Ванадий, титан, ниобий, алюминий вводят в строительную сталь в количествах, не превышающих 0,1–0,2 %; молибден Mo – до 0,5 %, азот до 0,03 % и бор – до 0,006 % (в виде так называемых микродобавок). При наличии этих элементов в низколегированной строительной стали наблюдается измельчение микроструктуры; значительное увеличение прочности за счет выделения внутри зерен мелкодисперсных частиц карбидов или нитридов соответственно в сталях карбидного или нитридного упрочнения; уменьшение склонности к старению и хрупкому разрушению благодаря измельчению зерна, а также связыванию этими элементами кислорода и азота. Такие стали называют дисперсионно-твердеющими. В горячекатаной малоуглеродистой низколегированной стали, например, с дополнительным легированием вана-

дием предел текучести увеличивается в среднем на 10–15 %. Наибольшего эффекта упрочнения достигают сочетанием легирования и термической обработки. Например, для низколегированной стали с ванадием предел текучести после термического упрочнения может возрасти более чем на 30 %.

В любой стали вредные примеси (сера, фосфор и газовые примеси) строго ограничиваются.

Фосфор попадает в сталь из железной руды, хотя при выплавке стали стремятся максимально удалить его. Фосфор, растворяясь в феррите, повышает хрупкость стали. Особенно повышается прочность, уменьшается пластичность и падает ударная вязкость стали при низких температурах, т.е. наличие фосфора увеличивает склонность стали к хладноломкости.

Сера, как и фосфор, попадает в сталь из железной руды и из печных газов, т.е. продуктов горения топлива (SO_2). Сера в железе не растворяется, и любое ее количество образует сульфид железа FeS , который в конечном итоге располагается по границам зерен стали в виде легкоплавкой при температуре $985^\circ C$ сернистой эвтектики и делает сталь хрупкой, особенно в районе температур красного каления (1000 – $1200^\circ C$). Это явление носит название краснеломкости. При горячей обработке эти включения сернистой эвтектики расплавляются и образуют в стали надрывы и трещины.

Марганец ослабляет вредное влияние серы, так как при его наличии в жидкой стали образуются преимущественно сульфиды марганца, которые благодаря более высокой температуре плавления ($1620^\circ C$) при горячей обработке давлением не плавятся, а становятся пластичными под давлением вытягиваются в направлении прокатки (рис. 26, а). Сернистые включения в виде отдельных обособленных включений менее вредны. Но тем не менее присутствие сульфидов марганца в стали для ответствен-

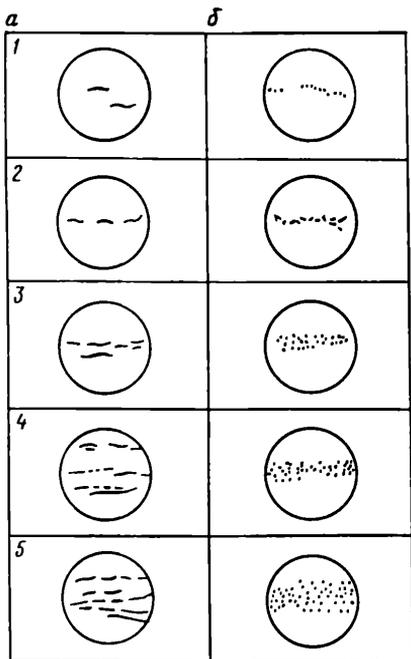


Рис. 26. Шкала оценки неметаллических включений:

а – сульфиды; б – оксиды; 1, 2, 3, 4, 5 – баллы оценки включений

ных конструкций и деталей машин строго ограничивают по шкале неметаллических включений в балльной системе: 1, 2, 3, 4 и 5. Сернистые включения мало влияют на статическую прочность и в то же время значительно снижают сопротивляемость стали воздействию усталостных и динамических нагрузок, так как служат местами концентрации напряжений и способствуют возникновению трещин.

Кислород, попадающий в жидкую сталь, может растворяться в железе, создавая твердый раствор, и химически взаимодействовать с ним, образуя химическое соединение. Кислород, находясь в стали в твердом растворе (в феррите), снижает ее предел прочности и твердость, уменьшает стойкость против коррозии, ковкость, обрабатываемость резанием, усталостную прочность, износостойчивость, а также придает ей хладноломкость, красноломкость и склонность к старению.

Кислород образует растворимые в жидкой стали химические соединения с железом (оксид железа II FeO) и нерастворимые в стали смешанный оксид железа Fe_3O_4 и оксид железа III Fe_2O_3 .

Химические соединения кислорода с различными элементами, входящими в состав стали, — оксиды SiO_2 , Al_2O_3 и другие — являются хрупкими и при горячей обработке давлением под действием механических сил крошатся, располагаясь в виде цепочек (рис. 26, б). Эти включения могут снизить усталостную и динамическую прочность стали и служат местами концентрации напряжений и возникновения усталостных трещин. Их присутствие также ограничивают по шкале неметаллических включений в балльной системе (1, 2, 3, 4 и 5).

Азот может растворяться в жидкой стали, образовывать твердый раствор азота в железе и давать химические соединения с ним — нитриды (Fe_4N , Fe_2N). При комнатной температуре содержание азота в железе Fe_α составляет тысячные доли процента. Азот повышает хрупкость, увеличивая прочность стали и понижая ее пластичность. Кроме того, он увеличивает склонность стали к хладноломкости, синеломкости и старению.

Водород при высоких температурах растворяется в жидкой стали и диффундирует в ней в атомарном состоянии. В твердой стали водород также диффундирует в атомарном состоянии и скапливается по границам пор и неметаллических включений. Увеличиваясь в объеме при воссоединении в молекулы, водород повышает давление и создает напряженное состояние на этих участках, что может вызвать образование в них микротрещин (флокенов). При сосредоточении в малых объемах под большим давлением водород образует в затвердевшей стали пористость, газовые раковины и флокены.

Случайные примеси, попадающие в сталь из железной руды или металлического лома (скрапа) при ее выплавке, допускаются в определенных пределах: хрома 0,1–0,3 %, никеля 0,15–0,3 %, мы-

шьяка 0,08-0,15 %, меди 0,2–0,3 %. Хром и никель попадают в сталь из халиловской руды, медь – из уральской, мышьяк – из керченской. Наличие таких примесей в стали в небольших количествах заметного влияния на ее свойства не оказывает.

Зная химический состав стали можно также ориентировочно оценить ее свариваемость по так называемому углеродному эквиваленту C_3 . При этом исходят из того, что углерод в значительно большей мере ухудшает свариваемость по сравнению с другими элементами.

Углеродный эквивалент C_3 низколегированных сталей, независимо от состояния металла при их поставке (горячекатаные, нормализованные или термически упрочненные), определяют по формуле

$$C_3 = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V + Ti + Nb}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} + 15 B, \quad (2)$$

где С, Мп, Сг, Мо, V, Тi, Nb, Сu, Ni, В – содержание в данной стали соответственно углерода, марганца, хрома, молибдена, ванадия, титана, ниобия, меди, никеля и бора.

Для углеродистых сталей, а также для низколегированных кремнемарганцовых сталей марок 17ГС, 17Г1С, 09Г2С углеродный эквивалент

$$C_3 = C + Mn/6. \quad (3)$$

Присутствие в этих сталях случайных примесей (Сг, Сu, Ni) во внимание не принимают. Если свариваемость строительной стали удовлетворительная, то ее C_3 должен быть не более 0,46.

Механические свойства стали

Механическими свойствами стали называют совокупность характеристик свойств, определяющих ее способность сопротивляться воздействию на нее различных статических, динамических, знакопеременных и других нагрузок. Получают характеристики механических свойств специальными видами испытаний на стандартных образцах. Применяют обычно статические испытания на растяжение, сжатие, изгиб, твердость и динамические испытания на ударную вязкость. В ряде случаев проводят испытание на усталость при знакопеременных нагрузках.

Статическими испытаниями называют такие, при которых нагрузка на образец возрастает медленно и плавно.

Динамическими (ударными) испытаниями называют такие, при которых скорость приложения нагрузки к образцу высокая и достигается ударом, взрывом и т.д. Ударные испытания можно проводить при комнатной температуре или специально созданной отрицательной

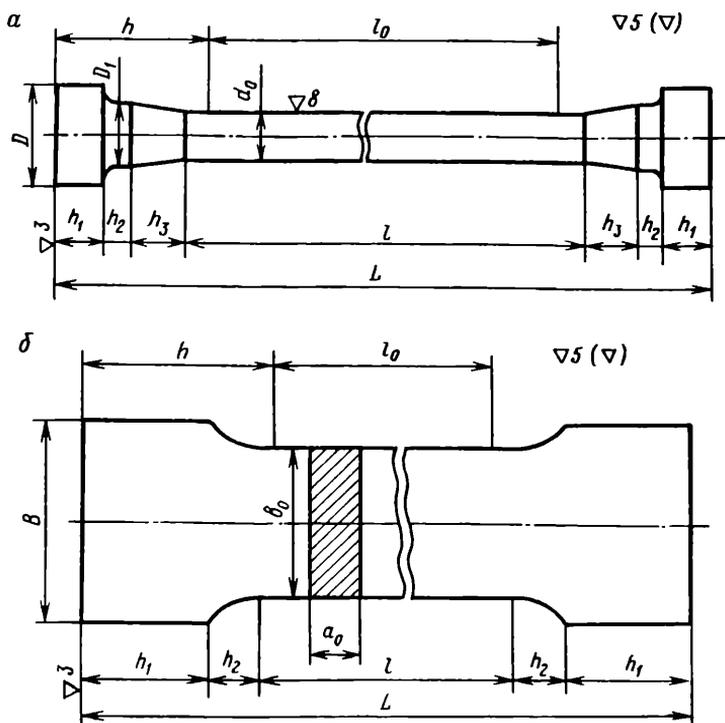


Рис. 27. Образцы для испытания типа I цилиндрический (а) и плоский пропорциональный (б):

$D, D_1, B, h, h_1, h_2, h_3$ – размеры головки образца; l – расстояние между головками; L – общая длина образца; d_0, b_0, a_0, l_0 – рабочие размеры круглого и плоского образцов

температуре для определения склонности стали к хрупкому разрушению.

Испытания на выносливость (усталость) осуществляют для определения способности стали сопротивляться многократному действию циклических знакопеременных нагрузок в течение длительного времени.

Испытание на растяжение. Стандартный цилиндрический или плоский образец (рис. 27) подвергают действию осевой растягивающей силы вплоть до разрыва. При этом происходит деформация образца – изменение его формы и размеров, т.е. изменение расстояния между точками тела образца.

В процессе испытания автоматически записывается диаграмма растяжения образца, показывающая зависимость растягивающей силы P от вызванного ею абсолютного удлинения образца вдоль его оси

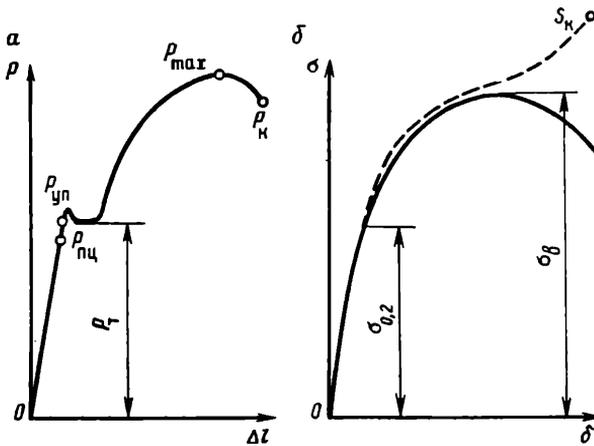


Рис. 28. Диаграмма растяжения стали с площадкой текучести (а) и без нее (б)

Δl (рис. 28, а). Диаграмму растяжения часто изображают в координатах напряжение σ – относительное удлинение δ (рис. 28, б).

Возникающие в образце условные нормальные напряжения σ определяются как отношение действующей силы P к первоначальной площади поперечного сечения F_0 образца: $\sigma = P / F_0$. Абсолютное удлинение $\Delta l = l_k - l_0$ (где l_k – конечная длина образца после разрыва; l_0 – первоначальная длина образца).

На основании диаграммы растяжения (см. рис. 28) определяют следующие характеристики свойств стали.

Предел пропорциональности $\sigma_{пц}$ – напряжение, при котором нарушается прямолинейная зависимость между нагрузкой и удлинением так, что тангенс угла наклона, образованного касательной к кривой деформации $P = f(\Delta l)$ в точке $P_{пц}$ с осью нагрузок, увеличивается на 50% от своего первоначального значения на линейном участке кривой ($\sigma_{пц} = P_{пц} / F_0$).

Предел упругости $\sigma_{уп}$ – напряжение, при котором остаточные деформации впервые достигают некоторого значения, определяемого при $P_{уп}$ для каждого материала техническими условиями. Например, остаточное удлинение составляет 0,05 % от начальной длины образца. Тогда предел упругости $\sigma_{0,05} = P_{0,05} / F_0$.

Предел текучести (физический) σ_T – наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения нагрузки P_T ($\sigma_T = P_T / F_0$). На диаграмме растяжения наблюдается площадка текучести металла.

При испытании малопластичного или хрупкого металла, при котором площадка текучести четко не наблюдается или совсем не обнару-

живается, определяют условный предел текучести. $\sigma_{0,2}$ — напряжение, при котором образец получает остаточное удлинение, равное 0,2% первоначальной длины образца ($\sigma_{0,2} = P_{0,2} / F_0$).

Временное сопротивление (предел прочности при растяжении) σ_B — напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке $P_B = P_{\max}$; предшествующей разрушению образца ($\sigma_B = P_B / F_0$).

Истинное сопротивление разрыву S_K — напряжение, определяемое отношением нагрузки P_K в момент разрыва к площади минимального поперечного сечения образца после разрыва F_K ($S_K = P_K / F_K$).

Относительное удлинение (после разрыва) δ — отношение приращения длины образца после разрыва Δl к его первоначальной длине l_0 [$\delta = \Delta l / l_0 \cdot 100 \% = (l_K - l_0) / l_0 \cdot 100 \%$]

Относительное сужение (после разрыва) ψ — отношение уменьшения площади поперечного сечения образца после разрыва ΔF к первоначальной площади F_0 его поперечного сечения ($\psi = \Delta F / F_0 \cdot 100 \%$).

Если длину образца берут в соотношении с диаметром $l_0 / d_0 = 10$, т.е. когда образец длинный, то относительное удлинение обозначают δ_{10} . При $l_0 / d_0 = 5$, когда образец короткий, относительное удлинение будет δ_5 . Относительным удлинением и сужением характеризуется пластичность стали.

Деформация образца под действием нагрузки, не превышающей предела текучести, — упругая деформация, исчезающая после снятия нагрузки.

Деформация образца под действием нагрузки, соответствующей пределу текучести или превышающей ее, — пластическая деформация, остающаяся после снятия нагрузки.

Испытание на твердость. Твердость — способность металла сопротивляться внедрению в него более твердого наконечника — индентора, находящегося под нагрузкой. В качестве индентора обычно применяют алмазные наконечники в форме пирамиды, конуса или закаленные стальные наконечники в форме шарика определенного диаметра. При внедрении твердый наконечник преодолевает вначале сопротивление металла упругим деформациям и далее — при значительном погружении в металл — сопротивление большим пластическим деформациям. Значение сопротивления деформации служит мерой твердости металла.

Самое широкое распространение получил метод Бринелля. Твердость измеряют на приборе Бринелля вдавливанием стального закаленного шарика диаметром 10,5 или 2,5 мм. Диаметр шарика и нагрузку выбирают в зависимости от толщины и твердости материала изделия. После измерения на поверхности металла остается лунка (отпечаток). Диаметр сферического отпечатка измеряют специальной лупой с делениями, а твердость металла находят по специальным таблицам. Методом Бринелля определяют твердость мягких материалов — до

450 единиц стальным шариком диаметром 10 мм. Единицу твердости обозначают индексом НВ и выражают значением нагрузки, приходящейся на 1 мм^2 поверхности сферического отпечатка, образующегося на испытуемом металле. Так как измерение твердости по методу Бриллюэля основано на сопротивлении в месте контакта значительной пластической деформации, то между числом твердости НВ и временным сопротивлением σ_B для пластичных металлов существует зависимость $\sigma_B = k \text{ НВ}$ (где $k = 0,36$ для стали).

Твердость металла методом Роквелла определяют вдавливанием алмазного конуса с углом при вершине 120° (для твердых материалов) или стального закаленного шарика диаметром 1,5875 мм (для мягких материалов). За число твердости НR принимают величину, определяемую непосредственно на индикаторной шкале прибора Роквелла (С, В и А). Единицу твердости обозначают в зависимости от нагрузки и индикаторной шкалы С, В и А прибора: НRС – внедрение алмазного конуса при нагрузке 1500 Н (на шкале С); НRВ – внедрение стального шарика при нагрузке 1000 Н (на шкале В) и НRА – внедрение алмазного конуса при нагрузке 600 Н (на шкале А).

Твердость металла и тонких покрытий до 1000 единиц определяют на приборе Виккерса алмазной четырехгранной пирамидой под нагрузкой от 10 до 1000 Н. Единицу твердости обозначают индексом НV. Она представляет собой нагрузку, приходящуюся на 1 мм^2 боковой поверхности полученного пирамидального отпечатка. Твердость определяют по диагоналям отпечатка на металле с помощью специальных таблиц.

Твердость микроскопически малых объемов металла определяют испытанием на микротвердость вдавливанием четырехгранной пирамиды под нагрузкой 0,05–5 Н по диагоналям отпечатка.

Испытание на ударную вязкость. Ударная вязкость характеризует склонность металла к хрупкому разрушению. Резкие переходы сечений в металлических конструкциях и деталях машин, поверхностные повреждения, микротрещины и другие дефекты способствуют переходу металла в хрупкое состояние. Чтобы создать в образце при испытании на ударную вязкость подобие такого рода дефектов, на нем делают концентраторы различной формы: U, V и Т (рис. 29). Ударную вязкость определяют при динамических испытаниях на ударный изгиб образцов на специальных машинах – маятниковых копрах при температуре, пониженной до 100° С и повышенной до 1000° С . Применяют образцы 20 типов, отличающихся размерами $B \times H \times L$ (B – ширина; H – высота; L – длина), высотой рабочего сечения H_1 , глубиной надреза h_1 , глубиной концентратора h и радиусом закругления концентратора R (табл. 3). При испытании образец кладут на две опоры и разрушают по середине падающим маятником. Ударную вязкость, определяемую при комнатной температуре, обозначают КС или a_n . При этом

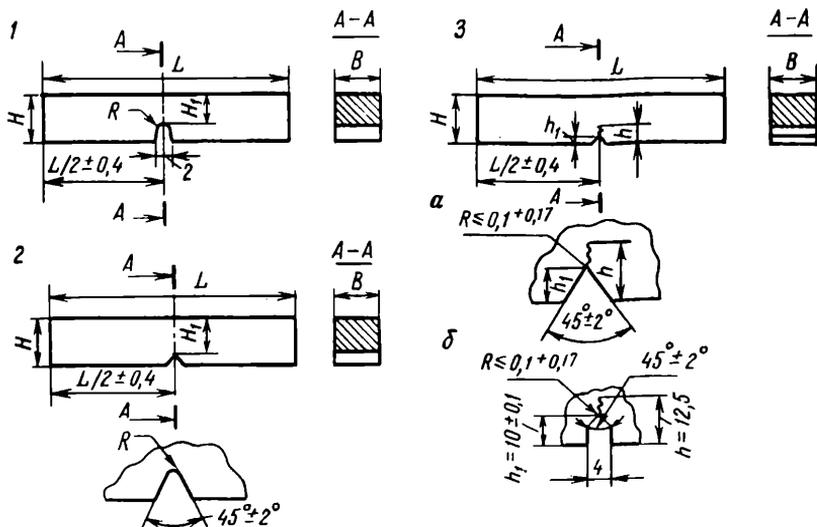


Рис. 29. Ударные образцы с концентраторами различной формы:

1 – U; 2 – V; 3 – T; а – надрез формы Т для образцов типов с 15 по 19; б – надрез формы Т для образцов типа 20

$B \times H = 10 \times 10$ мм, $L = 55$ мм и глубина концентратора равна 2 мм (см. табл. 3, тип 1).

Ударная вязкость КС представляет собой работу удара K , затраченную на разрушение образца ударом маятникового копра и отнесенную к площадке поперечного сечения образца в месте надреза S_0 :

$$КС = a_H K / S_0, \quad (4)$$

где $S_0 = H_1 B$ (см. рис. 29).

Величина K определяется как разность энергии маятника в положении его до и после удара.

В момент удара напряжения концентрируются в месте концентратора образца, в связи с этим ударная вязкость в значительной степени зависит от его формы. При концентраторе формы U ударную вязкость обозначают КСУ, при концентраторе формы V – КСВ. Концентратор формы U глубиной 2 мм имеют широко известные во всем мире ударные образцы типа Менаже и концентратор формы V глубиной 2 мм – образцы типа Шарпи. При концентраторе формы T ударную вязкость обозначают КСТ.

Таблица 3. Размеры ударных образцов различных типов

Форма концентратора	Радиус концентратора R , мм	Тип образца	Ширина B , мм	Длина $L \pm 0,6$ мм	Высота $H \pm 0,1$ мм	Глубина надреза $h_1 \pm 0,1$ мм	Глубина концентратора $h \pm 0,6$ мм	Высота рабочего сечения H_1 , мм	Область применения
U	$1 \pm 0,07$	1	$10 \pm 0,1$	55	10	—	—	$8 \pm 0,1$	При выборе и приемочном контроле металлов и сплавов
	$1 \pm 0,07$	2	$7,5 \pm 0,1$	55	10	—	—	$8 \pm 0,1$	
	$1 \pm 0,07$	3	$5 \pm 0,05$	55	10	—	—	$8 \pm 0,1$	
	$1 \pm 0,07$	4	$2 \pm 0,05$	55	8	—	—	$6 \pm 0,1$	
	$1 \pm 0,07$	5	$10 \pm 0,1$	55	10	—	—	$7 \pm 0,1$	
	$1 \pm 0,07$	6	$7,5 \pm 0,1$	55	10	—	—	$7 \pm 0,1$	
	$1 \pm 0,07$	7	$5 \pm 0,05$	55	10	—	—	$7 \pm 0,1$	
	$1 \pm 0,07$	8	$10 \pm 0,1$	55	10	—	—	$5 \pm 0,1$	
	$1 \pm 0,07$	9	$7,5 \pm 0,1$	55	10	—	—	$5 \pm 0,1$	
	$1 \pm 0,07$	10	$5 \pm 0,05$	55	10	—	—	$5 \pm 0,1$	
V	$0,25 \pm 0,025$	11	$10 \pm 0,1$	55	10	—	—	$8 \pm 0,05$	При выборе и приемочном контроле металлов и сплавов для конструкций повышенной степени надежности
	$0,25 \pm 0,025$	12	$7,5 \pm 0,1$	55	10	—	—	$8 \pm 0,05$	
	$0,25 \pm 0,025$	13	$5 \pm 0,05$	55	10	—	—	$8 \pm 0,05$	
	$0,25 \pm 0,025$	14	$2 \pm 0,05$	55	8	—	—	$6 \pm 0,05$	
Т	Трещина	15	$10 \pm 0,01$	55	11	1,5	3	—	При выборе и приемочном контроле металлов и сплавов для особо ответственных конструкций, для эксплуатации которых оценка сопротивления развитию трещины имеет первостепенное значение. При исследовании причин разрушения ответственных конструкций
		16	$7,5 \pm 0,1$	55	11	1,5	3	—	
		17	$5 \pm 0,05$	55	11	1,5	3	—	
		18	$2 \pm 0,05$	55	9	1,5	3	—	
		19	$10 \pm 0,1$	55	10	3,5	5	—	
		20	$25 \pm 0,1$	140	25	10	12,5	—	

Для получения сравнимых результатов ударные испытания для разных сталей необходимо проводить на одинаковых типах образцов (по размеру и форме концентратора) и при одинаковых температурах.

Испытание на усталость (выносливость). Нагрузки в строительных конструкциях и деталях машин во время их службы могут изменяться не только по значению, но и по знаку. Знакопеременные нагрузки вызывают в металле переменные пульсирующие напряжения, также изменяющие свои значения и знак. Эти переменные напряжения могут приводить к внезапному разрушению отдельных деталей и узлов конструкций при значениях, не превышающих предела текучести и даже ниже предела упругости, после непродолжительного срока службы.

Явление снижения прочности металла под действием знакопеременной нагрузки называют усталостью (выносливостью). Переменная нагрузка изменяется циклически, т.е. увеличивается от определенного значения, проходит через максимум и затем уменьшается до исходного значения. В дальнейшем такой цикл повторяется.

Изменение нагрузки может происходить по симметричному циклу (рис. 30,а), в котором максимальные σ_{\max} и минимальные σ_{\min} напряжения одинаковы по значению и противоположны по знаку (так что среднее напряжение равняется нулю), и несимметричному циклу (рис. 30,б), в котором среднее напряжение σ_0 отлично от нуля. Симметричные циклы наиболее распространены и наиболее опасны для металла.

При исследованиях усталостного разрушения металлов установлено, что продолжительность срока службы деталей до излома зависит от максимального значения переменного напряжения, которое связано с числом перемен циклов нагружения до разрушения. Приведенная зависимость носит название кривой усталости (рис. 31). Начиная с некоторого напряжения, кривая усталости идет параллельно оси абс-

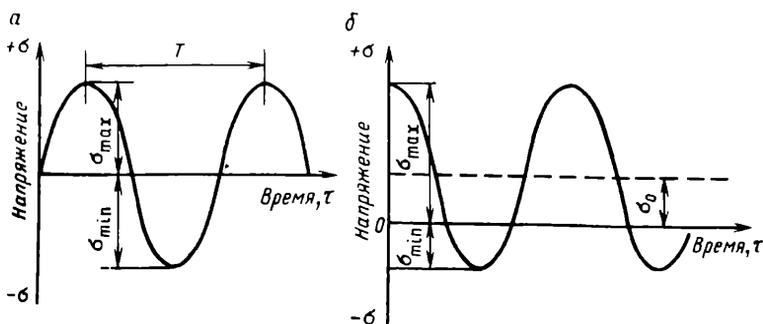


Рис. 30. Циклы нагружения при испытании на усталость:

а – симметричный; б – асимметричный; T – период изменения нагрузки (цикл)

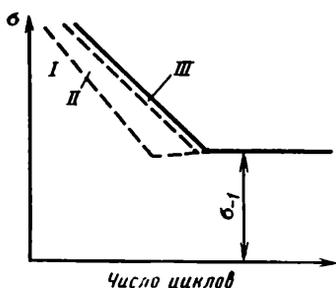


Рис. 31. Кривая усталости:

I — зона возникновения трещины; *II* — зона распространения трещины; *III* — зона разрушения

цисс. Значит, существует определенное напряжение, при котором металл не разрушается, как бы велико ни было число циклов нагружения. Это напряжение, соответствующее горизонтальному участку кривой усталости и не вызывающее разрушение при бесконечно большом числе перемен циклов (10 млн. и более), называется пределом выносливости (усталости) σ_{-1} . Разработано большое число методов испытания металлов на усталость. Для определения σ_{-1} наиболее распространен метод испытания вращающегося образца знакопеременным изгибом.

Факторы, способствующие концентрации местных напряжений (резкое изменение сечений, неоднородность металла, наличие отверстий, рисок, царапин, поверхностных напряжений), могут вызвать разрушение металла при нагрузках, значительно меньших расчетных рабочих нагрузок, повышают склонность к усталости.

Металл для строительных конструкций должен обладать высокими показателями прочности — временным сопротивлением σ_B и пределом текучести σ_T , достаточно высокой пластичностью — относительным удлинением δ , определяемыми при испытании на растяжение стандартных образцов, а также должен иметь достаточно высокую ударную вязкость $KC(a_n)$, определяемую при испытаниях на ударный изгиб стандартных образцов, и в ряде случаев высокий предел выносливости σ_{-1} .

При этом металл для ответственных конструкций должен обладать высокой степенью однородности структуры и свойств как по поперечному сечению, так и по всей длине. Однородными должны быть расчетные параметры материала — предел текучести σ_T и временное сопротивление σ_B , относительное удлинение δ и др. Если в каком-либо месте фактические показатели механических свойств будут ниже расчетных, то здесь возникает опасность нарушения плотности и прочности конструкции. В применяемых на строительстве материалах наблюдается колебание значений фактической прочности и других показателей свойств. Это учитывают при расчете конструкций параметром, называемым коэффициентом надежности по материалу k , который всегда бывает больше единицы (1,1–1,55).

Расчетное сопротивление растяжению (сжатию) R_1 и R_2 определяют соответственно по формулам

$$\begin{aligned} R_1 &= \sigma_B / k_1; \\ R_2 &= \sigma_T / k_2, \end{aligned} \quad (5)$$

где k_1 и k_2 коэффициенты надежности по материалу, назначаемые в зависимости от вида труб и упрочнения стали ($k_1 = 1,34 \div 1,55$; $k_2 = 1,1 \div 1,2$) (СНиП 2.05.06–85).

Технологические свойства

Технологическими свойствами называют способность материала подвергаться различным видам обработки в процессе изготовления из него элементов или узлов конструкций – пластической деформации (гибке, вальцовке), сварке, термической обработке и др. По этим свойствам судят о технологических возможностях изготовления из данного материала элементов (деталей или узлов) конструкций, а также о стоимости изготовления.

Одним из важных технологических свойств строительной стали является ее способность выдерживать заданную пластическую деформацию в процессе деформирования элементов конструкции: при рулонировании полотнищ корпуса резервуаров, сваренных из листов; при формировании труб большого диаметра из листовых заготовок и т.д.

Технологические свойства определяются технологическими испытаниями (пробами), при которых металл подвергают определенным деформациям под действием плавно нарастающих усилий. Подобные воздействия прилагают к металлу при его обработке или монтаже на заводе или на строительной площадке. Технологические свойства оценивают по качеству поверхности образца металла после испытания, а именно по наличию выявленных при испытании поверхностных дефектов. Известны технологические испытания листовой стали и сортового проката на изгиб, осадку, распушивание и др.

Сталь резервуаров, газгольдеров и других ответственных строительных конструкций обязательно подвергают технологическому испытанию на изгиб для определения способности металла выдерживать заданную пластическую деформацию, характеризуемую углом его изгиба, или для оценки предельной пластичности (рис. 32, *a*). Предельную пластичность оценивают с помощью угла изгиба до образования первой трещины. Длину L и толщину a образца, диаметр оправки d , диаметр опор D и расстояние между опорами l определяют по ГОСТу.

Испытание на изгиб проводят в холодном и нагретом состояниях. Для этого изготавливают специальные образцы стандартных размеров и форм. Для вырезки образцов назначают места, где возможно худшее качество металла – края листов и концы полос или прутков. Образ-

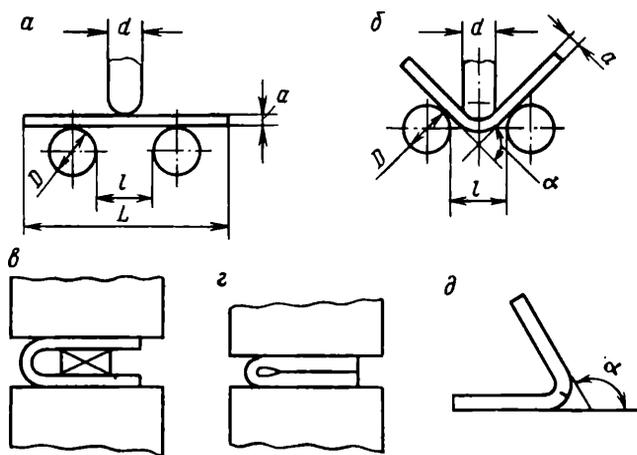


Рис. 32. Схема испытания образца на изгиб

цы на изгиб испытывают: до заданного угла изгиба α (рис. 32, б); до параллельности сторон вокруг оправки (рис. 32, в); до соприкосновения сторон образца, т.е. вплотную с образованием естественной в этом случае петли в месте изгиба (рис. 32, з); до появления первой трещины в растянутой зоне образца и с фиксацией изгиба (рис. 32, д) – предельная пластичность.

Выбор того или иного вида испытания определяется техническими условиями и стандартами на материал. Толщина оправки d также задается техническими условиями или стандартами в зависимости от толщины испытываемого металла a ($d = a$, $d = 2a$, $d = 3a$ и т.д.). Радиус закругления оправки равен половине ее толщины, а ширина оправки и опор должна быть не больше ширины образца. Для испытаний применяют прессы, специальные машины, тиски с закругленными губками, обеспечивающие плавность нарастания усилия на образец. Считают, что образец выдержал испытание, если на нем после испытания не обнаруживается трещин, надрывов или расслоений, видимых невооруженным глазом.

При испытании образца до заданного угла изгиба последний измеряют между одной стороной образца и продолжением другой без снятия нагрузки. При испытании на изгиб до появления первой трещины угол изгиба определяют после снятия нагрузки. Испытание на изгиб до параллельности сторон обычно проводят после предварительного изгиба на угол не менее 150° . Догибают образец между параллельными плоскостями с применением прокладки толщиной, равной толщине (диаметру) оправки (см. рис. 32, в). Испытание на изгиб до соприкосновения сторон осуществляют после изгиба на угол не менее

150° Далее образец догибают плавно нарастающим усилием до соприкосновения его сторон с образованием естественной петли между параллельными плоскостями (см. рис. 32,з)

Технологические испытания деталей машин проводят на осадку, расплющивание с целью определения способности к пластической деформации, необходимой, например, при ковке и штамповке. Испытание на осадку и расплющивание осуществляют в горячем и холодном состояниях. Условия испытания устанавливают в зависимости от профиля и размеров поперечного сечения изделий. В холодном состоянии образцы испытывают при начальной температуре образца 10–30 °С. Температуру испытания образцов в горячем состоянии устанавливают в стандартах на соответствующую продукцию. По цвету нагретого металла определяют температуру. При испытании на расплющивание образцы осаживают (расплющивают) при статической или динамической нагрузке до образования головки диаметром $D = (1,5 \div 1,6) d$ и высотой $h = (0,4 \div 0,5) d$ (где d – диаметр прутка или стержня). Высота выступающей из оправки части образца, подвергаемого расплющиванию, равна $1,2 d$.

12. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СТАЛИ

Склонность стали к хрупкому разрушению

Хрупкое и вязкое разрушение. Проблема наиболее опасного хрупкого разрушения стали – одна из важнейших. Она приобретает особое значение при строительстве газопроводов, резервуаров и других конструкций на Крайнем Севере и в ряде районов страны с низкими температурами, особенно в осенне-зимний период.

Исследованиями советских и зарубежных ученых установлено, что вид разрушения (хрупкое или вязкое) данной стали зависит в первую очередь от количественного соотношения действующих касательных (тангенциальных) τ и нормальных σ_n напряжений, температуры и скорости приложения нагрузки. Ибо при любых условиях нагружения усилие (нагрузка), действующее вдоль оси изделия, и соответственно напряжение σ от его воздействия можно разложить на две составляющие – касательную τ и нормальную σ_n (рис. 33) по отношению к кристаллической решетке отдельных зерен стали, по-разному ориентированных в пространстве.

Если в стали преобладают нормальные напряжения σ_n , значение которых превышает допустимое, то происходит хрупкое разрушение стали путем отрыва, практически без наличия пластической деформации (рис. 34). Сопротивление металла хрупкому разрушению называют сопротивлением отрыву $S_{отр}$. Если в стали преобладают касательные напряжения τ и их значение также превышает допустимое, то происхо-

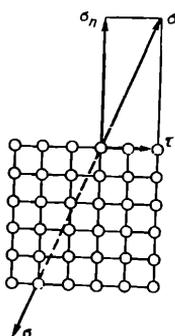


Рис. 33. Схема действия сил на кристаллическую решетку стали

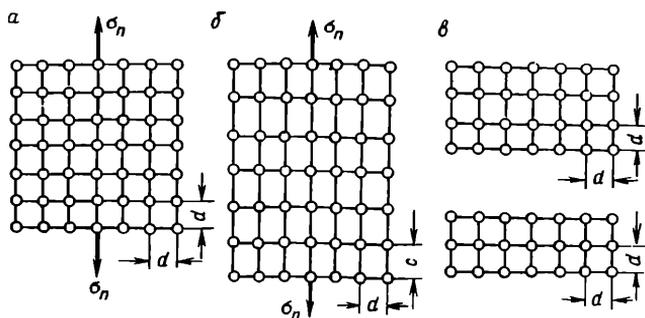


Рис. 34. Схема хрупкого разрушения металла под действием нормальных напряжений σ_n :

a – первоначальная кристаллическая решетка; *б* – кристаллическая решетка при упругой деформации; *в* – хрупкий отрыв (разрушение) кристаллической решетки; *d* и *c* – параметры кристаллической решетки

дит вязкое разрушение стали путем сдвига (среза) при наличии значительной предшествующей разрушению пластической деформации (рис. 35). Сопротивление металла вязкому разрушению называют сопротивлением сдвигу $S_{сдв}$.

Хрупкое разрушение происходит путем отрыва по границам и внутри зерен, причем плоскости разрушения располагаются перпендику-

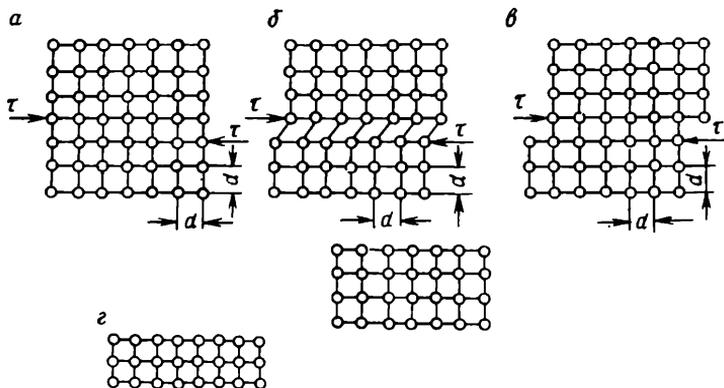


Рис. 35. Схема вязкого разрушения металла под действием касательных напряжений τ :

a – первоначальная кристаллическая решетка; *б* – кристаллическая решетка при упругой деформации; *в* – кристаллическая решетка при пластической деформации (сдвиг); *z* – вязкое разрушение (срез) кристаллической решетки

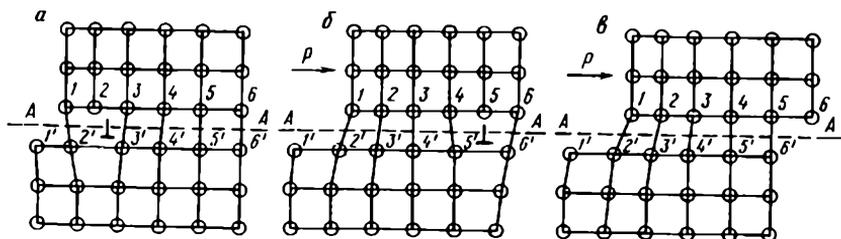


Рис. 36. Дислокационная схема пластической деформации:

a – первоначальная кристаллическая решетка с наличием дислокации; *б* – кристаллическая решетка после перемещения дислокации при пластической деформации; *в* – кристаллическая решетка после выхода дислокации на поверхность при пластической деформации; *A-A* – плоскость скольжения; 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 1', 2', 3', 4', 5', 6' – ближайшие атомы-соседи, вдоль плоскости скольжения, меняющие свое положение при движении дислокации; *P* – действующая сила

лярно к линии действия сил и имеют блестящий кристаллический излом. Вязкое разрушение происходит путем сдвига (среза) одной части зерен металла относительно другой, плоскости разрушения располагаются примерно под углом 45° по отношению к линии действия сил и имеют матовый волокнистый излом.

В соответствии с теорией дислокаций механизм пластического сдвига рассматривают как процесс перемещения, например, линейных дислокаций (несовершенств кристаллического строения металла) вдоль плоскости скольжения (рис. 36). При наличии в исходном металле дислокаций для осуществления пластической деформации потребуются значительно меньшие усилия. Таким образом, реальная прочность металла благодаря наличию дислокаций и других искажений кристаллической решетки всегда меньше теоретической. Вместе с тем исследованиями показано, что реальная прочность металла уменьшается с увеличением плотности дислокаций до определенного предела (рис. 37). Достигнув минимального значения при некоторой критической плотности дислокаций, реальная прочность металла вновь начинает повышаться, так как в металле возникают как параллельные дислокации, так и дислокации в разных плоскостях и направлениях. Тогда дислокации будут мешать друг другу перемещаться, т.е. в элементарный акт пластической деформации будет вовлекаться одновременно все большее число атомов, и реальная прочность металла повысится. Поэтому любой способ обработки металла, вызывающий увеличение плотности дислокаций и препятствий для их перемещения, приводит к повышению его прочности. Такими способами металла упрочнения, ведущими к увеличению полезной плотности дислокаций, являются механический наклеп, термическая обработка и др.

Известно, что все методы упрочнения металла ведут одновременно

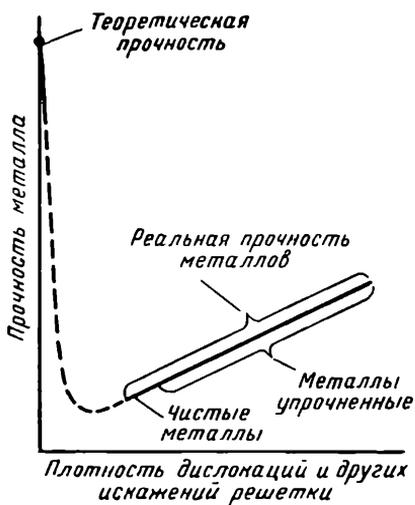


Рис. 37. Схема прочности кристалла в зависимости от искажений решетки (по И.А. Одинг и А.А. Бочвару)

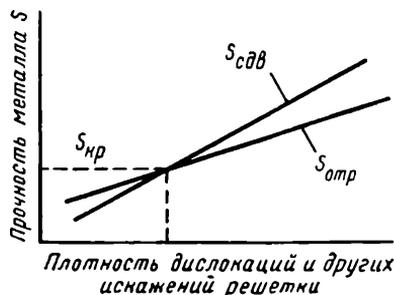


Рис. 38. Зависимость сопротивлений сдвигу и отрыву стали от плотности дислокаций

к понижению запаса его пластичности и вязкости. Это объясняется тем, что при упрочнении металла происходит увеличение плотности дислокаций, несовершенств и других дефектов кристаллической решетки, которые повышают сопротивление металла пластическому сдвигу относительно быстрее, чем сопротивление отрыву (рис. 38). При относительно малых степенях упрочнения металла ($S_{сдв} < S_{отр}$) будет происходить вязкое его разрушение после предшествующей деформации. Такой металл характеризуется высокими пластичностью и вязкостью. При значительных степенях упрочнения, когда плотность дислокаций выше критической ($S_{сдв} > S_{отр}$), происходит хрупкое разрушение металла без видимой предварительной пластической деформации. Такой металл обладает низким запасом пластических и вязких свойств. Следовательно, применяя тот или иной метод упрочнения металла, нельзя допускать, чтобы степень упрочнения превосходила критическое значение $S_{кр}$, соответствующее точке пересечения прямых $S_{сдв}$ и $S_{отр}$ (см. рис. 38), иначе металл не проявит способности к пластической деформации и произойдет хрупкое его разрушение.

В связи с этим условие хрупкого разрушения металла можно представить в следующем виде:

$$\tau / \sigma_n < S_{сдв} / S_{отр}, \quad (6)$$

Если

$$\tau / \sigma_n > S_{\text{сдв}} / S_{\text{отр}}, \quad (7)$$

то происходит вязкое разрушение стали.

Таким образом, сталь будет разрушаться хрупко, если в ней действуют в основном нормальные напряжения σ_n (доля касательных напряжений мала и отношение τ / σ_n будет небольшим), а отношение $S_{\text{сдв}} / S_{\text{отр}}$ будет больше τ / σ_n . Это значит, что у стали велико сопротивление сдвигу $S_{\text{сдв}}$ (сталь имеет низкую пластичность) и малое сопротивление отрыву $S_{\text{отр}}$ (см. рис. 38).

Чем большим сопротивлением сдвигу обладает сталь, тем меньше ее способность к пластической деформации и тем больше ее склонность в связи с этим к хрупкому разрушению. И, наоборот, чем меньше сопротивление сдвигу, тем легче осуществляется деформирование стали и меньше ее склонность к хрупкому разрушению.

Факторы, влияющие на склонность стали к хрупкому разрушению. Склонность стали к хрупкому разрушению зависит от ряда факторов:

металлургических (способ выплавки, степень раскисления, режим обработки давлением, влияющие на химический состав, структуру и свойства стали, наличие в ней дефектов металлургического характера);

технологических (способ монтажа резервуаров, газгольдеров и других конструкций, влияющих на состояние поверхности изделий, образование на ней различных дефектов, а также на наличие различных по значению, знаку и характеру остаточных напряжений, вызванных холодной деформацией, например, при рулонировании листовых заготовок резервуаров, формировании труб большого диаметра, термической обработке, сварке и т.д.);

конструктивных [размеры конструкций (масштабный фактор), наличие сопряженных элементов, стыков металла разных толщины и диаметров и других факторов, увеличивающих напряженное состояние в них];

рабочих условий эксплуатации (значение и характер напряженного состояния конструкций, скорость нагружения, коррозионная активность рабочего продукта и его температура, а также температура окружающей среды).

Все эти факторы, предопределяя значение соотношения напряжений в стали, характеризуют склонность ее к хрупкому разрушению. Но для того чтобы произошло хрупкое разрушение стали согласно условию (6), в ней должно под влиянием тех или иных причин произойти перераспределение внутренних напряжений (в условиях действующих нагрузок при наличии концентраторов напряжений), приводящее к уменьшению доли касательных напряжений и возрастанию доли нор-

мальных напряжений, вызывающих хрупкое разрушение стали. Такими причинами, влияющими на изменение напряженного состояния стали, являются понижение температуры окружающего воздуха, повышение скорости нагружения (например, удар или внезапное повышение давления в трубопроводе), что может привести к хрупкому разрушению, особенно при наличии концентраторов напряжений.

С понижением температуры эксплуатации или температуры монтажа у пластичных металлов и сплавов, имеющих в своей тонкой структуре кристаллическую решетку в виде объемно центрированного куба, происходит резкое ухудшение механических свойств, называемое явлением хладноломкости: прочностные показатели свойств (предел текучести, временное сопротивление) возрастают, пластические свойства (относительное удлинение, поперечное сужение) снижаются, и особенно резко падает ударная вязкость (даже до нуля). Температура, при которой происходит резкое изменение механических свойств, называется критической температурой хрупкости или порогом хладноломкости.

Скорость нагружения влияет на склонность стали к хрупкому разрушению аналогично действию отрицательных температур. С увеличением скорости приложения нагрузки может произойти разрушение металла путем отрыва под действием нормальных напряжений раньше, чем под действием касательных напряжений произойдет пластическая деформация. Опасность хрупкого разрушения зависит от значения и характера напряженного состояния металла.

Резервуары и другие строительные конструкции имеют сложную конфигурацию и напряжения в них распределяются не равномерно, а концентрируются в местах перехода сечений, наличия дефектов металла, неметаллических включений и др. Так, гладкий лист или труба всегда имеют на поверхности какие-либо неровности и шероховатости, которые также являются концентраторами напряжений (рис. 39).

При низких температурах происходит перераспределение напряжений и резкое увеличение их в местах расположения концентраторов напряжений. Напряженное состояние характеризуется высоким $S_{сдв}$ и малым значением отношения τ / σ_n , т.е. доля касательных напряжений уменьшается и возможность хрупкого разрушения возрастает.

Во избежание этого сталь для строительных конструкций не должна быть чувствительной к надрезам, рискам, царапинам и другим поверхностным и внутренним дефектам строительного и металлургического характера и должна обладать высокой пластичностью.

Сталь, менее загрязненная различными примесями, обладает меньшей склонностью к хрупкому разрушению, например спокойная хорошо раскаленная сталь по сравнению с кипящей.

Химические элементы, входящие в состав стали, по влиянию на

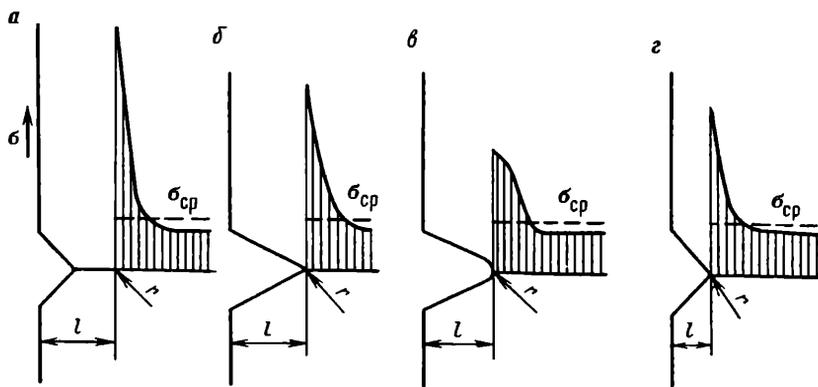


Рис. 39. Концентрация напряжений в устье дефекта стального изделия с различными концентраторами напряжений:

а – трещина; *б, г* – острый надрез разной глубины; *в* – скругленный надрез; *l* – глубина дефекта; *r* – радиус закругления в вершине дефекта; $\sigma_{\text{ср}}$ – среднее напряжение эпюры напряжений по сечению изделия

склонность стали к хрупкому разрушению и хладноломкости делятся на три группы:

безусловно повышающие склонность к хладноломкости и к хрупкому разрушению – углерод, водород, кислород, фосфор и сера;

оказывающие двойное влияние на сталь – марганец, кремний, алюминий, хром, молибден, вольфрам, ванадий – до определенного содержания не повышают, а сверх этого предела повышают склонность стали к хрупкому разрушению;

безусловно понижающие склонность к хладноломкости и хрупкому разрушению – никель.

Внутреннее строение стали, зависящее от режима горячей обработки давлением, термической обработки, степени пластической деформации (наклепа), наличия и равномерности распределения неметаллических включений и других дефектов, также характеризует ее склонность к хрупкому разрушению.

Крупнозернистая сталь обладает большей хрупкостью по сравнению с мелкозернистой.

Склонность к хрупкому разрушению увеличивают:

старение вследствие распада пересыщенного твердого раствора и выпадения мельчайших частиц (оксидов, нитридов);

наклеп вследствие снижения пластичности и вязкости стали;

анизотропия свойств в различных кристаллографических направлениях и скопления неметаллических включений в стали;

повышение размеров строительных конструкций, толщины их элементов, т.е. масштабный фактор. С увеличением размеров строительных конструкций температура хрупкости стали смещается в область положительных температур.

Методы оценки хрупкости стали. Оценку склонности стали к хрупкому разрушению по ударной вязкости обычно осуществляют на образцах с концентратором U типа Менаже с проведением серии их испытания при различных температурах. На основании испытаний для каждого образца определяют значение ударной вязкости и процент волокна (В) в его изломе. Как указывалось выше, при хрупком разрушении плоскости разрушения имеют кристаллический блестящий излом, а при вязком – матовый волокнистый. Затем строят графики (рис.40.). Принимая 50 %-ную волокнистость за критическую величину, определяют порог хладноломкости – критическую температуру хрупкости T_{50} при $B = 50\%$. Затем на другом графике по T_{50} находят минимально допустимую ударную вязкость KCU_{50} при $B = 50\%$. Для надежной эксплуатации стали ее ударная вязкость должна быть не менее KCU_{50} . $T_H - T_B$ – температурный интервал перехода стали из области хрупкого в область вязкого разрушения. В технических условиях на поставку стали обычно указывают минимально допустимую ударную вязкость KCU при определенной температуре.

Оценка склонности стали к хрупкому разрушению по составляющим ударной вязкости основана на том, что разрушение металла происходит обычно в две стадии: зарождение трещины и ее развитие (распространение) При этом на его разрушение затрачивается определенная работа K .

Общая ударная вязкость KC или работа разрушения K не позволяет отразить сопротивление стали зарождению и распространению трещины. При эксплуатации различных стальных конструкций известно много случаев, когда происходило их разрушение, хотя сталь имела допустимую ударную вязкость.

Поэтому для более правильной оценки склонности стали к хрупкому разрушению в настоящее время принято разлагать ударную вязкость на составляющие:

работу, затрачиваемую на распространение трещины (KC_p или K_p), которая характеризует сопротивление металла зарождению трещины,

работу, затрачиваемую на зарождение трещины (KC_3 или K_3), которая характеризует сопротивление металла распространению трещины.

Существует несколько методов определения составляющих ударной вязкости, основанных на статических (метод Б.А. Дроздовского) и динамических испытаниях (методы Отани, А.С. Лившица и А.С. Рахманова, А.П. Гуляева, О.П. Бакши, А.Н. Моношкова и др.).

Наибольшее применение нашел метод Отани (Япония) разделения

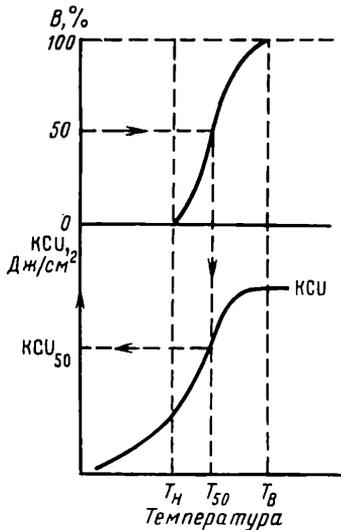


Рис. 40. Графики зависимости процента волокна B в изломе и ударной вязкости $КСУ'$ стали от температуры испытания T

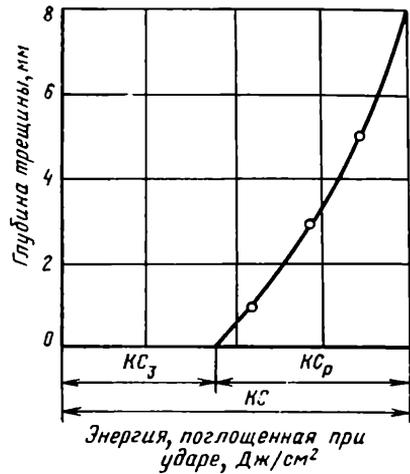


Рис. 41. Разделение ударной вязкости на составляющие методом Отани

ударной вязкости на составляющие при помощи двойного удара (рис. 41). Серию образцов (например, типа I) испытывают на ударный изгиб при различном запасе энергии удара, достаточном для образования трещины в основании концентратора. Далее образцы травят в щелочном растворе двуххлорной меди для выявления трещины. Затем образцы повторно подвергают воздействию удара (разрушают) при стандартном значении энергии удара, после чего на каждом из них в изломе определяют глубину трещины. На основании данных испытаний строят график зависимости глубины трещины от поглощенной энергии. Работу распространения и работу зарождения трещины определяют, продолжив кривую до пересечения с осью абсцисс (см. рис. 41). Установленное таким образом нулевое значение глубины трещины служит критерием, характеризующим переход в стали от стадии зарождения к стадии распространения трещины.

Б.А. Дроздовский и Я.Б. Фридман предложили проводить динамическое испытание на ударный изгиб с искусственно зарожденной усталостной трещиной. Трещина зарождается до заданной глубины (1 мм), начиная от дна надреза, на специальном вибраторе. Испытание таких образцов дает возможность непосредственно определить работу распространения трещины $КС_p$ или $КС_{т.у}$ (где индекс "т.у." – трещина усталостная).

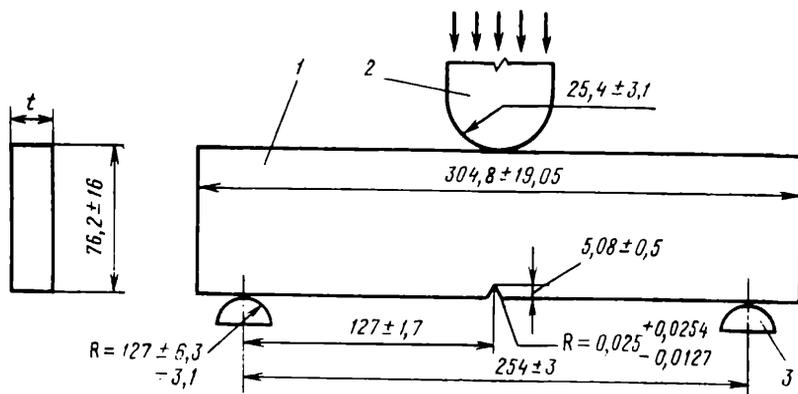


Рис. 42. Схема испытания образца ДВТТ:

1 – образец; 2 – пуансон; 3 – опоры; t – толщина образца; R – радиус закругления в вершине концентратора

В Советском Союзе и за рубежом разрабатывают новые методы оценки сопротивления металлов хрупкому разрушению, так как существующие подходы к оценке прочности крупногабаритных металлических конструкций с использованием данных, полученных на стандартных небольших образцах, оказываются недостаточными. Стали, которые при обычных лабораторных испытаниях обнаруживают достаточную пластичность, в процессе эксплуатации конструкции часто дают хрупкое разрушение.

Оценка склонности стали к хрупкому разрушению по проценту волокна в изломе нашла применение для трубных сталей. Для этого проводят ударные испытания на специальных полнотолщинных образцах Баттеля (*DWTT* или ДВТТ) (рис. 42), которые вырезают из труб. Центральную часть образца (минимум по 25 мм по обе стороны от надреза) не выпрямляют, сохраняя радиус кривизны трубы, чтобы не исказить результаты испытания. Образцы подвергают испытанию на ударный изгиб при разных температурах и определяют по проценту волокна в изломе, температуру перехода стали в хрупкое состояние. Эту температуру принимают минимально допустимой температурой эксплуатации трубопровода.

Оценку склонности стали к хрупкому разрушению на натуральных образцах проводят с рассмотрением процесса разрушения стали с позиций линейной механики разрушения и с учетом поправок на специфические особенности работы данного материала в конструкции. Такая методика исследований разработана, например, М.П. Анучкиным, Н.И. Аненковым, А.С. Болотовым и другими во ВНИИСТе и ВНИИГАЗе применительно к условиям эксплуатации трубопроводов.

За критерий оценки сопротивления материала разрушению принят коэффициент интенсивности напряжений. Известны и другие направления исследований, в которых для оценки сопротивления материала разрушению приняты другие критерии. Эти методы отличаются большой сложностью выполнения по сравнению с лабораторными, а также разнообразием специфических особенностей эксперимента применительно к определенным условиям монтажа и эксплуатации металлических конструкций.

Склонность стали к старению

Старение – явление, наблюдающееся в стали с течением длительного времени и выражающееся в ухудшении механических свойств: предел текучести и временное сопротивление повышаются при снижении пластичности и ударной вязкости.

Старению стали способствуют загрязнение ее примесями и неодинаковые размеры зерен. Явление старения объясняется выделением посторонних примесей, вошедших в твердый раствор с железом: азота (главным образом), кислорода, фосфора и углерода. Частицы нитридов (соединения железа с азотом), цементита и других соединений, выделяющиеся с течением времени из твердого раствора, проникают в кристаллические зерна, препятствуют внутрикристаллическим сдвигам и тем самым повышают прочность, а также снижают пластичность и вязкость стали. Сдвиги в кристаллических зернах, образующиеся при холодной деформации, облегчают выделение частиц из твердого раствора, поэтому старение особенно интенсивно развивается после наклепа. Вибрационная нагрузка тоже способствует старению. Нагрев деформированного в холодном состоянии металла (после наклепа) до температуры 100–250 °С ускоряет процесс старения. Введение присадок, связывающих азот и углерод, снижает эффект старения. Для связывания углерода применяют титан или ванадий, а для связывания азота – алюминий, цирконий или титан.

Для определения склонности стали к старению используют метод механического старения. Он основан на измерении изменения ударной вязкости стали, подвергнутой старению при холодной пластической деформации и нагреву (механическое старение), по сравнению с ударной вязкостью в исходном состоянии. При испытании из исходного металла (проката) вырезают пластины (полосы) стандартного размера. Далее полосы подвергают деформации растяжением (а при необходимости сжатием) до получения остаточного удлинения, составляющего 10 % от первоначальной длины образца. После деформации из полос вырезают образцы типа 1 (типа Менаже) с концентратором U для ударных испытаний, которые подвергают равномерному нагреву (искусственное старение) до температуры 250 °С, выдерживают в течение 1 ч и охлаждают на воздухе. Затем определяют ударную вязкость после механического старения.

При температуре 250–400 °С (синее каление) в углеродистых и некоторых низколегированных сталях может происходить явление, выражающееся аналогично старению в повышении прочности, понижении пластичности и падении ударной вязкости. Это явление получило название синеломкости стали. Деформирование стали при температурах, вызывающих появление характерного синего цвета, недопустимо, так как в этом состоянии сталь делается особенно хрупкой. Синеломкость стали тем больше, чем выше содержание фосфора и прочих вредных примесей, т.е. синеломкость – явление того же типа, что и старение. Склонность стали к синеломкости определяют испытанием на ударную вязкость образцов, подогретых до температуры 250–400 °С.

Наклеп и рекристаллизация

Наклеп. Рассмотрим процессы деформации, протекающие в металле при действии, например, растягивающих напряжений. Начальные деформации Δl всегда упругие, их значение находится в прямой зависимости от напряжения. На рис. 43 упругая деформация характеризуется кривой AO и ее продолжением (пунктир). Выше точки предела упругости A напряжение вызывает не упругую, а остаточную пластическую деформацию. Если нагрузка превысила условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ и вызвала напряжение σ_1 , то после разгрузки в металле остается пластическая деформация, равная величине a (остаточное удлинение). При нагружении металла вновь его способность к пластической деформации уменьшается на величину a , а предел текучести увеличивается и будет равен σ_1 , т.е. потребуются большие напряжения, чтобы вызвать новую пластическую деформацию. Упрочнение металла под действием холодной пластической деформации называется наклепом, или нагартовкой. Дальнейшее нагружение выше σ_1 приведет к появлению новой остаточной пластической деформации и повышению предела текучести и т.д., пока металл не потеряет способность пластически деформироваться (образовывать сдвиги в кристаллах). Тогда дальнейшее увеличение напряжения вызовет разрушение металла.

Упрочнение металла при холодной пластической деформации происходит в результате искажения кристаллической решетки, увеличения плотности дислокаций и сдвигов одной части кристалла по отношению к другой по дислокационной схеме (см. рис. 36). При сдвигах делятся на части блоки кристаллической решетки внутри зерен (дробятся блоки мозаики), зерна становятся вытянутыми, ориентированными в направлении деформации. Чем больше была степень пластической деформации, тем более высокое сопротивление будет оказывать металл при воздействии на него внешних сил, тем выше будут его предел текучести, предел прочности и твердость при одновременном снижении пластичности и вязкости (рис. 44).

Рекристаллизация – явление укрупнения зерен микроструктуры

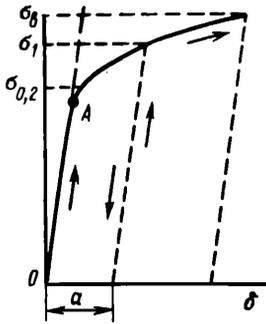
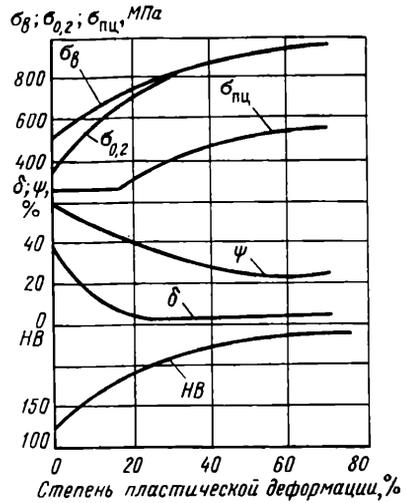


Рис. 43. График зависимости растягивающих напряжений σ стали от вызываемой ими деформации δ при последовательном нагружении и разгрузке

Рис. 44. График изменения механических свойств стали с содержанием 0,27 % углерода в зависимости от степени пластической деформации:

$\sigma_{в}$ — временное сопротивление, $\sigma_{0,2}$ — предел текучести; $\sigma_{пц}$ — предел пропорциональности, δ — относительное удлинение; ψ — относительное поперечное сужение; HB — твердость по Бринеллю



при нагреве стали после наклепа. После пластической деформации металл находится в неустойчивом состоянии из-за искажения его кристаллической структуры. Поэтому в нем самопроизвольно должны произойти явления, возвращающие металл в структурно более устойчивое состояние с течением времени. Нагрев наклепанного металла приводит к ускорению протекания этих процессов.

При небольшом нагреве (для железа температура 300–400 °С) происходит снятие искаженной решетки в результате незначительного перемещения атомов. Этот процесс называется возвратом или отдыхом металла. Причем твердость и прочность металла несколько понижаются (на 20–30 %), а пластичность возрастает, но изменения микроструктуры не происходит. При более высоком нагреве атомы металла приобретают

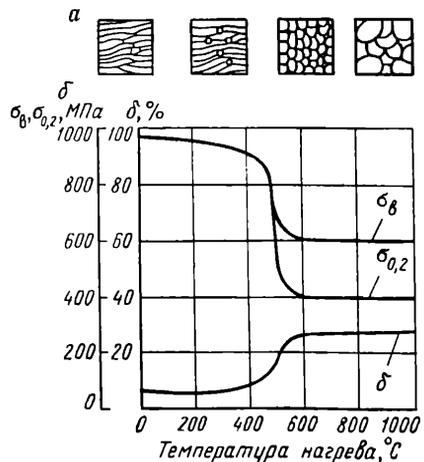


Рис. 45. График изменения микроструктуры (а) и механических свойств стали (б) при нагреве металла после наклепа

способность к значительным перемещениям, что приводит уже к резкому изменению его микроструктуры (рост зерен) и механических свойств (рис. 45). Минимальная температура, при которой резко начинают изменяться микроструктура и свойства пластически деформированного металла, называется температурой рекристаллизации.

Процесс рекристаллизации протекает в два этапа:

первичная рекристаллизация при минимальной температуре, когда мелкие зерна, вытянутые вследствие пластической деформации, превращаются в беспорядочно ориентированные зерна округлой формы;

вторичная (собирательная) рекристаллизация при более высокой температуре, заключающаяся в увеличении размеров отдельных зерен за счет мелких.

Окончательный размер кристаллов зависит не только от температуры процесса, времени выдержки, но и степени деформации.

Для изготовления газонефтепроводов, резервуаров, газгольдеров и других строительных конструкций сталь поступает в основном в горячекатаном состоянии и всегда имеет в той или иной степени следы остаточной пластической деформации. Далее этот металл подвергают холодной деформации методами вальцевания, рулонирования и другими при изготовлении заготовок шаровых и цилиндрических резервуаров; методами вытяжки, волочения или обжатия при изготовлении арматурной стали и т.д. При этом неизбежно происходит изменение структуры и свойств вследствие механической деформации.

С учетом явлений наклепа и рекристаллизации в производстве заготовок для резервуаров и других строительных конструкций регламентируют, например, допускаемые радиусы изгиба в зависимости от размеров изготавливаемых изделий, а также ограничивают степень полосчатости стали, поставляемой с металлургических заводов, контролируют размеры зерна в зоне термического влияния сварных швов конструкций по шкале микроструктур и т.д.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. По каким признакам классифицируют сталь для строительных конструкций?
2. Что такое кипящая, спокойная и полуспокойная сталь?
3. По каким признакам характеризуется качество стали? На какие виды делится сталь по качеству?
4. Какие неметаллические включения присутствуют в стали и как оценивается их наличие?
5. Дать понятие об углеродистой стали. На какие виды подразделяют ее в зависимости от содержания углерода?
6. Дать понятие о легированной стали. На какие виды подразделяют ее в зависимости от количества легирующих элементов?
7. Что характеризуют механические свойства стали? Дайте понятие о показателях прочности, твердости, пластичности, ударной вязкости, усталости?

8. Что характеризуют технологические свойства? Какими видами испытаний их определяют?

9. Что такое наклеп? Его влияние на структуру и свойства стали?

10. Что такое рекристаллизация стали? Как изменяется структура и свойства стали на различных стадиях рекристаллизации?

11. Дать понятие о хрупком и вязком разрушении стали.

12. Что такое сопротивление стали хрупкому и вязкому разрушению? Дать математическое выражение оценки хрупкого и вязкого разрушения.

13. Какие факторы влияют на склонность стали к хрупкому разрушению?

14. Какие методы оценки склонности стали к хрупкому разрушению Вы знаете? Их особенности и применение?

15. Что такое старение стали? Какой применяют метод оценки склонности стали к старению?

Глава 3

ВИДЫ СТАЛЕЙ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ДЕТАЛЕЙ СТРОИТЕЛЬНО-МОНТАЖНЫХ МАШИН

13. УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ

Сталь углеродистую обыкновенного качества поставляют в горячекатаном состоянии в виде листов, полос, а также фасонного и сортового проката, главным образом для строительных конструкций.

В зависимости от назначения и гарантируемых характеристик сталь подразделяют на три группы:

А, поставляемая по механическим свойствам (табл. 4) и применяемая для несварных нагруженных деталей машин и конструкций;

Б, поставляемая по химическому составу (табл. 5) и предназначенная для термически обрабатываемых, кованных, сварных и других ответственных деталей машин и конструкций;

В, поставляемая по механическим свойствам и химическому составу и применяемая для сварных ответственных строительных конструкций.

В каждую из этих групп входят определенные марки стали. Сталь маркируют буквами Ст и условными номерами 1, 2, 3 и т. д. Сталь групп Б и В обозначают дополнительно этими буквами. Сталь группы А имеет марки Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, Ст5, Ст6; группы Б – БСт0, БСт1, БСт2, БСт3, БСт4, БСт5, БСт6 и группы В – ВСт1, ВСт2, ВСт3, ВСт4, ВСт5.

Чем больше номер марки, тем выше прочность, но ниже пластичность стали. Исключением являются марки Ст0 и БСт0, которые соответствуют наиболее загрязненной примесями (P, S и др.) стали с содержанием до 0,23 % С (некондиционная сталь). Например, сталь марки Ст1сп имеет временное сопротивление $\sigma_B = 320 \div 420$ МПа, относи-

Таблица 4

Механические свойства при растяжении и условия на изгиб в холодном состоянии углеродистой стали обыкновенного качества

Марка стали	Временное сопротивление σ_B , МПа	Предел текучести σ_T (в МПа) для толщины, мм				Относительное удлинение δ_5 (%) для толщины, мм			Изгиб на угол 180° для толщины до 20 мм
		до 20	20-40	40-100	>100	до 20	20-40	>40	
Ст0	Не менее 310	—	—	—	—	23	22	20	$d = 2a$
Ст1 кп	310-400	—	—	—	—	35	34	32	$d = 0$
Ст1 пс, Ст1 сп	320-420	—	—	—	—	34	33	31	$d = 0$
Ст2 кп	330-420	220	210	200	190	33	32	30	$d = 0$
Ст2 пс, Ст2 сп	340-440	230	220	210	200	32	31	29	$d = 0$
Ст3 кп	370-470	240	230	220	200	27	26	24	$d = 0,5a$
Ст3 пс, Ст3 сп	380-490	250	240	230	210	26	25	23	$d = 0,5a$
Ст3 Гпс	380-500	250	240	230	210	26	25	23	$d = 0,5a$
Ст4 кп	410-520	260	250	240	230	25	24	22	$d = 2a$
Ст4 пс, Ст4 сп	420-540	270	260	250	240	24	23	21	$d = 2a$
Ст5 пс, Ст5 сп	500-640	290	280	270	260	20	19	17	$d = 3a$
Ст5 Гпс	460-600	290	280	270	260	20	19	17	$d = 3a$
Ст6 пс, Ст6 сп	Не менее 600	320	310	300	300	15	14	12	—

Примечание. d – диаметр оправки; a – толщина образца.

Таблица 5

Химический состав углеродистой стали обыкновенного качества, % не более

Марка стали	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	As
БСт0	<0,23	—	—	0,07	0,06	—	—	—	—
БСт1кп	0,06-0,12	0,25-0,5	<0,05	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
БСт1пс	0,06-0,12	0,25-0,5	0,05-0,17	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
БСт1сп	0,06-0,12	0,25-0,5	0,12-0,3	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
БСт2кп	0,09-0,15	0,25-0,5	<0,07	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
БСт2пс	0,09-0,15	0,25-0,5	0,05-0,17	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
БСт2сп	0,09-0,15	0,25-0,5	0,12-0,3	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
БСт3кп	0,14-0,22	0,3-0,6	<0,07	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
БСт3пс	0,14-0,22	0,4-0,65	0,05-0,17	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
БСт3сп	0,14-0,22	0,4-0,65	0,12-0,3	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
БСт3Гпс	0,14-0,22	0,8-1,1	<0,15	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
БСт4кп	0,18-0,27	0,4-0,7	<0,07	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
БСт4пс	0,18-0,27	0,4-0,7	0,05-0,17	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
БСт4сп	0,18-0,27	0,4-0,7	0,12-0,30	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
БСт5пс	0,28-0,37	0,5-0,8	0,05-0,17	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
БСт5сп	0,28-0,37	0,5-0,8	0,15-0,35	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
БСт5Гпс	0,22-0,3	0,8-1,2	<0,15	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
БСт6пс	0,38-0,49	0,5-0,8	0,05-0,17	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
БСт6сп	0,38-0,49	0,5-0,8	0,15-0,35	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08

тельное удлинение $\delta_5 = 34\%$; сталь марки Ст6сп – $\sigma_B = 600$ МПа и $\delta_5 = 15 \%$, т. е. характеристики свойств повышаются почти в два раза с 1 по 6 марку стали.

Сталь бывает спокойной, полуспокойной и кипящей, поэтому в марки добавляют соответственно индексы: сп, пс и кп. Кипящую сталь изготовляют только с 1 по 4 марку всех групп, например, Ст1кп, ВСт4кп и другие; полуспокойная и спокойная сталь – любой марки.

В зависимости от числа гарантируемых характеристик сталь поставляют по категориям 1, 2 и т. д.

Сталь группы А имеет три категории: 1 – гарантируются σ_B и δ ; 2 – то же и испытание на изгиб; 3 – то же и предел текучести σ_T . В марке стали указывают номера категорий – 2 и 3 (Ст3сп2, Ст3сп3) и не указывают номер категории 1 (Ст3сп, Ст2кп). Химический состав стали группы А отмечают в сертификате (паспорте) на сталь, но не гарантируют.

Сталь группы Б поставляют по двум категориям: 1 – гарантируется содержание углерода, марганца, кремния, серы, фосфора, мышьяка; 2 – то же и содержание случайных примесей (медь, хром, никель). Чем больше номер марки стали, тем выше в ней содержание углерода. Например, БСт1сп содержит 0,06-0,12 % С, а БСт6сп – 0,38-0,49 % С.

Сталь группы В поставляют по шести категориям: 1 – гарантируются химический состав, механические свойства σ_B и δ и испытание на изгиб; 2 – то же и предел текучести σ_T ; 3 – то же и ударная вязкость (табл. 6) при температуре $+20$ °С (КСУ $_{+20}$); 4 – то же, но вместо КСУ $_{+20}$ гарантируется ударная вязкость КСУ при температуре -20 °С; 5 – то же, что и для категории 4, и еще ударная вязкость после механического старения; 6 – то же, но без гарантирования ударной вязкости при температуре -20 °С.

Для строительных конструкций наиболее широко применяется сталь категории 5, например ВСт3сп5. Она имеет следующий химический состав: 0,14-0,22 % С; 0,4-0,65 % Мп; 0,12-0,3 % Si, менее 0,04 % Р и менее 0,05 % S. Ее механические свойства: $\sigma_B = 380 \div 490$ МПа; $\sigma_T \geq 230$ МПа; $\delta_5 \geq 20 \%$; КСУ $_{+20} \geq 0,7$ МДж/м 2 ; КСУ $_{-20} \geq 0,3$ МДж/м 2 ; КСУ после механического старения не менее 0,3 МДж/м 2 и удовлетворительное испытание на изгиб на угол 180° вокруг оправки $d = 0,5 a$.

Сталь марок ВСт3сп5, ВСт3сп6 и ВСт3сп5 применяют для изготовления резервуаров, газгольдеров и других конструкций средних и малых размеров, газонефтепроводов малых диаметров, арматурной стали и т. д. Сталь углеродистую обыкновенного качества используют также и для деталей строительно-монтажных машин, например, Ст1 для изготовления ответственных деталей: опор, шайб, прокладок, рам и т. д.; Ст2 для изготовления заклепок, анкерных болтов и т. д. Для шкивов, муфт, заглушек, корпусов редукторов, а также болтов применяют Ст3. Из Ст4 изготовляют крюки, тяги, клинья, а также крепежные детали насосов,

Таблица 6

Ударная вязкость углеродистой стали обыкновенного качества группы В категорий 3,4,5 и 6

Марка стали	Вид проката	Расположение образца относительно проката	Толщина проката, мм	Ударная вязкость КСУ Дж/см ² , не менее		
				T = 20°C	T = -20°C	после механического старения
ВСт3 пс, ВСт3 сп	Листовая сталь	Поперек	5-9	80	40	40
			10-25	70	30	30
			26-40	50	-	-
	Широкополосная сталь	Вдоль	5-9	100	50	50
			10-25	80	30	30
			26-40	70	-	-
	Сортовой и фасонный прокат	-//-	5-9	110	50	50
			10-25	100	30	30
			26-40	90	-	-
	Листовая сталь	Поперек	5-9	80	40	40
10-30			70	30	30	
31-40			50	-	-	
ВСт3 Гпс	Широкополосная сталь	Вдоль	5-9	100	50	50
			10-30	80	30	30
			31-40	70	-	-
	Сортовой и фасонный прокат	-//-	5-9	110	50	50
			10-30	100	30	30
			31-40	90	-	-
ВСт4 пс, ВСт4 сп	Листовая сталь	Поперек	5-9	70	-	-
			10-25	60	-	-
			26-40	40	-	-
	Сортовой и фасонный прокат	Вдоль	5-9	100	-	-
			10-25	90	-	-
			26-40	70	-	-

компрессоров; из Ст5 – пальцы, втулки, плашки зажимов, болты; из Ст6 – промежуточные валы, стропы, ролики передвижных агрегатов, втулки, шкивы и т. д.

В зависимости от предъявляемых требований к деталям машин проводят их упрочнение. Ст1, Ст2, Ст3 обычно подвергают химико-термической обработке (цементация, цианирование и т. д.) с последующей закалкой и низким отпуском при температуре 160-180 °С, что позволяет получать высокую прочность, твердость, износостойчивость на поверхности стальных деталей в сочетании с пластичной сердцевиной. Ст3, Ст4, Ст5 подвергают нормализации или закалке с высоким отпуском при температуре 550–650 °С для улучшения механических свойств. Закалка с высоким отпуском позволяет получать наиболее благоприятное сочета-

Таблица 7.

Механические свойства стали категории 2 углеродистой качественной конструкционной

Марки стали	Термическая обработка заготовок	Предел текучести σ_T , МПа, не менее	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа, не менее	Относительное удлинение δ_5 , %, не менее	Относительное сужение Ψ , %, не менее	Ударная вязкость КСУ, Дж/см ² , не менее	
08	Нормализация	200	330	33	60	—	
10		210	340	31	55	—	
15		230	380	27	55	—	
20		250	420	25	55	—	
25		280	460	23	50	90	
30		300	500	21	50	80	
35		320	540	20	45	70	
40		340	580	19	45	60	
45		360	610	16	40	50	
50		380	640	14	40	40	
55		390	660	13	35	—	
58 (55пп)		320	610	12	28	—	
60		410	690	12	35	—	
65		420	710	10	30	—	
70		430	730	9	30	—	
75	Закалка + отпуск	900	1100	7	30	—	
80		То же	950	1100	6	30	—
85		То же	1000	1150	6	30	—
60Г		Нормализация	420	710	11	35	—
65Г			440	750	9	—	—
70Г	460		800	8	—	—	

ние прочности, пластичности и вязкости, поэтому такое упрочнение рекомендуется для деталей машин, работающих также и в северных условиях. После термического улучшения, например, для Ст3 гарантируется КСУ — 40 не менее 0,3 МДж/м²

Сталь углеродистую качественную конструкционную поставляют главным образом для деталей машин в виде сортовой горячекатаной и ковальной стали размером (диаметром или толщиной) до 250 мм, а также в виде листового и полосового проката. Изготавливают следующих марок: спокойная — 08, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 58 (55пп — пониженной прокаливаемости), 60 диаметром или толщиной до 250 мм и 65, 70, 75, 80, 85, 60Г, 70Г диаметром или толщиной до 60 мм (в марке индекс „сп” не ставят); кипящая и полуспокойная 05кп, 08кп, 08пс, 10пс, 10кп, 11кп, 15кп, 15пс, 18кп, 20кп, 20пс.

Поставляют также калиброванную сталь углеродистую качественную конструкционную и серебрянку (со специальной обработкой поверхности и холоднокатаная шлифованная сталь) всех марок — от 08 до 60. Двухзначные цифры в марках стали обозначают среднее содержание углерода в сотых долях процента, буква „Г” — повышенное содержание марганца в среднем 1%.

В зависимости от назначения горячекатаная и кованая сталь подразделяется на подгруппы: а — для горячей обработки давлением; б — для холодной механической обработки (токарная обработка, фрезеровка, строжка и др.); в — для холодного волочения (подкат).

По состоянию металла сталь поставляют без термической обработки (горячекатаная), в виде термически обработанной — Т и нагартованной — Н (для калиброванной стали и серебрянки).

В зависимости от гарантируемых механических свойств сталь подразделяется на пять категорий: 1 — поставляется без испытания механических свойств на растяжение и ударную вязкость для горячекатаной, кованой, калиброванной, серебрянки; 2 — с испытанием механических свойств (табл. 7) на растяжение на образцах, изготовленных из нормализованных заготовок размером 25 мм для тех же всех видов стали; 3 — с испытанием механических свойств на растяжение на образцах, изготовленных из нормализованных заготовок размером не более 100 мм для горячекатаной, кованой, калиброванной стали; 4 — с испытанием механических свойств на растяжение и ударную вязкость на образцах, изготовленных из термически обработанных (закалка + отпуск) заготовок размером не более 100 мм для тех же видов стали; 5 — с испытанием механических свойств на растяжение (табл. 8) на образцах, изготовленных из сталей в нагартованном или термически обработанном состоянии (отожженной или высокоотпущенной) для калиброванной стали.

Кроме того, сталь всех категорий поставляют с гарантированным химическим составом (табл. 9). К марке стали добавляют индексы, обозначающие подгруппу (а, б, в), состояние металла (Т или Н), категорию (1, 2, 3 и т.д.). Например, сталь марки 20-2-а поставляют спокойной по подгруппе „а” в горячекатаном состоянии по категории 2. Она имеет химический состав: 0,17–0,24 % С; $0,17-0,37\% \leq \text{Si}$; 0,35–0,45 % Мп; $\text{Cr} \leq 0,25\%$; $\text{S} \leq 0,40\%$; $\text{P} \leq 0,035\%$ и механические свойства: $\sigma_{\text{в}} \geq 420$ МПа, $\sigma_{\text{Т}} \geq 250$ МПа, $\delta_5 \geq 25\%$, $\psi \geq 55\%$.

Сталь марок 10, 15, 20 и 25 применяют для бесшовных горячекатаных труб диаметром менее 500 мм, используемых на строительстве газонефтепроводов. Но основное использование сталь углеродистая качественная конструкционная имеет для изготовления различных деталей машин. Для деталей строительно-монтажных машин наибольшее применение нашли среднеуглеродистые стали, упрочняемые термической обработкой (закалка в сочетании с высоким отпуском, термомеханическая обработка, закалка током высокой частоты ТВЧ, изотермическая

Т а б л и ц а 8.

Минимальные механические свойства стали, поставляемой по категории 5

Марка стали	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Относительное сужение Ψ , %	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Относительное сужение Ψ , %
	Нагартованная			Отожженная, или высокоотпущенная		
10	420	8	50	300	26	55
15	450	8	45	350	23	55
20	500	7	40	400	21	50
25	550	7	40	420	19	50
30	570	7	35	450	17	45
35	600	6	35	480	15	45
40	620	6	35	520	14	40
45	650	6	30	550	13	40
50	670	6	30	570	12	40

закалка). Наряду с ними используют также низкоуглеродистые стали, упрочняемые химико-термической обработкой (цементацией, азотированием и т. д.) с последующей закалкой и низким отпускком.

Кипящую низкоуглеродистую сталь марок 05кп, 08кп, 10кп применяют для производства листов, лент, труб, проволоки и неотчетственных конструкций. Из спокойной низкоуглеродистой стали марок 05, 08, 10 с высокими пластическими свойствами изделия можно изготавливать прокаткой, холодной штамповкой, высадкой, волочением, а также и сваркой. Для повышения прочности и улучшения обрабатываемости резанием низкоуглеродистую сталь после обработки давлением подвергают нормализации с температурой нагрева 930-950°.

Сталь марок 15, 20, 25 применяют для деталей, требующих большой вязкости и не подвергающихся при эксплуатации высоким напряжениям, — муфт, поршней насосов и т. п. Для повышения прочности и твердости эти детали часто подвергают цементации или цианированию с последующей термической обработкой — закалкой и низким отпускком. Сталь с повышенным содержанием марганца (15Г, 20Г, 25Г) при той же пластичности обладает большей прочностью.

Из стали марок 30 и 35 изготавливают стропы, вертлюги, крюки, оси, талевые блоки, а из стали марок 45 и 40 — муфты, валы насосов, шестерен, цепных колес лебедок и др. При сравнительно небольших рабочих напряжениях, возникающих в изделиях, сталь марок 30, 35, 40, 45, 50, 55 применяют в нормализованном состоянии, при значительных напряжениях — после закалки и высокого отпуска.

Таблица 9.

Химический состав (в %) стали углеродистой качественной конструкционной

Марка стали	C	Si	Mn	Cr (не более)
05кп	<0,06	<0,03	<0,4	0,1
08кп	0,05-0,11	<0,03	0,25-0,5	0,1
08пс	0,05-0,11	0,05-0,17	0,35-0,65	0,1
08	0,05-0,12	0,17-0,37	0,35-0,65	0,1
10кп	0,07-0,14	<0,07	0,25-0,5	0,15
10пс	0,07-0,14	0,05-0,17	0,35-0,65	0,15
10	0,07-0,14	0,17-0,37	0,35-0,65	0,15
11кп	0,05-0,12	<0,06	0,3-0,5	0,15
15кп	0,12-0,19	<0,07	0,25-0,5	0,25
15пс	0,12-0,19	0,05-0,17	0,35-0,65	0,25
15	0,12-0,19	0,17-0,37	0,35-0,65	0,25
18кп	0,12-0,2	<0,06	0,3-0,5	0,15
20кп	0,17-0,24	<0,07	0,25-0,5	0,25
20пс	0,17-0,24	0,05-0,17	0,35-0,65	0,25
20	0,17-0,24	0,17-0,37	0,35-0,65	0,25
25	0,22-0,3	0,17-0,37	0,5-0,8	0,25
30	0,27-0,35	0,17-0,37	0,5-0,8	0,25
35	0,32-0,4	0,17-0,37	0,5-0,8	0,25
40	0,37-0,45	0,17-0,37	0,5-0,8	0,25
45	0,42-0,5	0,17-0,37	0,5-0,8	0,25
50	0,47-0,55	0,17-0,37	0,5-0,8	0,25
55	0,52-0,6	0,17-0,37	0,5-0,8	0,25
58 (55пп)	0,55-0,63	0,1-0,3	<0,2	0,15
60	0,57-0,65	0,17-0,37	0,5-0,8	0,25
65	0,62-0,7	0,17-0,37	0,5-0,8	0,25
70	0,67-0,75	0,17-0,37	0,5-0,8	0,25
75	0,72-0,8	0,17-0,37	0,5-0,8	0,25
80	0,77-0,85	0,17-0,37	0,5-0,8	0,25
85	0,82-0,9	0,17-0,37	0,5-0,8	0,25
60Г	0,57-0,65	0,17-0,37	0,7-1	0,25
65Г	0,62-0,7	0,17-0,37	0,9-1,2	0,25
70Г	0,67-0,75	0,17-0,37	0,9-1,2	0,25

14. ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

Строительная сталь

Низколегированную конструкционную сталь изготавливают в виде листов, полос, рулонов, сортового и фасонного проката. Предназначается она главным образом для строительных конструкций (резервуаров, газгольдеров, газонефтепроводов и т. д.).

Низколегированная сталь обладает рядом преимуществ по сравнению с углеродистой сталью обыкновенного качества. Ее предел текучести может превышать на 50 % и более предел текучести, например, стали марки ВСт3. У низколегированной стали пластичность $\delta_5 \geq 18 \div 23 \%$; ударная вязкость при температуре $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ превышает $0,3 \text{ МДж/м}^2$. У стали марки ВСт3 при температуре $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ ударная вязкость больше $0,3 \text{ МДж/м}^2$. Кроме того, низколегированная сталь обладает меньшей чувствительностью к старению и меньшей склонностью к хладноломкости. Ударная вязкость низколегированной стали у большей части марок после искусственного старения более $0,4 \text{ МДж/м}^2$.

Низколегированная сталь хорошо сваривается. Для сварных соединений не требуется обычно ни предварительного подогрева, ни последующей термической обработки для снятия напряжений. Коррозионная стойкость в атмосферных условиях и других средах в 1,5 раза выше, чем у стали марки ВСт3.

Изготавливают ее следующих марок: марганцовистая – 09Г2, 14Г2; марганцовистая с медью – 09Г2Д; кремнемарганцовистая – 09Г2С, 10Г2С1, 12ГС, 16ГС, 17ГС, 17Г1С; кремнемарганцовистая с медью – 09Г2СД; 10Г2С1Д; марганцово-ванадиевая – 15ГФ, 15Г2СФ; марганцово-ванадиевая с медью – 15ГФД, 15Г2СФД; марганцово-ванадиевая с азотом – 14Г2АФ, 16Г2АФ, 18Г2АФпс; марганцово-ванадиевая с азотом и медью – 14Г2АФД, 16Г2АФД, 15Г2АФДпс, 18Г2АФДпс; марганцово-ниобиевая – 10Г2Б; марганцово-ниобиевая с медью – 10Г2БД; хромокремнемарганцовая – 14ХГС; хромокремненикелевая с медью – 10ХСНД, 15ХСНД; хромоникелевофосфористая с медью – 10ХНДП.

В марке стали двузначные цифры обозначают содержание углерода в сотых долях процента. Буквы, стоящие после двузначной цифры, обозначают химические элементы, входящие в сталь: Г – марганец, Х – хром, Н – никель, Д – медь, Ц – цирконий, Ф – ванадий, Р – бор, Т – титан, А – азот, Б – ниобий, М – молибден, В – вольфрам, Ю – алюминий, П – фосфор, К – кобальт, С – кремний, Ч – редкоземельные металлы (РЗМ). Цифры, стоящие после букв Г, Н, С, Х, обозначают среднее содержание данного элемента в стали в целых единицах процентов. Отсутствие цифр после этих букв указывает на содержание данного элемента в среднем 1%, за исключением случаев, когда в марке стоят: буквы Т, Ю, Ц, Ф, Ч и П, обозначающие содержание соответственно титана, алюминия, циркония, ванадия, РЗМ и фосфора в стали в десятых долях процента (до 0,2%); буквы Д, М, обозначающие содержание меди и молибдена (до 0,60%); буквы А и Б, обозначающие содержание в стали азота и ниобия в сотых долях процента (азота до 0,015%, ниобия до 0,05%); буква Р, обозначающая содержание бора в тысячных долях процента (до 0,006%).

Низколегированную конструкционную сталь поставляют с гарантированным химическим составом (табл. 10) и механическими свойствами

Таблица 10.

Химический состав низколегированной стали, %

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	V	Другие элементы
09Г2	≤0,12	0,17-0,37	1,4-1,8	≤0,3	≤0,3	≤0,3	—	—
09Г2Д	≤0,12	0,17-0,37	1,4-1,8	≤0,3	≤0,3	0,15-0,3	—	—
14Г2	0,12-0,18	0,17-0,37	1,2-1,6	≤0,3	≤0,3	≤0,3	—	—
12ГС	0,09-0,15	0,5-0,8	0,8-1,2	≤0,3	≤0,3	≤0,3	—	—
16ГС	0,12-0,18	0,4-0,7	0,9-1,2	≤0,3	≤0,3	≤0,3	—	—
17ГС	0,14-0,2	0,4-0,6	1-1,4	≤0,3	≤0,3	≤0,3	—	—
17Г1С	0,15-0,2	0,4-0,6	1,15-1,6	≤0,3	≤0,3	≤0,3	—	—
09Г2С	≤0,12	0,5-0,8	1,3-1,7	≤0,3	≤0,3	≤0,3	—	—
09Г2СД	≤0,12	0,5-0,8	1,3-1,7	≤0,3	≤0,3	0,15-0,3	—	—
10Г2С1	≤0,12	0,8-1,1	1,3-1,65	≤0,3	≤0,3	≤0,3	—	—
10Г2С1Д	≤0,12	0,8-1,1	1,3-1,65	≤0,3	≤0,3	0,15-0,3	—	—
15ГФ	0,12-0,18	0,17-0,37	0,9-1,2	≤0,3	≤0,3	≤0,3	0,05-0,12	—
15ГФД	0,12-0,18	0,17-0,37	0,9-1,2	≤0,3	≤0,3	0,15-0,3	0,05-0,12	—
15Г2СФ	0,12-0,18	0,4-0,7	1,3-1,7	≤0,3	≤0,3	≤0,3	0,05-0,1	—
15Г2СФД	0,12-0,18	0,4-0,7	1,3-1,7	≤0,3	≤0,3	0,15-0,3	0,05-0,1	—
14Г2АФ	0,12-0,18	0,3-0,6	1,2-1,5	≤0,4	≤0,3	≤0,3	0,07-0,12	N 0,015-0,025
14Г2АФД	0,12-0,18	0,3-0,6	1,2-1,6	≤0,4	≤0,3	0,15-0,3	0,07-0,12	N 0,015-0,025
16Г2АФ	0,14-0,2	0,3-0,6	1,3-1,7	≤0,4	≤0,3	≤0,3	0,08-0,14	N 0,015-0,025
16Г2АФД	0,14-0,2	0,3-0,6	1,3-1,7	≤0,4	≤0,3	0,15-0,3	0,08-0,14	N 0,015-0,025
18Г2АФпс	0,14-0,22	До 0,17	1,3-1,7	≤0,3	≤0,3	≤0,3	0,08-0,15	N 0,015-0,030
18Г2АФДпс	0,14-0,22	До 0,17	1,3-1,7	≤0,3	≤0,3	0,15-0,3	0,08-0,15	N 0,015-0,030
10Г2Б	≤0,12	0,17-0,37	1,2-1,6	≤0,3	≤0,3	≤0,3	—	Nb 0,02-0,05
10Г2БД	≤0,12	0,17-0,37	1,2-1,6	≤0,3	≤0,3	0,15-0,3	—	Nb 0,02-0,05
14ХГС	0,11-0,16	0,4-0,7	0,9-1,3	0,5-0,8	≤0,3	≤0,3	—	—
10ХСНД	≤0,12	0,8-1,1	0,5-0,8	0,6-0,9	0,5-0,8	0,4-0,6	—	—
15ХСНД	0,12-0,18	0,4-0,7	0,4-0,7	0,6-0,9	0,3-0,6	0,2-0,4	—	—

Продолжение табл. 10

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	V	Другие элементы
15Г2АФДпс 10ХНДП	0,12-0,18 ≤0,12	До 0,17 0,17-0,37	1,2-1,6 0,3-0,6	≤0,3 0,5-0,8	≤0,3 0,3-0,6	0,2-0,4 0,3-0,5	0,08-0,15 —	N 0,015-0,30 P 0,07-0,12 Al 0,08-0,15 N 0,015-0,030
13Г2АФ 13ГС 15ГСТЮ	0,11-0,17 0,11-0,15 0,13-0,18	0,2-0,4 0,4-0,6 0,5-0,8	1,3-1,7 1,15-1,45 1,2-1,6	≤0,3 ≤0,3 ≤0,3	≤0,3 ≤0,3 ≤0,3	≤0,3 ≤0,3 ≤0,3	0,07-0,12 — —	— Ti 0,09-0,15; Al 0,1-0,15 N 0,015-0,030
17Г2АФ 17Г2СФ 14Г2САФ 16Г2САФ	≤0,2 0,15-0,20 0,13-0,18 0,15-0,20	0,3-0,5 0,4-0,6 0,3-0,5 0,3-0,5	1,3-1,6 1,2-1,6 1,25-1,6 1,3-1,6	≤0,3 ≤0,3 ≤0,3 ≤0,3	≤0,3 ≤0,3 ≤0,3 ≤0,3	≤0,3 ≤0,3 ≤0,3 ≤0,3	0,08-0,12 ≤0,08 0,07-0,12 0,08-0,12	— — N 0,015-0,030 N 0,015-0,030
X56, X60 X65 X70	≤0,26 ≤0,26 ≤0,23	— — —	≤1,35 ≤1,40 ≤1,60	— — —	— — —	— — —	≤0,02 ≤0,02 ≤0,02	Nb 0,005; Ti 0,03 Nb 0,005 Nb 0,005

Таблица 11.

Механические свойства низколегированной стали в горячекатаном состоянии

Марка стали	Толщина проката, мм	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Ударная вязкость КСЧ (в Дж/см ²) при температуре, °С		
					20	-40	-70
09Г2, 09Г2Д	4	450	310	21	—	—	—
	5-9	450	310	21	—	35	—
	10-20	450	310	21	—	30	—
14Г2	21-32	450	300	21	—	40	—
	4	470	340	21	—	—	—
	5-9	470	340	21	—	35	—
12ГС	10-20	460	330	21	—	30	—
	21-32	460	330	21	—	30	—
	4	470	320	26	—	—	—
16ГС	5-9	470	320	26	—	—	—
	10	470	320	26	—	—	—
	4	500	330	21	—	—	—
17ГС	5-9	500	330	21	60	40	30
	10-20	490	320	21	60	30	25
	21-32	480	300	21	60	30	25
	33-60	470	290	21	60	30	25
	60-160	460	280	21	60	30	25
17Г1С	4	520	350	23	—	—	—
	5-9	520	350	23	—	45	—
09Г2С, 09Г2СД	10-20	500	340	23	—	35	—
	4	520	360	23	—	—	—
	5-9	520	360	23	—	45	—
10Г2С1, 10Г2С1Д	10-20	520	350	23	—	40	—
	4	500	350	21	—	—	—
	5-9	500	350	21	65	40	35
	10-20	480	330	21	60	35	30
	21-32	470	310	21	60	35	30
	33-60	460	290	21	60	35	30
	61-80	450	280	21	60	35	30
15ГФ, 15ГФД	80-160	440	270	21	60	35	30
	4	500	360	21	—	—	—
	5-9	500	350	21	65	40	30
	10-20	490	340	21	60	30	25
	21-32	480	330	21	60	30	25
	33-60	460	330	21	60	30	25
	61-80	440	300	21	60	30	25
	81-100	440	300	21	60	30	25
15Г2СФ, 15Г2СФД	4	520	380	21	—	—	—
	5-9	520	380	21	—	40	—
	10-20	520	360	21	—	30	—
15Г2СФД	21-32	480	340	21	—	30	—
	5-9	560	400	18	—	40	—
	10-20	560	400	18	—	35	—
	21-32	560	400	18	—	35	—

Продолжение табл. 11

Марка стали	Толщина проката, мм	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Ударная вязкость КСЧ (в Дж/см ²) при температуре, °С		
					20	-40	-70
14Г2АФ,	4	550	400	20	—	—	—
14Г2АФД	5-9	550	400	20	—	45	35
	10-32	550	400	20	—	40	30
	33-50	550	400	20	—	40	30
16Г2АФ,	4	600	450	20	—	—	—
16Г2АФД	5-9	600	450	20	—	45	35
	10-32	600	450	20	—	40	30
	33-50	580	420	20	—	40	30
18Г2АФпс,	4	600	450	19	—	—	—
18Г2АФДпс	5-9	600	450	19	—	45	35
	10-20	600	450	19	—	40	30
	21-32	600	450	19	—	40	30
10Г2Б,	4	520	380	21	—	—	—
10Г2БД	5-9	520	380	21	—	40	—
	10	520	380	21	—	30	—
14ХГС	4	500	350	22	—	—	—
	5-9	500	350	22	—	40	—
	10	500	350	22	—	35	—
10ХСНД	4	540	400	19	—	—	—
	5-9	540	400	19	—	50	35
	10-15	540	400	19	—	40	30
	16-32	540	400	19	—	50	30
	33-40	520	400	19	—	50	30
15ХСНД	4	500	350	21	—	—	—
	5-9	500	350	21	—	40	30
	10-20	500	350	21	—	30	30
	21-32	500	350	21	—	30	30
15Г2АФДпс	4	550	400	19	—	—	—
	5-9	550	400	19	—	45	35
	10-20	550	400	19	—	40	30
	21-32	550	400	19	—	40	30
10ХНДП	4	480	350	20	—	—	—
	5-9	480	350	20	—	40	—

Примечание. Значение ударной вязкости при температуре -20°C должны быть не ниже норм, установленных для температуры -40°C . Значения ударной вязкости при температуре -50 и -60°C должны быть не ниже норм, установленных для температуры -70°C .

(табл. 11) по 15 категориям в зависимости от числа гарантируемых характеристик.

При поставке стали по категории 1 гарантируется только ее химический состав; по категории 2 дополнительно гарантируются механические свойства при испытании на растяжение и изгиб в холодном состоянии; по категориям 3, 5, 6, 7, 8 и 9 – то же и ударная вязкость при температуре +20, -20, -40, -50, -60, -70 °С; по категориям 10, 11, 12, 13, 14 и 15 – то же и ударная вязкость после механического старения. Например марка стали 17ГС-14 (14 – номер категории).

Низколегированная сталь по прочности делится на две группы: повышенная с $\sigma_T > 330 \div 400$ МПа (17ГС, 17Г1С, 09Г2С, 14Г2 и др.) и высокая прочность с $\sigma_T > 450 \div 750$ МПа (15Г2СФ, 14Г2СФ, 16Г2АФ, 18Г2АФ и др.).

К группе повышенной прочности относятся стали, легированные главным образом марганцем и калием. Марганец в этих сталях присутствует в вариантах Г (Mn < 1%), Г1 (Mn в среднем 1%) и Г2 (Mn < 2%). Например, 17ГС, 17Г1С и 09Г2. Кремний присутствует в вариантах С (Si < 1%) и С1 (Si в среднем 1%). Например, 09Г2С и 10Г2С1. Низколегированные стали повышенной прочности обычно применяют в горячекатаном состоянии для резервуаров, газгольдеров и других конструкций, а также газонефтепроводов средних размеров. Используют ее также и в термически упрочненном состоянии (табл. 12).

Для строительных конструкций больших размеров применяют низколегированную сталь высокой прочности обычно в термоупрочненном состоянии (нормализация или закалка с высоким отпуском). Строитель-

Таблица 12

Механические свойства некоторых марок низколегированной стали после термической обработки (закалка и высокий отпуск)

Марка стали	Толщина проката, мм	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Ударная вязкость КСЧ (в Дж/см ²) при температуре, °С	
					-40	-70
14Г2 10Г2С1 10Г2С1Д	10-32	540	400	18	40	30
	10-40	540	400	19	50	30
09Г2С, 09Г2СД	10-32 33-60	500 460	370 320	19 21	50 50	30 30
15Г2СФ, 15Г2СФД	10-32	600	450	17	40	30

ная сталь высокой прочности характеризуется присутствием, кроме обычных легирующих элементов (Mn, Si и др.), дефицитных легирующих элементов в очень незначительном количестве (микролегирование). Микролегирование заключается, как указывалось выше, во введении в сталь карбидообразующих элементов (ванадий, ниобий и др.), нитридообразующих элементов (азот и ванадий), которые образуют в стали в тонкодисперсном виде мельчайшие частицы химических соединений (карбиды, нитриды, карбонитридные фазы и др.) Это приводит к повышению прочности (дисперсионное твердение), измельчению микроструктуры и повышению в связи с этим вязкости и пластичности стали. Такие стали называются дисперсионно-твердеющими.

Например, сталь марки 15Г2СФ, толщиной 10 – 32 мм, имеющая химический состав: 0,12 – 0,18 % С; 0,4 – 0,7 % Si; 1,3 – 1,7 % Mn; 0,05 – 0,10 % V, после закалки и высокого отпуска получает следующие механические свойства: $\sigma_B \geq 600$ МПа; $\sigma_T \geq 450$ МПа; $\delta_5 \geq 17$ %, $KCU_{70} \geq 0,3$ МДж/м² испытание на изгиб на угол 180° при $d = 2a$. Эти свойства типичны для низколегированной стали высокой прочности. Низколегированная сталь повышенной прочности марки 14ХГС, толщиной 10 мм, имеющая химический состав: 0,11 – 0,16 % С; 0,4 – 0,7 % Si; 0,9 – 1,3 % Mn; 0,5 – 0,8 % Cr, в горячекатаном состоянии обладает следующими механическими свойствами: $\sigma_B \geq 500$ МПа; $\sigma_T \geq 350$ МПа; $\delta_5 \geq 22$ %; $KCU_{40} \geq 0,35$ МДж/м² Эти свойства типичны для низколегированной стали повышенной прочности в горячекатаном состоянии.

Сталь для резервуаров и газгольдеров. Развитие нефтяной и газовой промышленности вызывает необходимость строительства большого числа резервуаров, газгольдеров и других хранилищ газа, нефти и получаемых из нее продуктов. По расположению над уровнем земли резервуары подразделяются на наземные, полуподземные и подземные. По роду материала, применяемого для их изготовления, резервуары могут быть металлическими, неметаллическими и комбинированными. По конструкции наземные металлические резервуары делятся на вертикальные, цилиндрические, каплевидные, шаровые (сферические), сфероцилиндрические и др.

Наземные вертикальные цилиндрические стальные резервуары – основной вид хранилищ нефти и нефтепродуктов, так как впервые разработанная в СССР современная технология их изготовления методом рулонирования с применением автоматической сварки позволяет сооружать их в наиболее короткие сроки. На монтажные площадки в рулонированном виде поставляют корпус, днище, а иногда и кровлю резервуаров (плавающую крышу).

Газгольдеры представляют собой сложные конструкции, предназначенные для хранения газов и выравнивания их давления. Применение газгольдеров позволяет обеспечить непрерывное поступление газа к потребителю. В зависимости от давления находящихся в них газов они

подразделяются на газгольдеры низкого и высокого давления; по конструкции – на цилиндрические, шаровые и т. д. Цилиндрические газгольдеры по конструкции весьма разнообразны, но все они имеют одинаковые конструктивные элементы: однозвенную или многозвенную оболочку, состоящую из корпуса, днища, плоской или сферической крыши, а также стойки, стропила и распорки, связи из трубчатой или сортовой стали; лестницы и обслуживающие площадки.

Резервуары и газгольдеры – ответственные сооружения. Стоимость хранящихся в них продуктов во много раз превышает стоимость конструкций. Условия их эксплуатации зависят от назначения и климатических районов страны. Рабочее давление находящихся в вертикальных резервуарах нефти и нефтепродуктов может вызвать значительные напряжения в металле: например, до 140 МПа в резервуарах объемом до 5000 м³ и 593–237 МПа в резервуарах объемом 30 000 м³ от нижнего к верхним поясам соответственно. Избыточное давление в шаровых резервуарах может доходить до 1,8 МПа и более, а в газгольдерах высокого давления до 3 МПа и выше.

Наружная температура воздуха (от –50 до 50 °С в различных районах СССР), а также ветровая и снеговая нагрузки, особенно на большие сооружения, способствуют возникновению дополнительных напряжений в металле. Например, снеговая нагрузка может доходить до 1 и 2 кПа в зависимости от географических районов страны.

Исходя из условий эксплуатации, материал для их изготовления должен обладать определенным комплексом свойств. Основными из них являются высокая прочность при достаточно высокой пластичности и вязкости стали, минимальная склонность к хрупкому разрушению (хладноломкости) и старению, низкая чувствительность к надрезам. Материал должен хорошо свариваться, обеспечивая полную герметичность резервуара или другой конструкции, во избежание утечек хранимых продуктов. Кроме того, он должен иметь достаточную коррозионную стойкость в условиях атмосферы и воздействия хранимых в резервуарах и газгольдерах продуктов, а также быть недефицитным и выпускаться массовым производством. Поэтому для резервуаров, газгольдеров и подобных конструкций применяют сталь, хорошо раскисленную, с низким содержанием углерода, достаточно чистую по содержанию серы, фосфора, кислорода, азота, водорода, с однородным распределением и низким количеством неметаллических включений, мелкозернистую, не склонную к старению, с низким порогом хладноломкости (не выше –40 °С).

Для изготовления шаровых, цилиндрических и других резервуаров и газгольдеров используют сталь по трем группам: обычной, повышенной и высокой прочности. Каждая группа прочности делится на классы по минимальным показателям временного сопротивления и предела текучести. Виды и марки сталей для изготовления резервуаров и газгольде-

ров назначают, исходя из рабочих условий их эксплуатации, объема, характера элементов конструкции и климатогеографических районов их сооружения.

Шаровые резервуары и газгольдеры собирают из отдельных элементов (скорлуп), составляемых обычно из холодновальцованных лепестков. Изготавливают их объемом 600 и 2000 м³ из низколегированной стали марки 09Г2С класса С46/33, а при повышенных давлениях – из высокопрочной стали, например, марки 16Г2АФ класса С60/45.

Основные элементы стальных цилиндрических вертикальных резервуаров – корпус (стенка резервуара), днище и кровля. Корпус и днище изготавливают в заводских условиях в виде полотнищ и поставляют в рулонированном виде на монтажную площадку. Кровлю делают в виде отдельных монтажных элементов-щитов, а плавающую крышу – в виде рулона.

У резервуаров со сферической или другой самонесущей крышей одним из важных элементов является кольцо жесткости, служащее для опирания кровли, которое устанавливают на верхнюю часть корпуса резервуара. Резервуары имеют стойки и колонны для поддержания кровли, обслуживающие площадки, ограждения и лестницы.

Корпус, днище и кольцо жесткости вертикальных цилиндрических резервуаров объемом 700 – 5000 м³, сооружаемых в районах с температурой воздуха не ниже –20 °С, изготавливают из стали марок ВСтЗсп5, ВСтЗпс5 класса С38/23. Для районов с более низкими температурами (–40 °С и ниже) корпус и днище этих резервуаров делают из хорошо раскисленной стали марки ВСтЗсп5 по группе В с дополнительно гарантированной ударной вязкостью при температуре –40 °С, а также из 09Г2С.

У цилиндрических вертикальных резервуаров объемом 10 000, 20 000 м³ нижние пояса корпуса, днище изготавливают из низколегированной стали класса С46/33 (09Г2С, 14Г2 и др.), а верхние пояса корпуса, кольцо жесткости – из стали марки ВСтЗсп5. Причем толщина стенки от пояса к поясу корпуса резервуара постепенно уменьшается (от днища к кровле) согласно расчету. Для изготовления нижних поясов корпуса и днища цилиндрических вертикальных резервуаров объемом 30 000 и 50 000 м³ применяют высокопрочную строительную сталь класса С60/45, например, марки 16Г2АФ. Для верхних поясов корпуса этих резервуаров используют углеродистую сталь марки ВСтЗсп5 класса С38/23 или низколегированную сталь класса С46/33 по расчету.

У резервуаров объемом 100 000 м³ и более корпус разбивают на нижние, средние и верхние пояса.

Нижние и средние пояса этих резервуаров изготавливают из высокопрочной стали класса С60/45, а верхние – из углеродистой стали марки ВСтЗсп5 класса С38/23 или низколегированной стали 09Г2С класса С46/33.

Для резервуаров объемом 100 000 м³ с двухслойной стенкой, состоящей из наружной и внутренней оболочек, выполняемых методом рулонирования, наружную оболочку можно делать из высокопрочной стали класса С60/45, нижние пояса внутренней оболочки – также из высокопрочной стали класса С60/45, а верхние пояса внутренней оболочки – из низколегированной стали класса С46/33.

Если нижние пояса корпуса резервуаров объемом 30 000, 50 000 м³ и более изготовлять не из высокопрочной, а из низколегированной стали, то толщина нижнего пояса корпуса будет много выше, чем максимально допустимая при рулонировании (свыше 20 мм). Монтаж тогда осуществляют листовым методом. Для резервуаров объемом менее 700 м³ допускается применять кипящую углеродистую сталь марки ВСтЗкп2 группы В.

Листовую оболочку цилиндрических газгольдеров объемом 700 – 3000 м³ (корпус, крыша и днище толщиной от 4 мм и более) изготовляют из углеродистой стали обыкновенного качества марки ВСтЗсп5 класса С38/23. Для газгольдеров объемом менее 700 м³, сооружаемых в районах с температурой –20 °С и выше, допускается применять сталь марок ВСтЗсп5 и ВСтЗкп2.

Для цилиндрических газгольдеров вместимостью 3000 – 30 000 м³ и более листовую оболочку нижнего пояса корпуса изготовляют из низколегированной стали марок 15ХСНД, 14Г2 класса С46/33 или из высокопрочной строительной стали класса С60/45. Для верхних поясов оболочки газгольдеров применяют спокойную сталь марки ВСтЗсп5 класса С38/23. Оболочки цилиндрических газгольдеров объемом до 30 000 м³ выполняют методом рулонирования. Для лестниц, обслуживающих площадок газгольдеров и резервуаров, а также несущих элементов газгольдеров, таких, как стойки, стропила, распорки для кровли резервуаров и несущих элементов их покрытия (центральная стойка, колонны и другие), применяют углеродистую сталь обыкновенного качества марок ВСтЗсп5, ВСтЗкп5, ВСтЗкп2; для настила площадок и ступеней лестниц допускается использование углеродистой стали обыкновенного качества марки БСт0.

Углеродистую сталь обыкновенного качества ВСтЗкп2 применяют обычно для элементов толщиной 3 мм, ВСтЗсп5 – толщиной от 4 до 9 мм и ВСтЗсп5 – толщиной более 9 мм.

Для изготовления резервуаров, предназначенных для изотермического хранения аммиака при температуре –34 °С, используют сталь марки 09Г2; для хранения жидкого этилена при температуре –102 °С и жидкого природного газа при температуре –162 °С – никелевые стали марок ОН6 и ОН9 с $\sigma_B \geq 600$ МПа и $\sigma_T \geq 450 - 480$ МПа, содержащие менее 0,08 % С, 6 и 9 % Ni соответственно. Для хранения жидкого кислорода при температуре –196 °С внутреннюю оболочку делают из аустенитной стали марки ОХ18Н9Т с $\sigma_B \geq 520$ МПа и $\sigma_T \geq 210$ МПа, содержащей менее 0,08 % С, 18 % Cr, 9 % Ni, 0,4 – 0,8 % Ti.

Изотермические хранилища продуктов с температурами $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже делают также из алюминиевых сплавов типа АМгб.

Арматурная сталь (арматура) – сталь, применяемая для армирования железобетонных конструкций. Железобетон представляет собой материал, состоящий из бетона и закрепленной в нем стальной арматуры в виде стержней, проволоки, сеток и т. д. Бетон – искусственный камень, состоящий из песка и измельченных продуктов горных пород (гравия, щебня), связанных в одно целое цементным раствором. Он является хрупким материалом, не выдерживающим значительных растягивающих напряжений, но хорошо работающим на сжатие. Арматура в железобетоне хорошо работает на растяжение, изгиб и сжатие. Железобетошные элементы широко применяют при сооружении трубопроводов, резервуаров, насосных и компрессорных станций (железобетонные трубы, плиты, колонны, балки); на строительстве подводных переходов трубопроводов (армированные бетонные покрытия трубопроводов, утяжеляющие железобетонные грузы) и т. д.

Арматура (рис. 46) предназначена для восприятия главных растягивающих или сжимающих напряжений в растянутых или сжатых элементах железобетонных конструкций, например, в балках, колоннах, стойках (главная или рабочая арматура). Кроме того, она может воспринимать „скалывающие напряжения” в отогнутых стержнях и хомутах (наклонная арматура), местные и дополнительные напряжения, которые

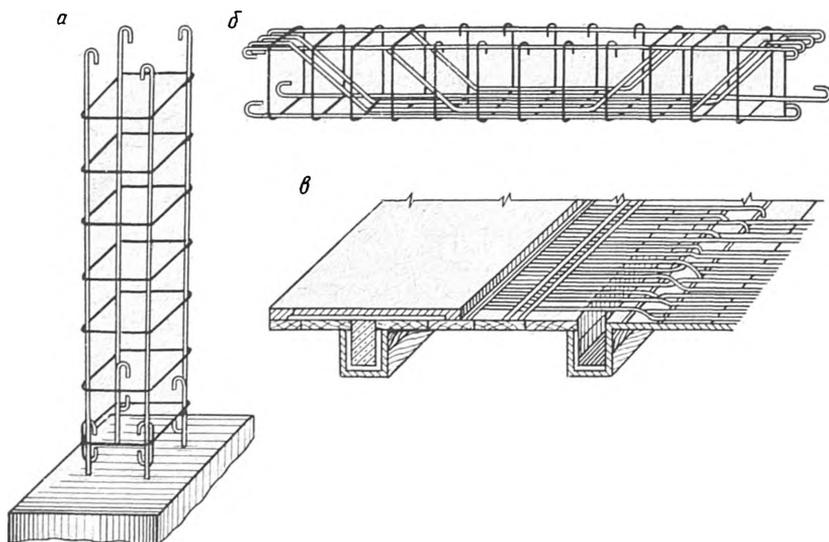


Рис. 46. Арматурные каркасы:

а – колонны; *б* – балки; *в* – ребристой плиты

не учитывают в расчетах (распределительная арматура), а также специальные напряжения – усадочные, термические (специальная арматура).

Исходя из условий работы, сталь для армирования железобетонных конструкций должна иметь гарантированные минимальные прочностные характеристики (σ_R и σ_T); гарантированные минимальные величины, характеризующие пластичность (δ , угол изгиба или число перегибов в холодном состоянии); гарантированные пределы изменения геометрических характеристик (размеры профиля поперечного сечения, длины стержней и др.), хорошую свариваемость, а также в необходимых случаях гарантированные характеристики исходного материала (химический состав, свойства материала для прядей и сеток).

Наиболее важные характеристики арматурной стали – пределы упругости и текучести. При напряжениях, превышающих предел текучести, быстро растет относительное удлинение стали, в результате чего нарушается сцепление арматуры с бетоном, в котором появляются трещины. Повышения предела текучести можно достигнуть легированием, при помощи термической обработки, а также за счет наклепа – волочением, сплющиванием или вытяжкой.

В зависимости от способов изготовления арматура подразделяется на стержневую и проволочную.

Стержневую арматуру изготавливают горячей прокаткой. Она подразделяется на горячекатаную, не подвергающуюся после прокатки упрочняющей обработке; подвергнутую после горячей прокатки упрочнению вытяжкой в холодном состоянии; подвергнутую после горячей прокатки упрочняющей термической или термомеханической обработке.

Горячекатаная арматура в зависимости от механических свойств подразделяется на классы с условным обозначением буквой „А” – арматуры и римскими цифрами – номера класса: I – первый класс, II – второй класс и т. д. (А-I; А-II и т. д.).

Упрочненная вытяжкой арматура подразделяется на классы по исходной горячекатаной арматуре, при этом к обозначению класса добавляют индекс „в” (А-IIв).

При обозначении класса термически упрочненной арматуры добавляют индекс „т” (Ат-V).

В обозначении классов термически и термомеханически упрочненной стержневой арматуры с повышенной стойкостью к коррозионному растрескиванию под напряжением добавляют букву „К” (например, Ат-IVК); свариваемой – букву „С” (например, Ат-IVС), свариваемой и повышенной стойкости к коррозионному растрескиванию под напряжением – буквы СК (например, Ат-VСК). В обозначении горячекатаной стержневой арматуры может быть буква „с” (например, Ас-II), когда она имеет специальное назначение (гарантируется $K_{CU-60} \geq 0,5$ МДж/м²).

Арматуру, поставляемую в горячекатаном состоянии, изготавливают

следующих классов: А-I, А-II, Ас-II, А-III, А-IV, А-V и А-VI. Минимальные характеристики свойств зависят от марок применяемой стали (СтЗспЗ, ВСтЗсп2, ВСт5сп2, 18Г2С, 25Г2С, 35ГС, 20ХГ2Ц и др.) – $\sigma_T \geq 235 \div 980$ МПа.

Упрочненная вытяжкой арматура в зависимости от механических свойств подразделяется на два класса: А-IIв и А-IIIв – $\sigma_T \geq 450$ и 540 МПа. Упрочнение вытяжкой арматуры приводит к повышению σ_T примерно на 30 %. Вытяжку осуществляют с контролем удлинения и напряжений или только удлинений.

Термически упрочненная арматура представляет собой стержни периодического профиля и подразделяется в зависимости от механических свойств на классы: Ат-III, Ат-IV, Ат-V и Ат-VI – $\sigma_{0,2} \geq 590 \div 1175$ МПа. Термическая обработка арматуры состоит из закалки и отпуска при температуре 350 – 500 °С.

Профиль и размеры стержневой арматуры зависят от ее класса: стержни арматуры класса А-I изготавливают круглыми гладкими, стержни классов А-II, А-III, А-IV, А-V и А-VI – периодического профиля, причем каждому классу должен соответствовать определенный внешний вид и размеры периодического профиля. Арматура периодического профиля представляет собой круглые стержни с двумя продольными ребрами и выступами, идущими по двух или трехзаходной винтовой линии.

Термином „стержень” обозначают арматуру любого диаметра, вида и профиля независимо от того, поставляют ее в прутках или мотках (бунтах). Стержневую арматуру поставляют по номинальным диаметрам стержней d_n . Номинальный диаметр (номер сечения) стержней горячекатаной арматуры периодического профиля, а также термически упрочненной арматуры периодического профиля соответствует номинальному диаметру круглых гладких стержней, равновеликих по площади поперечного сечения: для арматуры, упрочненной вытяжкой – номинальному диаметру стержней до вытяжки.

Холоднотянутая проволочная арматура подразделяется на арматурную проволоку и арматурные проволочные изделия.

Арматурная холоднотянутая проволока делится на классы: В-I обыкновенная гладкая; Вр-I ($\sigma_{0,2} \geq 410 \div 395$ МПа) – обыкновенная периодического профиля; В-II – высокопрочная гладкая; Вр-II ($\sigma_{0,2} \geq 1490 \div 1020$ МПа) – высокопрочная периодического профиля. Проволоку классов В-I и Вр-I изготавливают с номинальными диаметрами 3, 4 и 5 мм. Она имеет разрывное усилие не менее 39, 68 и 104 гН и относительное удлинение 2; 2,5 и 3 % соответственно.

Арматурные проволочные изделия представляют собой арматурные канаты – спиральные семипроволочные класса К-7 и девятинадцатипроволочные класса К-19. Показатели свойств зависят от диаметра каната: $\sigma_{0,2} \geq 1460, 1370, 1335, 1295$ МПа для К-7 диаметрами соответственно 6, 9, 12 и 15 мм и $\sigma_{0,2} \geq 1410$ МПа для К-19 диаметром 14 мм.

Сортамент проволочной арматуры строится также по номинальному диаметру d_n . Номинальный диаметр арматурной стальной проволоки периодического профиля соответствует номинальному диаметру проволоки до придания ей периодического профиля. Номинальный диаметр арматурных канатов соответствует диаметру их описанных окружностей.

Арматуру выбирают в зависимости от типа конструкции, наличия предварительного напряжения, а также от вида нагрузки (статическая или динамическая и многократно повторяющаяся) и температурных условий эксплуатации (табл. 13).

В конструкциях, находящихся под давлением газов, жидкостей и сыпучих тел (для ненапрягаемой арматуры), преимущество имеет стержневая арматура классов А-II и А-I. Допускается также использовать стержневую арматуру класса А-III и арматурную проволоку класса Вр-I. Для предварительно напряженных железобетонных элементов в качестве напрягаемой арматуры применяют арматурную проволоку классов В-II, Вр-II, арматурные канаты классов К-7, К-19 и стержневую арматуру классов А-V и А-VI. Возможно использование для них стержневой арматуры классов А-IV и А-IIIв. В условиях воздействия агрессивной среды применяют стержневую горячекатаную арматуру класса А-IV и термомеханически упрочненную арматуру классов Ат-VIK; Ат-VСК, А-IVК. За нормативные сопротивления R_{sn} стержневой арматуры, высокопрочной проволоки и арматурных канатов принимают наименьшие контролируемые значения предела текучести σ_T или $\sigma_{0,2}$; для обыкновенной арматурной проволоки $R_{sn} = 0,75 \sigma_B$.

Для бетонных и железобетонных конструкций применяют конструкционные бетоны: тяжелый средней плотности 2200 – 2500 кг/м³; мелкозернистый средней плотности свыше 1800 кг/м³ легкий плотной и поризованной структуры; ячеистый автоклавного и неавтоклавного твердения; специальный бетон – напрягающий. В зависимости от назначения и условий работы бетоны различают по следующим основным показателям: классу по прочности на сжатие В (например, марки В1; В1,5; В2; В2,5; В5–В60); классу по прочности на осевое растяжение В_т, когда оно преобладает при нагружении (В_т 0,8; В_т 1,2 – В_т 3,2); марке по морозостойкости F (F15, F25– F500); марке по водонепроницаемости W для конструкций с требованием ограничения проницаемости (W2; W4– W12), марке по средней плотности для конструкций и дополнительным требованием теплоизоляции Д (Д 500; Д 600– Д 2000) и марке по самоупрочнению напрягающего бетона S_p (S_p 0,6; S_p 0,8– S_p 4).

В марке бетона по прочности на сжатие и осевое растяжение цифры обозначают значение гарантированной прочности бетона; в марке бетона по самоупрочнению – значение предварительного напряжения в бетоне, создаваемого при его расширении в процессе твердения. Буквенные индексы „В, В_т, S_p” указывают соответствующие классы.

Область применения основных видов арматуры в железобетонных конструкциях в зависимости от условий эксплуатации конструкций на открытом воздухе и в неоталливаемых объектах при различных расчетных температурах T и нагрузке.

Вид арматуры	Класс арматуры	Предел текучести, МПа, не менее	Марка стали	Диаметр арматуры, мм	Статическая				Динамическая и многократно повторяющаяся				
					До -30°C	$(-30) - (-40)^{\circ}\text{C}$	$(-40) - (-55)^{\circ}\text{C}$	$(-55) - (-70)^{\circ}\text{C}$	До -30°C	$(-30) - (-40)^{\circ}\text{C}$	$(-40) - (-55)^{\circ}\text{C}$	$(-55) - (-70)^{\circ}\text{C}$	
Стержневая горячекатаная гладкая	А-I	235	Ст3сп3	6-40	+	+	+	+	+	-	-	-	
			Ст3пс3	6-40	+	+	-	-	+	-	-	-	
			Ст3кп3	6-40	+	-	-	-	+	-	-	-	
			ВСт3сп2	6-40	+	+	+	+	+	+	+	+	
			ВСт3пс2	6-40	+	+	-	-	+	+	-	-	
			ВСт3кп2	6-40	+	-	-	-	+	-	-	-	
Стержневая горячекатаная периодического профиля	А-II	294	ВСт5сп2	6-18	+	+	+	+	+	+	-	-	
			ВСт5пс2	10-16	+	+	+	-	+	+	-	-	
			ВСт5кп2	18-40	+	-	-	-	+	-	-	-	
			18Г2С	40-80	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Ас-II	294	10ГТ	10-32	+	+	+	+	+	+	+	+	
			А-III	392	35ГС	6-40	+	+	+	-	+	+	-
					25Г2С	6-8	+	+	+	+	+	+	+
	А-IV	590	25Г2С	10-40	+	+	+	+	+	+	+	-	
			35Г2Рпс	6-22	+	+	+	-	+	+	-	-	
			80С	10-18	+	-	-	-	-	-	-	-	
20ХГ2Ц			10-22	+	+	+	+	+	+	+	+		
А-V	785	23ХГ2ГТ	10-32	+	+	+	+	+	+	+	+		
		А-VI	980	20ХГ2СР	10-22	+	+	+	+	+	+	+	
22ХГ2ГТАЮ	10-22			+	+	+	+	+	+	+			
22ХГ2Р	10-22			+	+	+	+	+	+	+			
Стержневая упрочненная вытяжная	А-IIIв	540	25Г2С	20-40	+	+	-	-	+	-	-	-	
			35ГС	20-40	+	-	-	-	-	-	-	-	

кой, периодическо-го профиля												
Стержневая термомеханически	Ат-IIIС	440	БСт5пс	10-22	+	+	+	-	+	+	-	-
упрочненная периодического профиля			БСт5сп	10-22	+	+	+	-	+	+	-	-
Стержневая термически упрочненная периодического профиля	Ат-IVС	590	25Г2С	10-28	+	+	+	+	+	+	+	-
	Ат-IVК	590	10ГС2	10-18	+	+	+	-	+	+	+	-
			20ХГС2	10-18	+	+	+	-	+	+	+	-
			08Г2С	10-18	+	+	+	-	+	+	+	-
	Ат-V	785	20ГС	10-28	+	+	+	-	+	+	+	-
			20ГС2	10-28	+	+	+	-	+	+	+	-
			10ГС2	10-28	+	+	+	-	+	+	+	-
			08Г2С	10-28	+	+	+	-	+	+	+	-
	Ат-VСК	785	20ХГС2	10-28	+	+	+	-	+	+	+	-
	Ат-VI	980	20ГС	10-28	+	+	+	-	+	+	+	-
			20ГС2	10-28	+	+	+	-	+	+	+	-
	Ат-VIK	980	20ХГС2	10-16	+	+	+	-	+	+	+	-
Обыкновенная арматурная проволока гладкая	В-I	-	-	3-5	+	+	+	+	+	+	+	+
Обыкновенная арматурная проволока периодического профиля	Вр-I	410	-	3	+	+	+	+	+	+	+	+
		405	-	4	+	+	+	+	+	+	+	+
		395	-	5	+	+	+	+	+	+	+	+
Высокопрочная арматурная проволока	В-II	1490-1100	-	3-8	+	+	+	+	+	+	+	+
	Вр-II	1460-1020	-	3-8	+	+	+	+	+	+	+	+
Арматурные каналы	К-7	1450-1295	-	6-15	+	+	+	+	+	+	+	+
	К-19	1410	-	14	+	+	+	+	+	+	+	+

Примечание. Знак „+“ означает, что применение допускается; знак „-“ – не допускается.

* Допускается применять только в вязаных каркасах и сетках.

** Применяют только в виде целых стержней мерной длины.

Таблица 14

Выбор класса бетона предварительно напряженных элементов в зависимости от вида и класса арматуры

Вид арматуры	Класс арматуры	Класс бетона, не ниже
Проволочная	B-II (при наличии анкеров)	B20
	Bp-II (без анкеров) диаметром, мм:	
	5	B20
	6 и более	B30
Стержневая	K-7 K-19	B30
	A-IV (без анкеров) диаметром, мм:	
	10 – 18	B15
	20 и более	B20
	A-V (без анкеров) диаметром, мм:	
	10 – 18	B20
	20 и более	B25
	A-VI (без анкеров) диаметром, мм:	
	10 – 18	B30
	20 и более	B30

Для железобетонных элементов из тяжелого и легкого бетонов, подвергающихся воздействию многократно повторяющейся нагрузки, и для железобетонных сжатых стержневых элементов из тяжелого, мелкозернистого и легкого бетонов назначают классы бетона по прочности на сжатие не ниже B15, а для сильнонагруженных железобетонных сжатых стержневых элементов – не ниже B25. Для предварительно напряженных элементов из тяжелого, мелкозернистого и легкого бетонов принимают класс бетона в зависимости от вида и класса арматурной стали (табл. 14).

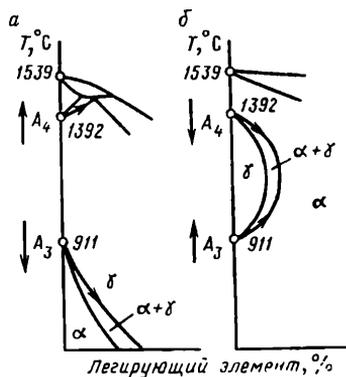
Сталь для деталей строительно-монтажных машин

Конструкционная легированная сталь. Легирующие элементы позволяют получать у легированных сталей широкий диапазон механических свойств после термической и других видов их обработки. Это объясняется влиянием легирующих элементов на все виды превращений в стали: на аллотропические превращения в железе, на карбидную фазу, на фазовые превращения при нагреве и охлаждении.

Все легирующие элементы преимущественно растворяются в основных фазах железоуглеродистых сплавов – в феррите, аустените, цементите. Ряд легирующих элементов (Mn, W, V, Ti, и др.) образуют специальные карбиды. Не образуют карбидов Ni, Si. Процесс растворения в этих

Рис. 47. Влияние легирующих элементов на критические точки A_3 и A_4 стали в диаграмме состояния железо – легирующий элемент:

a – открытая γ -область; b – закрытая γ -область (открытая α -область)



фазах происходят в результате замещения в их кристаллических решетках атомов железа атомами легирующих кристаллов.

Растворяясь в феррите, все легирующие элементы повышают прочность, понижают пластичность и вязкость стали. Они влияют также на аллотропические точки A_3 и A_4 (рис. 47), смещая их. При этом некоторые легирующие элементы (Mn, Ni) образуют открытую γ -область, в которой существуют от комнатной до температуры плавления сплавы с аустенитной структурой. Другие элементы (Cr, V, Mo, Ti и др.) образуют открытую α -область, в которой существуют от комнатной до температуры плавления сплавы с ферритной структурой (γ -область закрытая). Все элементы оказывают влияние на положение точки A_1 (одни ее повышают, другие – снижают).

Образующиеся в легированных сталях карбиды делятся на две группы. Карбиды группы I имеют сложную кристаллическую решетку. При нагреве они легко растворяются в аустените – Fe_3C , Mn_3C , $\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{C}$ и др. Карбиды группы II имеют простую кристаллическую решетку. Они трудно растворяются в аустените даже при высоком нагреве – Mo_2C , WC , VC , TiC и другие, что приводит к получению более мелкозернистой структуры стали с повышенной пластичностью и вязкостью.

Все карбидные фазы имеют высокую температуру плавления и твердения. В чистом виде они не существуют, так как атомы железа и легирующих элементов в них легко замещают друг друга, например $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Mn})_3\text{C}$. Элементы, не образующие карбидов (Ni, Si), а растворяющиеся в аустените, увеличивают его устойчивость, за исключением кобальта. Как можно видеть из рис. 48,а, С-кривая в этом случае располагается правее С-кривой для углеродистой стали. Поэтому легированные стали охлаждаются при закалке с меньшей скоростью, чем углеродистые, – в масле или на воздухе.

Карбидообразующие элементы не только замедляют распад аустенита, растворяясь в нем, но и изменяют вид С-кривой (рис. 48,б). На ней наблюдается две зоны минимальной устойчивости аустенита: в области

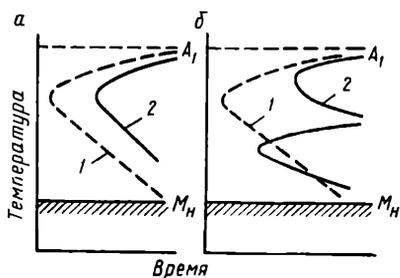


Рис. 48. Влияние легирующих элементов на диаграмму изотермического распада аустенита стали:

а — элементы не образуют карбидов; *б* — элементы образуют карбиды; 1 — углеродистая сталь; 2 — легированная сталь

образования перлитных и в области образования бейнитных структур.

Увеличивая устойчивость аустенита, все легирующие элементы уменьшают критическую скорость закалки V_k , увеличивают прокаливаемость стали.

Большинство элементов снижают точку M_{II} и увеличивают количество остаточного аустенита в структуре стали. Карбидообразующие элементы (за исключением марганца) препятствуют росту зерна при нагреве стали. Большинство легирующих элементов замедляют диффузионные процессы, происходящие при отпуске закаленной легированной стали и, следовательно, задерживают при этом падение ее твердости.

Легированную сталь поставляют в горячекатаном и кованом состоянии диаметром или толщиной до 250 мм, а также в виде калиброванной стали и серебрянки. Применяют ее для тяжело нагруженных деталей машин крупных размеров (более 10 — 15 мм). Маркируют эту сталь, как и низколегированную, цифрами и буквенными индексами. Качество стали дополнительно указывают в марке: А — высококачественная, Ш — особовысококачественная и без обозначения — качественная.

По наличию основных легирующих элементов сталь подразделяется на группы: хромистая, хромоникелевая, хромоникелевольфрамовая и др.

По назначению проката сталь подразделяется на подгруппы: а — предназначенная для горячей обработки давлением и холодного волочения; б — предназначенная для холодной механической обработки (обточки, строжки, фрезерования и др.).

В зависимости от вида упрочнения легированная сталь делится на цементуемую низкоуглеродистую и улучшаемую среднеуглеродистую легированную сталь.

Цементуемая легированная сталь (табл. 15), имеющая низкое содержание углерода (0,1—0,25%), подобно углеродистым сталям с низким содержанием углерода подвергают химико-термической обработке в сочетании с закалкой и низким отпуском. Это позволяет получать высокую прочность и износостойчивость поверхности стали при наличии вязкой и достаточно прочной сердцевины (20ХН, 12ХН3А, 20ХНР и др.)

Улучшаемая легированная сталь (табл. 16) имеет в своем составе 0,3 — 0,4 % углерода, примерно 3 — 5 % (в сумме) упрочняющих леги-

Таблица 15.

Химический состав цементуемой легированной стали, %

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Ni	Другие эле- менты
15X	0,12-0,18	0,17-0,34	0,4-0,7	0,7-1	—	—
15XA	0,12-0,17	0,17-0,37	0,4-0,7	0,7-1	—	—
20X	0,17-0,23	0,17-0,37	0,5-0,8	0,7-1	—	—
18XГ	0,15-0,21	0,17-0,37	0,9-1,2	0,9-1,2	—	—
18XГТ	0,17-0,23	0,17-0,37	0,8-1,1	1-1,3	—	Ti 0,03-0,09
20XГР	0,18-0,24	0,17-0,37	0,7-1	0,75-1,05	—	—
15XФ	0,12-0,18	0,17-0,37	0,4-0,7	0,8-1,1	—	V 0,06-0,12
15H2M	0,1-0,18	0,17-0,37	0,4-0,7	—	1,5-1,9	Mo 0,2-0,3
20H2M	0,17-0,25	0,17-0,37	0,4-0,7	—	1,5-1,9	Mo 0,2-0,3
20XH	0,17-0,23	0,17-0,37	0,4-0,7	0,45-0,75	1-1,4	—
20XHP	0,16-0,23	0,17-0,37	0,6-0,9	0,7-1,1	0,8-1,1	—
12XH2	0,09-0,16	0,17-0,37	0,3-0,6	0,6-0,9	1,5-1,9	—
12XH3A	0,09-0,16	0,17-0,37	0,3-0,6	0,6-0,9	2,75-3,15	—
12X2H4A	0,09-0,15	0,17-0,37	0,3-0,6	1,25-1,65	3,25-3,65	—
20XH3A	0,17-0,24	0,17-0,37	0,3-0,6	0,6-0,9	2,75-3,15	—
20X2H4A	0,16-0,22	0,17-0,37	0,3-0,6	1,25-1,65	3,25-3,65	—

рующих элементов (хром, никель, молибден, вольфрам, кремний, марганец) и 0,1% карбидообразующих элементов (ванадий, титан, ниобий, цирконий), приводящих к измельчению микроструктуры и повышению вязкости и пластичности стали (30XH, 30XГС, 40XH, 40XМФА и др.). Кроме того, в эту сталь можно добавлять молибден до 0,5 % или вольфрам до 1 % против падения ударной вязкости при отпуске (отпускной хрупкости).

Улучшаемую легированную сталь, как и углеродистую сталь со средним содержанием углерода, подвергают таким упрочняющим обработкам, как закалка в масле в сочетании с высоким отпуском при температуре 550–650 °С, термомеханическая обработка, изотермическая закалка, закалка ТВЧ, которые позволяют получать у стали наиболее благоприятное сочетание достаточно высокой прочности, хорошей пластичности и вязкости. Против отпускной хрупкости применяют также быстрое охлаждение при отпуске.

Для деталей машин наиболее широкое применение имеет сталь марок 15X, 20X, 30X–50X. Сталь марок 15X и 20X используют для изготовления цементуемых деталей (шестерни, валики, оси, поршневые пальцы, муфты, фланцы тарелки клапанов, звездочки и т. п.). Сталь марок 30X–50X применяют в термически улучшенном состоянии. Из стали марок 30X и 35X изготавливают шпильки и болты фланцевых соединений с температурой среды не выше 490–450 °С; из стали марки 38XA –

Таблица 16.

Химический состав улучшаемой легированной стали, %

Марка стали	C	Mn	Si	Cr	Ni	Другие элементы
40X	0,36-0,44	0,5-0,8	0,17-0,37	0,8-1,1	—	—
45X	0,41-0,49	0,5-0,8	0,17-0,37	0,8-1,1	—	—
50X	0,46-0,54	0,5-0,8	0,17-0,37	0,8-1,1	—	—
35XГФ	0,31-0,38	0,95-1,25	0,17-0,37	1-1,3	—	V 0,06-0,12
40XГТР	0,38-0,45	0,8-1	0,17-0,37	0,8-1,1	—	Ti 0,03-0,09 V < 0,005
30XM	0,26-0,34	0,4-0,7	0,17-0,37	0,8-1,1	—	Mo 0,15-0,25
30XMA	0,26-0,33	0,4-0,7	0,17-0,37	0,8-1,1	—	Mo 0,15-0,25
35XM	0,32-0,4	0,4-0,7	0,17-0,37	0,8-1,1	—	Mo 0,15-0,25
38XM	0,35-0,42	0,35-0,65	0,17-0,37	0,9-1,3	—	Mo 0,2-0,3
30X3MФ	0,27-0,34	0,3-0,6	0,17-0,37	2,3-2,7	—	Mo 0,2-0,3 V 0,06-0,12
40XMФА	0,37-0,44	0,4-0,7	0,17-0,37	0,8-1,1	—	Mo 0,2-0,3 V 0,1-0,18
40XФА	0,37-0,44	0,5-0,8	0,17-0,37	0,8-1,1	—	V 0,1-0,18
40XH	0,36-0,44	0,5-0,8	0,17-0,37	0,45-0,75	1-1,4	—
45XH	0,41-0,49	0,5-0,8	0,17-0,37	0,45-0,75	1-1,4	—
50XH	0,46-0,54	0,5-0,8	0,17-0,37	0,45-0,75	1-1,4	—
20XГСА	0,17-0,23	0,9-1,2	0,8-1,1	0,8-1,1	—	—
30XГС	0,28-0,34	0,8-1,1	0,9-1,2	0,8-1,1	—	—
30XГСА	0,28-0,34	0,8-1,1	0,9-1,2	0,8-1,1	—	—
35XГСА	0,32-0,39	0,8-1,1	1,1-1,4	1,1-1,4	—	—
30XГCH2A	0,27-0,34	1-1,3	0,9-1,2	0,9-1,2	1,4-1,8	—
38XГH	0,35-0,43	0,8-1,1	0,17-0,37	0,5-0,8	0,7-1	—
30XH2MA	0,27-0,34	0,3-0,6	0,17-0,37	0,6-0,9	1,25-1,65	Mo 0,2-0,3
38X2H2MA	0,33-0,4	0,25-0,5	0,17-0,37	1,3-1,7	1,3-1,7	Mo 0,2-0,3
40XH2MA	0,37-0,44	0,5-0,8	0,17-0,37	0,6-0,9	1,25-1,65	Mo 0,15-0,25
40X2H2MA	0,35-0,42	0,3-0,6	0,17-0,37	1,25-1,65	1,35-1,75	Mo 0,2-0,3
38XH3MA	0,33-0,4	0,25-0,5	0,17-0,37	0,8-1,2	2,75-3,25	Mo 0,2-0,3
30XH2MФА	0,27-0,34	0,3-0,6	0,17-0,37	0,6-0,9	2,0-2,4	Mo 0,2-0,3 V 0,1-0,18
36X2H2MФА	0,33-0,4	0,25-0,5	0,17-0,37	1,3-1,7	1,3-1,7	Mo 0,3-0,4 V 0,1-0,18
38XH3MФА	0,33-0,4	0,25-0,5	0,17-0,37	1,2-1,5	3-3,5	Mo 0,35-0,45 V 0,1-0,18
45XH2MФА	0,42-0,5	0,5-0,8	0,17-0,37	0,8-1,1	1,3-1,8	Mo 0,2-0,3 V 0,1-0,18
38X2MЮA	0,35-0,42	0,3-0,6	0,2-0,45	1,35-1,65	—	Mo 0,15-0,25 Al 0,7-1,1

шипели, валы; из стали марок 40X и 45X – тяжело нагруженные валы, штоки насосов, высокопрочные болты, конические шестерни редукторов, зубчатые колеса, кулачковые и зубчатые соединительные муфты, звездочки цепных передач и т. д. Сталь марки 40XФА применяют в улуч-

шенном состоянии (она является заменителем азотируемой стали марки 38Х2МЮА) для изготовления нагруженных валов, штоков для насосов и задвижек при температуре неагрессивной среды до 450 °С. Из стали марки 30ХМ после улучшения изготавливают валы центробежных насосов, оси, болты, шпильки при температуре среды не выше 525 °С, из стали марки 40ХН после улучшения (необходимо учитывать, что она обладает отпускной хрупкостью при температуре 450 – 550 °С) – наиболее ответственные детали (тяжелонагруженные валы, зубчатые соединительные муфты, звездочки цепных передач, оси талевых блоков и т. д.). Сталь марки 40ХН2МА (40ХНМА), менее склонную к отпускной хрупкости, применяют также для тяжелонагруженных ответственных деталей.

Цементуемую сталь 12ХН2 используют для поршневых пальцев компрессоров, валов, зубчатых соединительных муфт, звездочек, зубчатых передач и т. д. Сталь марки 18ХГТ применяют как после улучшения, так и после цементации для тяжелонагруженных деталей (валы, шестерни коробок передач, оси, червячные механизмы и т. д.); сталь марок 20ХГСА и 30ХГС – после термической обработки для пружин клапанов компрессоров, валиков, осей, зубчатых колес, кулачков соединительных муфт, а также для крепежных изделий при температуре среды до 400 °С; сталь марки 38Х2МЮА – после азотирования с последующей термической обработкой для деталей, работающих в условиях абразивного износа. Сталь марки 20ХНЗА, склонную к отпускной хрупкости, – после улучшения или после цементации. После цементации ее используют для тяжелонагруженных деталей, работающих при высоких скоростях и ударных нагрузках (шестерни, валики, зубчатые колеса, кулачковые муфты и т. д.).

Пружинно-рессорная сталь (табл. 17) обладает особыми свойствами, так как служит для смягчения толчков и ударов, действующих на конструкции в процессе работы. Основное требование, предъявляемое к пружинно-рессорной стали, – высокий предел упругости и выносливости. Применяют в качестве пружинно-рессорных некоторые углеродистые стали и стали, легированные элементами, повышающими предел упругости (Si, Mn, Cr W). Такими сталями являются стали марок 70, 65Г, 60С2, 50ХГ, 50ХФА, 65С2ВА, 70С2ХА. После закалки рессорных листов и пружин применяют отпуск при температуре 400 – 500 °С (в зависимости от марки стали). Это необходимо для получения структуры тростита отпуска с наиболее высоким пределом упругости.

Основная *шарикоподшипниковая сталь* – сталь марки ШХ15. Высокое содержание в ней углерода (0,95 – 1,05 %) и хрома (1,3 – 1,65 %) обеспечивает получение после закалки в масле в сочетании с низким отпуском высокой равномерной твердости, устойчивости против истирания, необходимой прокаливаемости и достаточной вязкости. Применяют также сталь марок ШХ6, ШХ9, ШХ15СГ и другие с содержанием хрома в среднем соответственно 0,6; 0,9; 1,5 %.

Таблица 17.

Химический состав пружинно-рессорной стали, %

Марка стали	C	Si	Mn	Другие элементы
70	0,67-0,75	0,17-0,37	0,5-0,8	Cr ≤ 0,25
65Г	0,62-0,7	0,17-0,37	0,9-1,2	Cr ≤ 0,25
60С2	0,57-0,65	1,5-2	0,6-0,9	Cr ≤ 0,3
50ХГ	0,46-0,54	0,17-0,37	0,7-1	Cr 0,9-1,2
50ХФА	0,46-0,54	0,17-0,37	0,5-0,8	Cr 0,8-1,1 V 0,1-0,2
6С2ВА	0,61-0,69	1,5-2	0,7-1	Cr ≤ 0,3 W 0,8-1,2
60С2Н2А	0,56-0,64	1,4-1,8	0,4-0,7	Cr ≤ 0,3 Ni 1,4-1,7
70С2ХА	0,65-0,75	1,4-1,7	0,4-0,6	Cr 0,2-0,4

На качество стали и срок службы подшипников вредно влияют ликвация, полосчатость и сетка карбидов, а на структурную однородность стали — неметаллические (сульфидные и оксидные) и газовые включения, макро-и микропористость, поэтому сталь каждой плавки тщательно контролируют по микроструктуре.

Термическая обработка подшипниковой стали включает операции отжига, закалки и отпуска. Цель отжига — снизить твердость и получить структуру мелкозернистого перлита. Температура закалки 830 — 860 °С, охлаждение в масле. Отпуск при температуре 150 — 160 °С. Твердость после закалки и отпуска HRC 62 — 65; структура — бесструктурный (скрытокристаллический) мартенсит с равномерно распределенными мелкими избыточными карбидами.

Для изготовления деталей крупногабаритных подшипников диаметром более 400 мм, работающих в тяжелых условиях при больших ударных нагрузках, применяют цементуемую сталь марки 20Х2Н4А. Детали крупногабаритных подшипников (кольца, ролики) из стали этой марки подвергают длительной цементации с получением слоя глубиной 5—10 мм, а затем термической обработке (закалка и низкий отпуск).

Высокомарганцовистая износоустойчивая сталь марки Г13 содержит 1,2 % С и 13 % Мп (ее называют сталью Гадфильда). Она относится по микроструктуре к аустенитному классу и обладает высоким сопротивлением износу при трении с повышенным давлением и ударами. Характерным для нее является то, что высокая износоустойчивость сочетается с высокой прочностью и низкой твердостью: $\sigma_B \sim 1000$ МПа и НВ 200 — 250, в противоположность закаленным инструментальным сталям, в которых сопротивление износу обусловлено высокой твердостью. Высокая износоустойчивость стали марки Г13 объясняется упрочнением (наклепом) аустенита при пластической деформации при повы-

шенных давлений в процессе работы, в результате которого он в поверхностном слое превращается в мартенсит. По мере износа этого слоя мартенсит образуется в следующем слое и т. д. При отсутствии повышенных давлений, например при абразивном износе, эта сталь не имеет достаточно высокой износоустойчивости. Применяют ее обычно в литом виде марки Г13Л (реже – в горячедеформированном) после термической обработки на аустенитную структуру (закалка при температуре 1050 – 1100 °С в воде) для козырьков ковшей землеройных машин, черпаков и т. п. Имеются также стали с высокой кавитационной стойкостью (поверхностное разрушение стальных деталей под действием потока жидкости или газа). Примером таких сталей является сталь марки 30X10Г10 (0,3 % С; 10 % Cr и 10 % Mn).

15. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

Инструментальные стали применяют для изготовления трех основных групп инструмента: режущего, измерительного и штампов. В связи с различными условиями работы инструмента к инструментальным сталям предъявляют определенные требования.

Сталь для режущего инструмента (резцы, сверла, метчики, фрезы, протяжки и т. д.) должна обладать высокой твердостью, превышающей твердость обрабатываемого материала; износоустойчивостью; теплоустойчивостью, т. е. способностью стали сохранять при нагреве рабочей кромки, возникающем в эксплуатации, структуру и свойства, необходимые для резания.

Сталь для измерительного инструмента (гладкие и резьбовые калибры и др.) должна быть твердой и длительное время сохранять размеры и форму инструмента.

Штампы служат для деформирования металла в холодном и горячем состояниях. Сталь для штампов холодного деформирования (вытяжные, гибочные, высадочные штампы и др.) должна иметь высокую твердость, износоустойчивость и достаточную вязкость. Сталь для штампов горячего деформирования (ковочные, прошивные, абразивные штампы, молоты и др.) должна иметь высокие механические свойства, сохраняющиеся при повышенных температурах, и глубокую прокаливаемость.

Сталь для режущих инструментов. Режущий инструмент изготавливают из высокоуглеродистых, легированных и быстрорежущих сталей.

Высокоуглеродистые стали являются заэвтектоидными сталями марок У9 (0,9 % С), У10 (1 % С), У11 (1,1 % С), У12 (1,2 % С). Перед закалкой эту сталь отжигают по одному из режимов отжига на зернистый перлит. Для получения высокой твердости (HRC 60 – 64) ее закалывают в воде с температуры 770 – 810 °С, но, несмотря на быстрое охлаждение, инструмент прокаливают на небольшую глубину – диаметром до 10 – 12 мм. Структура после закалки – мартенсит и цементит. Отпуск

проводят при температуре 160 – 240 °С в зависимости от назначения инструмента и требуемой твердости. Высокая твердость закаленной стали сохраняется при нагреве (отпуске) до температуры 200 °С, поэтому режущая кромка инструмента из углеродистых инструментальных сталей в процессе работы не должна нагреваться выше температуры 200 °С.

Сталь марки У9 применяют для пожевочных полотен, сталь марок У10, У11, У12 – для различного металлорежущего инструмента (сверла, метчики, развертки, фрезы, плашки и др.), сталь марки У13 для напильников.

Легированные стали марок Х, 9ХС, ХВГ, ХГСВФ содержат в среднем 1 и 0,9 % С и имеют повышенное содержание хрома, что значительно увеличивает прокаливаемость. Сталь марки Х прокаливают в масле насквозь в сечении до 25 мм (твердость в середине не ниже HRC 60), а сталь марки У10 – только в сечении до 5 мм. Сталь марки Х применяют для токарных, строгальных и долбежных резцов в лекальных и ремонтных мастерских. Сталь марки 9ХС кроме хрома легирована кремнием. По сравнению со сталью марки Х она имеет большую прокаливаемость (до 35 мм), повышенную теплостойкость (до температуры 250 – 260 °С), лучшие режущие свойства при более равномерном распределении карбидов. Из стали марки 9ХС изготавливают сверла, развертки, фрезы, метчики, плашки. Сталь марки ХВГ легирована хромом, вольфрамом и марганцем. Она имеет большую прокаливаемость (до 45 мм), чем сталь марки 9ХС. Сталь марки ХВГ малдеформирующаяся и глубоко прокаливающаяся. Ее применяют для крупных и длинных протяжек, метчиков, разверток и т. д. Сталь марки ХГСВФ сложнoleгированная и по сравнению со сталью марок 9ХС и ХВГ лучше закаливается и прокаливается. При охлаждении в масле она прокаливается насквозь в сечении до 80 мм. Сталь менее чувствительна к перегреву. Теплостойкость ее такая же, как у стали марки 9ХС. Сталь марки ХГСВФ применяют для круглых плашек, разверток, крупных протяжек и другого режущего инструмента.

Быстрорежущие стали используют для режущего инструмента, работающего при высоких скоростях резания, в тяжелых условиях. Качество резцов, сверл и других инструментов зависит от качества быстрорежущей стали, тщательности изготовления инструмента и от термической обработки. Быстрорежущие стали являются сложнoleгированными, имеют высокие теплостойкость (до температуры 620 – 640 °С) и износостойчивость.

Применяют стали марок: P18 (0,7 % С; 18 % W; 4 % Cr; 1 % V), P6M5 (0,9 % С; 6 % W; 5 % Mo; 4 % Cr; 2 % V), P9M5, P14Ф4, P9K5, P9K10, P10K5Ф5 и P18K5Ф2. Быстрорежущие стали обозначают буквой „P”, затем следует цифра, указывающая среднее содержание вольфрама. Буквы „К, М, Ф” и цифры после них указывают среднее содержание

элементов: кобальта, молибдена, ванадия. Литую быстрорежущую сталь подвергают горячей обработке (прокатке, ковке), а затем отжигу при температуре 830 – 850 °С на твердость НВ 207 – 255.

Микроструктура отожженной быстрорежущей стали – сорбитообразный перлит (феррит + мелкие эвтектоидные карбиды) и избыточные карбиды (вторичные и первичные). Легирующие примеси находятся в быстрорежущей стали растворенными в феррите и в виде карбидов.

Для закалки быстрорежущую сталь нагревают до высоких температур, например, сталь P18 до температуры 1270 – 1300 °С. Процесс закалки быстрорежущей стали состоит из медленного нагрева (подогрева) до температуры 800 – 850 °С, выдержки при этой температуре, быстрого (окончательного) нагрева до температуры закалки 1300 °С, кратковременной выдержки и охлаждения (обычно в масле).

Для увеличения легированности аустенита окончательный нагрев проводят до высокой температуры закалки, так как в данном температурном интервале большая часть карбидов растворяется в аустените. Структура при температуре 1300 °С – аустенит + карбиды.

При охлаждении (закалке) быстрорежущей стали аустенит распадается с образованием мартенсита, но не весь, часть его (25 – 30 %) сохраняется в виде остаточного аустенита. Поэтому структура после закалки представляет собой мартенсит + карбиды + остаточный аустенит. Твердость после закалки HRC 62. После закалки быстрорежущую сталь подвергают отпуску при температуре 550 – 570 °С, в результате происходит выделение из мартенсита карбидов ванадия и вольфрама (дисперсионное твердение мартенсита), а также превращение остаточного аустенита в мартенсит, в связи с чем твердость быстрорежущей стали получается более высокой (HRC 64).

Обычно отпуск быстрорежущей стали дается двух- или трехкратный длительностью по 1 ч при каждом отпуске. Точка M_K быстрорежущей стали располагается ниже нуля. Поэтому для устранения остаточного аустенита быстрорежущую сталь можно обрабатывать холодом (при температуре –75 – 80 °С). В этом случае вместо трехкратного дается однократный отпуск. Микроструктура нормально закаленной и отпущенной быстрорежущей стали состоит из мартенсита и карбидов.

Для улучшения режущих свойств и повышения стойкости инструмент из быстрорежущих сталей подвергают низкотемпературному (при температуре 540 – 570 °С) цианированию: жидкостному, газовому или твердому. В результате низкотемпературного цианирования на поверхности быстрорежущей стали образуется тонкий (0,02 – 0,07 мм) диффузионный слой, имеющий высокую твердость (HV 1000 – 1100) и повышенную теплоустойчивость (~ 650 °С).

Сталь для измерительных инструментов. Применение нашли стали марок X, ХВГ и др. Их подвергают закалке и низкому отпуску. Для измерительного инструмента (особенно высоких классов точности)

большое значение имеет постоянство размеров закаленного инструмента в течение длительного времени. Это связано с уменьшением тетрагональности решетки мартенсита, мартенситным превращением остаточного аустенита и уменьшением и перераспределением внутренних напряжений. Поэтому при термической обработке измерительного инструмента большое внимание уделяют стабилизации напряженного состояния мартенсита и остаточного аустенита. Это достигается соответствующим режимом низкого отпуска – при температуре 120 – 130 °С в течение 12 – 50 ч и обработкой при температуре ниже нуля (до –60 °С).

Штамповая сталь подразделяется на сталь для инструментов холодного и горячего деформирования.

Штампы холодного деформирования небольших размеров (диаметром 25 – 30 мм), простой формы, работающие в легких условиях, изготавливают из углеродистых сталей марок У10, У11, У12, а штампы диаметром 75 – 100 мм более сложной формы и для тяжелых условий работы – из сталей повышенной прокаливаемости марок Х, ХВГ

Для штампов с высокой твердостью и повышенной износостойкостью, а также малой деформируемостью при закалке применяют стали с высокой прокаливаемостью, например, сталь марки Х12Ф1 (1,25 – 1,45 % С; 11 – 12,5 % Cr; 0,7 – 0,9 % V). Закалку проводят при температуре 1080 – 1100 °С или 400 – 475 °С с охлаждением соответственно в масле или соляной ванне, а затем на воздухе с получением минусовых размеров (за счет повышенного количества остаточного аустенита). Для доводки до требуемых размеров проводят одно или многократный отпуск при температуре 475 – 500 °С.

Для инструмента, подвергающегося в работе ударным нагрузкам (пневматические зубила, обжимки, ножницы при холодной резке металла), применяют стали с меньшим содержанием углерода (в среднем 0,4 % С), с повышенной вязкостью марок 4ХС, 6ХС, 4ХВ2С и др. Эти стали закалывают в масле при температуре 840 – 900 °С и отпускают при температуре 240 – 270 °С с получением твердости HRC 50 – 55.

Для штампов горячего деформирования (молотов) используют стали марок 5ХНМ, 5ХГМ, 5ХНВ, содержащие одинаковое количество углерода (в среднем 0,5 %) и хрома (1 %), что позволяет получить достаточно высокие ударную вязкость, прочность и прокаливаемость. Никель вводят в эти стали для повышения вязкости и улучшения прокаливаемости. Вольфрам и молибден повышают твердость и теплостойкость, уменьшают отпускную хрупкость, измельчают зерно и снижают склонность стали к перегреву. Марганец, как более дешевый легирующий элемент, является заменителем никеля (5ХГМ).

Для сталей молотовых штампов характерна глубокая прокаливаемость: например, стали марок 5ХНМ и 5ХГМ прокаливают в сечениях до 200 – 300 мм. Температура закалки (820 – 860 °С), темпера-

тура отпуска (500 – 580 °С) и твердость после отпуска (HRC 35 – 45) зависят от марки стали и размера штампа.

Стали марок 3Х2В8Ф, 5Х3В3МФС и другие применяют для вытяжных и высадочных штампов, а также пресс-форм (литье под давлением). К этим сталям предъявляют повышенные требования по теплоустойкости и меньше – по прокаливаемости. Для растворения сложных карбидов эти стали при закалке нагревают до высоких температур (1050 – 1100 °С) и охлаждают в масле. Затем проводят отпуск при температуре 560 – 650 °С. Твердость после термической обработки HRC 45 – 50.

16. ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ

Твердыми сплавами называют сплавы на основе карбидов тугоплавких металлов: вольфрама (WC, W₂C), титана (TiC), ванадия (VC), тантала (TaC), ниобия (NbC), хрома Cr₂C₂, Cr₇C₃, Cr₄C и других, обеспечивающих высокую их твердость и износостойчивость. Твердые сплавы повышают срок службы различного инструмента и деталей машин. Применяют твердые сплавы напайванием пластин из них на державку из углеродистой стали или путем наплавки (армирования). В трубопроводном строительстве твердые сплавы используют для упрочнения режущих элементов землеройных машин, ножей буровых головок машин горизонтального бурения и других элементов трубопроводно-строительных машин.

Широкое применение нашли твердые сплавы для повышения износостойкости уплотнительных поверхностей деталей различной трубопроводной арматуры. При армировании твердыми сплавами поверхностей деталей их стойкость повышается в 10 раз. Кроме того, армирование позволяет в ряде случаев заменить легированные стали простой углеродистой сталью или чугуном.

Современные твердые сплавы в зависимости от способа изготовления могут быть разделены на четыре основных типа: литые, спекаемые (металлокерамические), зернообразные и электродные (наплавочные).

17. СТАЛИ И СПЛАВЫ С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ

Сталями и сплавами с особыми свойствами являются: жаростойкие и жаропрочные марок 15X5 (0,15 % С и 5 % Сч), 15X28 (0,15 % С и 28 % Сч), имеющие окалинстойкость до температуры 700 и 1100 °С соответственно; марок 15ХМ, 12Х1МФ, не теряющие прочность при температуре 400 – 500 °С; более сложнелегированные на никелевой основе марок ХН77ТЮР и ХН55ВМТФКЮ, не теряющие прочности при температуре 800 – 1000 °С (лопатки турбин); коррозионно-стойкие (нержавеющие) стали и сплавы марок 12Х13, 12Х17, 08Х17Т с

содержанием хрома не менее 12 %; марок 12Х18Н8, 12Х18Н9Т, 04Х18Н10, имеющие аустенитную структуру благодаря высокому содержанию хрома и никеля, и другие.

Применяют стали и сплавы и с другими особыми и специальными свойствами – магнитными, тепловыми, упругими и т. д.

Контрольные вопросы

1. Какие Вы знаете углеродистые стали в зависимости от их качества?
2. По каким группам и с какими гарантируемыми характеристиками поставляют сталь углеродистую обыкновенного качества в зависимости от ее назначения?
3. На какие категории подразделяется каждая группа А, Б и В стали углеродистой обыкновенного качества? По какому признаку?
4. Дайте примеры применения стали углеродистой обыкновенного качества для строительных конструкций и деталей монтажно-строительных машин.
5. На какие подгруппы подразделяется сталь углеродистая конструкционная качественная в зависимости от назначения?
6. По каким категориям поставляют сталь углеродистую конструкционную качественную в зависимости от гарантируемых механических свойств?
7. Какие марки углеродистой конструкционной качественной стали применяют для газонефтепроводов? Какой их диаметр? Какого способа изготовления эти трубы?
8. Какие применяют методы упрочнения различных марок стали углеродистой конструкционной качественной, используемой для деталей монтажно-строительных машин в различных рабочих условиях?
9. По каким группам и классам прочности поставляют низколегированную сталь? Как ее маркируют?
10. На какие категории подразделяется низколегированная сталь? По каким характеристикам?
11. Охарактеризуйте принцип создания марок низколегированной стали повышенной и высокой прочности. Их применение.
12. По каким признакам классифицируют сталь арматурную? Принцип ее маркировки. Применение.
13. На какие виды подразделяется легированная конструкционная сталь в зависимости от вида ее упрочнения? Ее применение.

18. СТАЛЬНЫЕ ТРУБЫ

Основной вид труб для газонефтепроводов – стальные трубы. Большая несущая способность, высокая стабильность механических и технологических свойств достигнута благодаря совершенствованию технологии их изготовления и внедрения в нее разнообразных испытаний, а особенно 100 %-ного неразрушающего контроля качества сварных швов и металла. Это также позволило сделать трубы наиболее надежными и долговечными. Другие виды труб (чугунные, алюминиевые, железобетонные, асбоцементные, пластмассовые и т.д.) являются заменителями стальных труб, которые по способу изготовления делятся на бесшовные горячекатаные и сварные с продольным прямым швом (прямошовные), спиральным швом (спиральношовные), многослойные и др.

В зависимости от назначения и гарантируемых характеристик стальные трубы общего назначения, которые используют и для газонефтепроводов, поставляют по группам А, Б, В, Г и Д. Соответственно каждая группа имеет свои определенные гарантируемые характеристики: А – механические свойства; Б – химический состав; В – механические свойства и химический состав; Г – химический состав, контроль механических свойств на термически обработанных образцах; Д – только прочность при испытании гидравлическим давлением. Для газонефтепроводов поставляют по группе В бесшовные горячекатаные и сварные прямошовные и спиральношовные трубы. Также используют термически обработанные трубы по группе Г. В каждой группе гарантируется прочность при гидравлическом испытании.

Бесшовные горячекатаные трубы применяют для сооружения магистральных газонефтепроводов и отводов от них, городских газопроводов, трубопроводов для подачи нефти и газа на промыслах диаметром менее 530 мм. Электросварные прямошовные трубы используют для тонкостенных газонефтепроводов диаметром до 1420 мм и выше. Размеры трубопроводов ограничиваются технико-экономическими показателями их строительства. Электросварные спиральношовные трубы применяют для магистральных трубопроводов диаметром 530–1420 мм.

Бесшовные горячекатаные трубы

Процесс изготовления труб включает две стадии: изготовление заготовки трубы в виде проштампованной гильзы (стакана); последующее формование трубы до заданной формы и размеров горячей прокаткой.

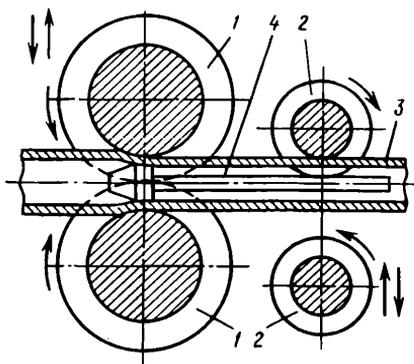


Рис. 49. Схема прокатки трубы на автоматическом двухвалковом стане:

1 — рабочий валок; 2 — ролик обратной подачи; 3 — труба; 4 — стержень с оправкой

Прошивку слитков для получения заготовок труб (гильз) осуществляют на косовалковых станах с валками различных видов или на прессах в нагретом состоянии. Особенности процесса прошивки слитка на косовалковых станах — нарушение его сплошной сердцевины и образование осевой полости. Это происходит в процессе обжатия и вращения нагретого слитка между специальными бочковидными валками, расположенными под углом друг к другу, при осевой подаче слитка навстречу жестко закрепленной оправке. Полученная заготовка представляет собой гильзу. Более толстостенные гильзы (стаканы) получают прошивкой нагретых слитков или заготовок на прессах.

Далее гильзы или стаканы подвергают горячей прокатке на различных трубопрокатных установках, чаще всего на автоматических двухвалковых и пилигримовых станах для получения труб необходимых форм и размеров.

Трубопрокатные установки с автоматическим двухвалковым станом по своим типовым размерам подразделяются на малые, средние и большие для прокатки труб диаметром соответственно 50–140, 114–219 и 140–426 мм. На автоматических двухвалковых станах (автомат-станах) осуществляют продольную прокатку в два-три прохода гильзы на короткой оправке между валками, образующими круглый калибр (рис. 49). При подаче гильзы в валки происходит ее обжатие по толщине и диаметру. После первого прохода верхний рабочий валок поднимается, при этом включаются ролики обратной подачи путем подъема нижнего ролика, и гильза возвращается в исходное положение для второго прохода.

За долгие годы существования этот способ прокатки совершенствовался и достиг высокой степени автоматизма. Например, для нагрева слитков используют кольцевые печи с вращающимся подом (рис. 50), механизирована замена оправок и т.п. Разработаны двухклетьевые автоматические станы: раскатку гильз в трубу проводят за один проход на коротких оправках в двух последовательно расположенных двухвалковых клетях с одноручьевыми валками. После прокатки труба снимается

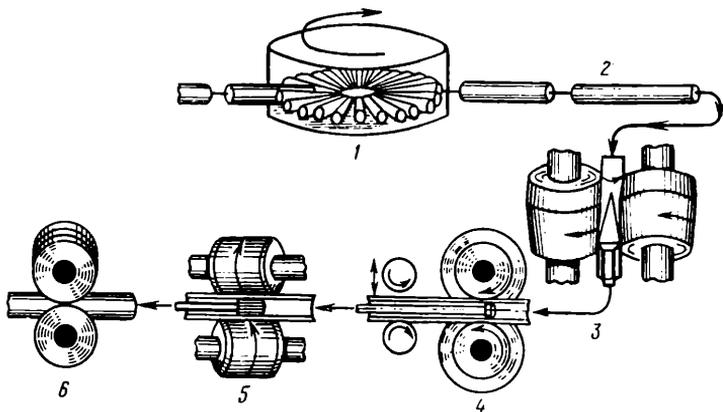


Рис. 50. Схема рабочей линии трубопрокатной установки с автоматическим станом:

1 — нагрев заготовки в кольцевой печи; 2 — зацентровка заготовки; 3 — прошивка заготовки (слитка) в гильзу; 4 — прокатка гильзы в трубу на автоматическом стане; 5 — раскатка трубы в обкатной машине; 6 — калибровка трубы в калибровочном стане

с оправки приводными роликами. Применение таких станов позволяет ликвидировать возвратное движение трубы на стане, что приводит к повышению производительности и качества труб.

Для производства бесшовных горячекатаных труб средних и больших размеров практически любой длины широкое применение имеют установки с пилигримовым станом. По типоразмерам они подразделяются на малые, средние и большие для прокатки труб диаметром соответственно 22–140, 140–325 и 325–720 мм. На этих установках для прошивки слитков вместо косовалковых станов применяют прессы, благодаря чему сократились дефекты труб по внутренним пленам и уменьшилась разностенность труб. Однако по сравнению с автоматическими станами пилигримовые установки имеют более низкую производительность и дорогостоящий прокатный инструмент — валки сложного сечения.

Гильза 1 на оправке (дорне) 3 подается в холостую часть валков 2, захватывается или обжимается постепенно суживающейся рабочей частью валков (рис. 51). При этом подающий гильзу механизм препятствует обратному выталкиванию гильзы с оправкой из валков. По мере вращения пилигримовых валков стана гильза выходит из рабочей части калибра и попадает в его холостую часть. В этот период вращения валков гильза с оправкой перемещается вперед на расстояние подачи с помощью подающего аппарата и поворачивается относительно своей продольной оси на угол 90° . Валки далее захватывают новую часть гильзы, и весь процесс пилигримовой прокатки повторяется. Трубы получаются с волнистой по-

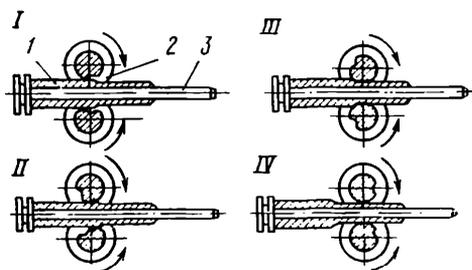


Рис. 51. Схема прокатки гильзы в трубу: I, II, III, IV – последовательность стадий вращения шлифовальных валков

верхностью, так как обжатие гильзы на дорне в процессе прокатки осуществляется на протяжении всей ее длины периодически, путем обработки отдельных участков гильзы в круглом калибре переменного размера. По окончании прокатки оправку извлекают, трубу разрезают на необходимые размеры и передают после подогрева в калибровочный стан, далее в стан горячей правки, а затем на остывание и отделку.

Обрезая кромки труб, им придают форму, предусмотренную стандартом, техническими условиями или заказом. Трубы должны быть правильной формы, но получить по всей их длине одинаковый, строго цилиндрический профиль очень трудно. Для сборки и сварки во многих случаях бывает достаточно, если труба имеет правильную форму и точные размеры лишь по концам, на длине 300–500 мм. Поэтому при окончательной заводской отделке концы труб калибруют, что уменьшает предельные их отклонения и дает возможность применять на трассе различные сборочные приспособления и механизированные методы сварки. Каждую трубу, предназначенную для газонефтепроводов, подвергают гидравлическому испытанию на прочность, осмотру, обмеру, маркировке.

Прямошовные сварные трубы

Наиболее распространенный способ изготовления прямошовных сварных труб диаметром до 820 мм и толщиной стенки до 13 мм – холодное формование труб из бесконечной рулонной ленты в многоклетевом формовочном стане с последующей электроконтактной сваркой кромок продольного шва заготовки трубы. Можно также использовать сварку токами высокой или повышенной частоты и другие методы сварки.

На подготовительной стадии рулон ленты разматывают, правят, обрезают его концы перед стыковкой с лентой очередного рулона, а затем сваривают этот стык и снимают с него грат. Для обеспечения непрерывности процесса из-за сварки концов ленты предыдущего и последующего рулонов создают петлеобразователь (колодец), где всегда имеется необходимый запас ленты (рис. 52). Боковые кромки ленты обрезают ножницами.

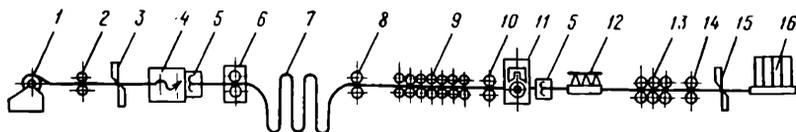


Рис. 52. Схема технологического процесса изготовления электросварных прямошовных труб диаметром до 820 мм:

1 – разматыватель ленты; 2 – подающие ролики; 3 – ножницы; 4 – стыкосварочная машина концов ленты; 5 – гратосниматель; 6 – подающие ролики; 7 – петлеобразователь; 8 – правильная машина; 9 – формовочный стан; 10 – направляющая клеть; 11 – трубосварочный стан; 12 – охладитель; 13 – калибровочный стан; 14 – правка; 15 – летучий трубоотрезной станок; 16 – стеллаж труб

Формовочный стан представляет собой многоклетьевую машину из приводных рабочих горизонтальных и неприводных вертикальных валков. Рабочие горизонтальные валки имеют изменяющийся от клетки к клетке профиль открытого калибра (рис. 53,а) для предварительного формования заготовки трубы и изменяющийся профиль закрытого калибра валков (рис. 53,б) для окончательного (отделочного) формования трубы. Длину формовочного стана и число формовочных клеток выбирают таким образом, чтобы кромки заготовки плавно поднимались в калибрах валков от клетки к клетке и не было у них перегибов, гофр, т.е. чтобы не было остаточных деформаций кромок, вызванных подъемом кромок при формовке трубной заготовки.

После сварки и снятия грата бесконечно длинную трубу охлаждают в жидкостном охладителе и подвергают правке и калибровке в калибровочном стане, а затем разрезают с помощью трубоотрезного станка на трубы заданной длины. Готовые трубы передают на гидравлическое испытание, осмотр, обмеры и маркировку.

Сварные прямошовные трубы диаметром 530–1420 мм изготавливают из листовой заготовки двумя методами: холодным формованием на прессах (прессованием) и вальцеванием (гибкой).

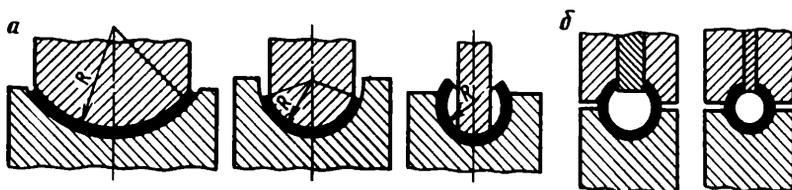


Рис. 53. Схема формования прямошовной трубы в открытом (а) и закрытом (б) калибрах валков (R – радиус изгиба заготовки)

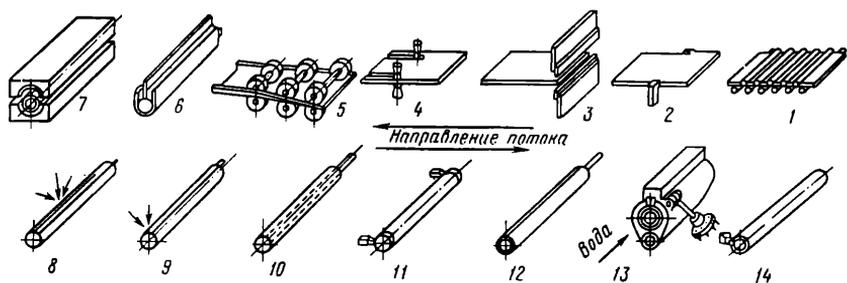


Рис. 54. Схема технологического процесса изготовления электросварных прямошовных труб:

1 — правка листа; 2 — обрезка кромок; 3 — обрезка переднего и заднего концов листа; 4 — очистка кромок; 5 — загиб кромок; 6 — предварительная формовка в U-образную форму; 7 — окончательная формовка в O-образную форму; 8 — наружная сварка; 9 — приварка технологических планок; 10 — внутренняя сварка; 11 — обрезка торцов; 12 — снятие валика (усиления) внутреннего шва на концах труб; 13 — калибровка и испытание; 14 — снятие фасок

Изготовление электросварных труб (рис. 54) методом холодного прессования осуществляют на мощных гидравлических прессах. Основное достоинство метода — возможность формования заготовок большой длины и высокая его производительность.

Стальные листы после правки, например, на валковых машинах поступают на кромкострогальные станки. Здесь обе кромки одновременно обрабатывают неподвижно установленными резцами. Листу сообщается поступательное движение. Затем края листа очищают от окалины и ржавчины на расстояние до 70 мм, после чего подгибают кромки по радиусу, соответствующему радиусу готовой трубы. Очистку проводят металлическими щетками, приводимыми во вращение от электродвигателя, или при помощи дробеметной или дробеструйной установки. Дробеметная установка представляет собой проходную камеру непрерывного действия, через которую проходит лист для очистки. Камера состоит из двух секций, оборудованных верхними и нижними дробеметными аппаратами, бункерами, элеваторами, сепараторами, питателями и приводными поддерживающими роликами для транспортировки листа. Поверхность листов очищает струя чугушной дроби, выбрасываемая дробеметным колесом.

Подгибают кромки на ширину 400 мм на валковых кромкогибочных станах и получают корытообразные заготовки труб. Кромкогибочный стан состоит из четырех клеток: задающей с цилиндрическими валками и трех рабочих гибочных с профилированными валками. Подача листа в гибочные клетки происходит благодаря силам трения, возникающим между вращающимися валками задающей клетки и листом. Прижим

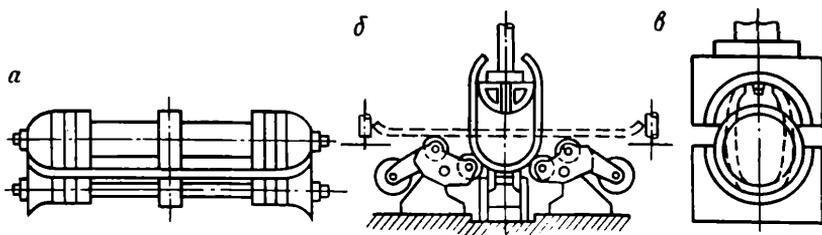


Рис. 55. Формование трубы из листовой заготовки:

а – подгибка кромок; *б* – получение U-образной заготовки; *в* – получение O-образной заготовки

и подъем валков осуществляются пневматическим цилиндром. Рабочие валки состоят из продольного вала, по середине которого расположен центральный диск, а по краям насаживаются профильные диски. Используя сменные рабочие валки гибочных клетей, можно подгибать листы при изготовлении труб различных диаметров. Известны и другие машины для подгибки кромок.

Формование трубы из листовой заготовки методом холодного прессования осуществляют на гидравлических прессах в две стадии: в U-образную и O-образную формы (рис. 55). Пресс предварительной формовки развивает усилие 19 600 или 17 640 кН. Он состоит из двух одинаковых гидравлических четырехколонных прессов, соединенных друг с другом балкой и имеющих общую подвижную траверсу. На траверсе закреплены сменные штампы (пуансоны), профиль штампа соответствует диаметру формируемой заготовки. На общей для обоих прессов нижней балке с обеих сторон расположено по шесть секций роликов гибки. В зависимости от размеров заготовки ролики можно сближать и раздвигать в поперечном направлении. В каждой секции роликов имеется груз, который возвращает ролики в исходное положение при подъеме штампа и заготовки. Подъем заготовки вверх после формовки осуществляется четырьмя пневматическими подъемниками с роликами, по которым следующая заготовка выталкивает согнутую в U-образную форму заготовку на подъемный рольганг перед прессом окончательной формовки. Корытообразной заготовке трубы на прессе предварительной формовки придают U-образную форму с помощью штампа и подвижных гибочных роликов. Длина штампа равна длине формируемой трубы.

Окончательную O-образную форму трубы создают на еще более мощном прессе в двух полуцилиндрах-штампах. Верхний штамп – подвижной, нижний – неподвижный. Пресс окончательной формовки развивает усилие 196 000 или 156 800 кН. Он состоит из шести двухколонных прессов, установленных на двух общих основаниях по три на каждом. Каждый из шести двухколонных прессов состоит из верхней неподвижной траверсы с цилиндром, подвижной траверсы с укрепленной

верхней половиной штампа и основанием, в котором уложена нижняя половина штампа. Внутри нижнего штампа простроган восьмигранный, в котором устанавливают сменный инструмент (вкладыш) в зависимости от размера формируемой трубы. Подвижные траверсы всех шести прессов направляются по двум колоннам и соединены с плунжерами главных цилиндров.

Трубную U-образную заготовку подают в пресс подающим устройством; в нижней части штампа расположены ролики, по которым она перемещается. Формовку O-образной заготовки трубы осуществляют в закрытом круглом калибре прессы при опускании верхней половины штампа за один ход прессы. Подвижную траверсу после рабочего хода поднимают с помощью возвратных цилиндров. Сформованная заготовка приподнимается в штампе специальными роликами и выдвигается из прессы следующей заготовкой. При переходе на другой размер труб заменяют сменные вкладыши нижнего штампа и верхний штамп. Обжатие заготовки трубы по периметру допускается в пределах 0,2–0,6 %.

Сформованные заготовки трубы O-образной формы передают с помощью передвижных рольгангов на сварочную установку. К концам труб перед сваркой приваривают технологические планки, на которых после зажигания дуги остаются сварочные кратеры, удаляемые затем вместе с планками.

Сварку O-образных заготовок труб диаметром 530–820 мм проводят на установках автоматической сварки под флюсом, где сваривают продольный шов сначала с наружной стороны, а затем с внутренней. O-образные заготовки труб диаметром 1020–1420 мм подают сначала на установку для сварки технологического шва, на которой смещение кромок предотвращается благодаря применению внешних клетей. Технологический шов накладывают непрерывно сварочным автоматом с двумя головками в среде защитного газа. Шов служит также для защиты ванны расплавленного металла при последующей сварке рабочего шва под флюсом и, таким образом, способствует предотвращению образования дефектов.

Сварку рабочего шва под флюсом проводят в один слой со сваркой подварочного шва, т.е. сначала проваривают внутренний слой до технологического шва, затем выполняют подварочный шов снаружи. При этом технологический шов полностью расплавляется.

При сварке под флюсом применяют многоэлектродную сварку, при которой до трех–четырех электродов последовательно располагают так чтобы образовалась только одна сварочная ванна. За счет специальной сконструированных сварочных машин большой производительности обеспечивается высокая стабильность всех сварочных параметров: сила тока, напряжения, скорости сварки, шага электродов, угла между электродами и разделкой под сварку, высоты и ширины слоя флюса. Это имеет особое значение для равномерного качества сварного шва. Трубы рас

полагают на тяжелых сварочных тележках, обеспечивающих безвибрационное и плавное прохождение труб под сварочными автоматами.

После сварки каждую трубу подвергают тщательному визуальному контролю снаружи и изнутри, прежде всего в зоне сварного шва. Кроме того, сварной шов по всей длине трубы проверяют с помощью ультразвука. Этот вид испытания и рентгеновское просвечивание служат для выявления дефектов.

✓ Калибровку труб, т.е. доводку их размера и формы, осуществляют экспандированием – расширением трубы внутренним гидравлическим давлением, превышающим испытательное. Экспандирование труб проводят на прессах-расширителях в специальной разъемной цилиндрической секционной обойме-штампах общей длиной, равной длине трубы. С обеих сторон обоймы располагают силовые головки, закрывающие трубу с концов. Работой пресса-расширителя управляют при помощи гидравлической системы. Пластическая деформация металла труб при экспандировании не должна превышать 1,2 %.

Перед экспандированием торцы труб обтачивают и на внутренних их концах снимают усиление сварного шва на длину 150–200 мм, так как в трубу с обоих концов вставляют заглушки-конусы силовых головок с приспособлениями. При этом через одну головку подают воду под давлением для расширения трубы, а через другую выпускают воздух из трубы. Когда стенки трубы в процессе экспандирования прижмутся к внутренней поверхности обоймы, труба достигает максимального диаметра. Это является пределом экспандирования и дает возможность получить трубу заданного диаметра и точной формы, а также исключить неравномерную деформацию металла трубы в процессе ее расширения под давлением воды.

После экспандирования проводят гидравлическое испытание трубы. При этом в трубе снижают давление до давления, несколько меньшего испытательного. Затем обоймы раскрывают и одновременно, с созданием и поддержанием испытательного давления, специальное устройство с молоточками обстукивает трубу, как это требуется при гидравлическом испытании. Эти испытания проводят при давлении, доводящем трубу почти до предела текучести и значительно превышающем будущее рабочее давление. Во время испытания давление и время выдержки регистрируют с помощью самописца.

После очистки и сушки труб следует второе ультразвуковое испытание по всей длине сварного шва. Отмеченные дефектоскопом участки, а также концы труб подвергают рентгеновскому контролю.

Затем трубы до визуального контроля наружной и внутренней поверхностей контролируют методом магнитопорошковой дефектоскопии.

На последней стадии производства с обоих концов труб за один зажим снимают фаску одновременно для того, чтобы оба конца трубы рас-

полагались перпендикулярно к ее оси и плоскопараллельно относительно друг друга. Это также является важным условием для выполнения качественной сварки кольцевых швов.

✓ Трубы диаметром 1020 мм и выше собирают из двух полуцилиндрических заготовок. В этом случае такие заготовки формуют на тех же гидравлических прессах, что и цилиндрические заготовки. Меняют лишь формующий инструмент. Подготовительные операции листов остаются прежними.

Технологический процесс изготовления труб диаметром 1020 мм и более из двух полуцилиндров включает правку листов, строжку их кромок, подгибку кромок, предварительную формовку заготовок, окончательную формовку заготовок в виде полуцилиндров, сборку полуцилиндров, сварку наружного и внутреннего швов, обрезку кратерных участков и торцовку труб, фрезерование усиления внутреннего шва, раздачу и гидроиспытание на экспандере.

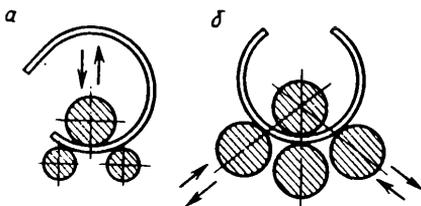
Установка для сборки трубных заготовок из двух полуцилиндров состоит из расположенных с двух сторон подводящих рольгангов с выравнивающим устройством, с помощью которого оба полуцилиндра захватывают, поворачивают на угол 90°, соединяют продольными кромками и затем с помощью цепного заталкивателя подают в первый сварочный стан для наложения наружного шва. Скорость подачи полуцилиндров в сварочный стан цепным заталкивателем должна быть несколько выше скорости сварки.

Прямошовные трубы диаметром 530 мм и других размеров с применением метода холодного вальцевания изготавливают из листовой заготовки. При такой формовке лист подвергают двум операциям: подгибке кромок на кромкогибочной машине и формовке трубной заготовки на гибочных вальцах. Стальные листы подают со склада на кромкострогальную машину для строжки продольных кромок и снятия фаски на них под сварку. Затем на очистной машине дробебетного или щеточного типа очищают края листов, а кромки подгибают по радиусу готовой трубы. Далее заготовки формуют в трубу цилиндрической формы на трех или четырех валковых гибочных вальцах (рис. 56).

При изготовлении труб диаметром свыше 820 мм перед формовкой трубной заготовки на гибочных вальцах два узких листа собирают в карту и сваривают их на отдельных участках. Сборку и прихватку листов, а также приварку технологических планок осуществляют на специальном стане, состоящем из сварной рамы, прижимной траверсы с медными пластинами, рабочего и задающего рольгангов и двух однодуговых сварочных автоматов с флюсоаппаратурой.

Листы с задающего рольганга подают на рабочий рольганг до упоров так, чтобы стык продольных кромок листов находился на оси прижимной траверсы. Рабочим рольгангом выравнивают торцы листов с одного края, чтобы они составляли прямую линию, сводят листы до со-

Рис. 56. Схема формовки трубной заготовки на трех- (а) и четырехвалковых (б) гибочных вальцах



прикосновения продольных кромок с зазором не более 1 мм и поджимают их к раме прижимной траверсой. К концам листов у края стыка однодуговым автоматом приваривают технологические планки, после чего концы стыкуемых листов сваривают на длину 100 мм. После этого осуществляют сварку продольных кромок на участках длиной 25—50 мм, удаленных друг от друга на расстояние от 150 до 700 мм,

Картосварочный стан обрудован так же, как стан для сборки карт.

Удалив шлаковую корочку со швов и зачистив протечи металла, листы, собранные в карту, подают на картосварочный стан до упоров так, чтобы стык листов оказался на оси прижимной траверсы, которая с помощью цилиндров поднимается кверху и поджимает листы к раме стана. Медные пластины траверсы служат подкладкой при сварке и предотвращают протекание металла. Листы сваривают двухдуговым автоматом под флюсом.

После сварки первого шва карту подают в кантователь, где ее переворачивают на 180° вдоль длинной оси, и затем передают на второй стан для наложения второго шва двумя дугами.

Подгибку кромок на кромкогибочной машине ведут в следующей последовательности: сваренную карту приводными роликами подают в машину так, чтобы передний конец шаблона перекрывал карту на 200—300 мм; карту центруют с помощью вспомогательных цилиндров, которые подводят шаблоны к карте; включают цилиндры прижимных балок, с их помощью продольные кромки карты прижимают к шаблонам; включают гибочные цилиндры и шаблоны, накатываясь на края карты, подгибают кромки одновременно на всей длине карты с двух сторон; после завершения процесса гибки прижимная балка опускается в исходное положение и ролики выдают освобожденную от прижима карту из машины; шаблоны возвращаются в исходное положение.

Кромки карты сразу подгибают по всей длине на одну ширину и одним радиусом. После подгибки кромок карту очищают от флюсовой корки и остатков флюса. Технологические планки с концов трубы обрезают.

Лист или карту формуют в трубную заготовку обычно на четырехвалковых гибочных вальцах, дающих лучшие результаты. Четырехвалковые гибочные вальцы состоят из двух станин с четырьмя валками. Опорами верхнего рабочего валка служат откидывающийся и шарнир-

ный корпус. Откидывающийся корпус установлен со стороны, противоположной приводу; для снятия трубной заготовки с верхнего вала его откидывают, а верхний валок поворачивают на угол до 4° . Верхний валок – приводной. Нижний рабочий и гибочные боковые валки имеют вертикальное перемещение. Вращение нижнего рабочего и гибочных валков осуществляется от верхнего приводного вала благодаря силам трения между изгибаемым листом и валками.

Карту подают по стеллажу на подъемный стол машины, максимальный угол подъема которого равен 45° . По наклонным роликам стола карта скатывается в валки машины. В момент начала формовки продольная кромка карты должна быть параллельна боковому валку. Формовку ведут при минимальной раскатке карты в машине. Для этого нижний валок включается в работу только при первом проходе карты, при выравнивании кромок заготовки или в случае пробуксовки карты в валках при гибке между верхним и боковыми валками.

В настоящее время на станах с формовкой трубных заготовок на гибочных вальцах принят следующий порядок технологических операций после формовки заготовок на четырехвалковых гибочных вальцах: предварительная сварка труб на станах предварительной сварки; сварка внутреннего шва на трубосварочном стане; сварка наружного шва на трубосварочном стане; удаление флюса и шлаковой корки из труб; инспекция и ремонт труб с дефектами шва; контроль на дефектоскопе продольных швов труб; обрезка концов труб, удаление кратерных участков шва; снятие валика внутреннего сварного шва на фрезерных станках; раздача и испытание труб гидростатическим давлением на прессе-расширителе. После гидравлического испытания проводят контроль качества и ремонт труб, вырезку дефектных участков и снятие фаски у труб на трубообрезном станке, а затем стыковую сварку двух труб длиной 6 м в трубу длиной 12 м. Концы сварных труб, предназначенных для изготовления магистральных трубопроводов, калибруют на длине 200 мм.

Для магистральных трубопроводов прямошовные трубы изготавливают следующих видов: из листовой стали контролируемой прокатки диаметром 1420, 1220 и 1020 мм; из листовой нормализованной стали диаметром 1220 и 1020 мм; из листовой горячекатаной стали диаметром 820, 720 и 530 мм; из рулонной горячекатаной стали диаметром до 530 мм.

Спиральношовные трубы

Трубы изготавливают из стальной рулонной ленты путем сворачивания ее по спирали в непрерывную трубу. Спиральношовные трубы малых (до 530 мм) и средних (530–820 мм) диаметров формируют с двухсторонним сварным швом на специальном трубном стане (рис. 57), включающем в

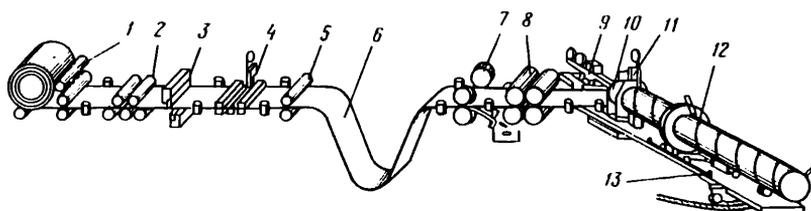


Рис. 57. Схема расположения оборудования трубозлектросварочного стана 1020 для изготовления спиральношовных труб

себя линию подготовки полосы и формовочно-сварочное устройство, в котором смонтированы вместе формовочная машина и сварочные головки.

Линия подготовки полосы состоит из следующих основных узлов: разматывателя 1; правильной машины 2, на которой рулонированная лента выправляется в плоскую; ножниц 3 для обрезки концов рулона; стыкосварочной машины 4, сваривающей конец предыдущего рулона с началом последующего; подающих роликов 5; петлеобразователя 6, который позволяет при стыковании лент не останавливать процесс формовки и сварки труб; ножниц 7 для обрезки боковых кромок ленты; кромкообрабатывающего устройства, на котором строгаются и разделяются кромки ленты до заданных размеров и фаски под сварку спирального шва; подающей машины с вводными проводками 8 формовочно-сварочного устройства. Обрезанные и состыкованные концы рулонов соединяют в непрерывную полосу на стыкосварочной машине сначала односторонней сваркой под флюсом. Сварочную головку, флюсоаппарат, катушки электродной проволоки устанавливают на самоходной тележке, перемещающейся вдоль свариваемых кромок. Сварку проводят без технологических планок, так как кратеры сварочной дуги отрезают далее вместе с кромками дисковыми ножницами. Усиление шва не снимают. Поскольку полосы в формовочно-сварочное устройство подают снизу, корень стыкового шва лент располагается снаружи трубы, и его потом в трубоотделочном отделении подвергают зачистке, разделке и сварке на специальной установке. По ходу движения ленты установлены вертикальные роликовые проводки, обеспечивающие ее правильное движение без выпучивания.

Формовочно-сварочное устройство состоит из формовочной машины 10 полувтулочного типа; сварочных головок 9 и 11 для выполнения двухстороннего спирального шва; летучего отрезного станка 12, оборудованного специальными резаками.

Формовочная машина установлена на опорно-поворотной раме 13 и перемещается относительно вертикальной оси опорного узла, идущей от точки пересечения оси подготовительной линии и продольной оси голов-

ной трубы в плане. Рама одним концом опирается на ролики опорного узла, установленного на фундаменте, и другим концом перемещается с помощью катков по криволинейным рельсовым путям. С этой подвижной стороны к раме крепят выходной мост, состоящий из отдельных тележек, скрепленных жесткой рамой. При изменении угла формовки происходит перемещение тележек на катках по криволинейным рельсовым путям вместе с рамой. На тележках крепят цилиндрические ролики, образующие отводящий рольганг выходного моста.

Для удержания сформованной трубы по оси отводящего рольганга по его бокам располагают поддерживающие ролики, выставляемые на определенную высоту по диаметру трубы при настройке стана.

Формовочная машина выполнена в виде оребренной втулки, насаженной на ось поворота выходного моста. Ее фиксируют под необходимым углом формовки относительно подготовительной линии стана. Ось выходного моста совпадает с осью формовочной втулки.

Стальная лента входит в формовочную машину с одной стороны и, сворачиваясь по спирали, выходит из нее в виде готовой трубы с другой стороны на отводящий рольганг выходного моста, совершая поступательно-вращательное движение.

Для изготовления спиральношовных труб большого диаметра (1020—1420 мм) с разматывателя полосу с помощью вспомогательной системы подающих роликов передают на установку для поперечной резки. Конец уходящей полосы и передний конец следующей полосы обрезают под прямым углом и обе полосы соединяют между собой путем наложения одного слоя сваркой под флюсом. Далее полоса проходит правку в правильно-роликовом устройстве, обрезку кромок полосы с обеих сторон дисковыми ножницами. Затем кромки обрабатывают ротационными фрезерными головками так, чтобы в зависимости от толщины стенки получалась оптимальная фаска под сварку.

Перед формовкой трубы подгибают кромки полосы. Формовку полосы в трубу осуществляют по типу трехвалковой гибочной машины. Гибочные валки скомпонованы в виде целого ряда поворотных роликов, угол задачи которых устанавливают бесступенчато. Угол задачи α , ширина полосы B и диаметр трубы D связаны формулой $\sin \alpha = B/\pi D$.

Зазор между обеими кромками формируемой трубы поддерживают постоянным с помощью автоматической системы регулирования.

Сразу же после формовки труб в момент схождения кромок сваривают внутренний шов. Во избежание появления трещин процесс сварки начинают только тогда, когда кромки уже больше не перемещаются относительно друг друга. Для этого после формовки создана опора для полосовой спирали. Соблюдение допусков по диаметру, овальности, кривизне бесконечной трубы обеспечивают применением звездобразной оправки, представляющей собой шайбу, оснащенную роликами. Ролики ра-

сположены в осевом направлении и могут смещаться по высоте в зависимости от внутреннего диаметра трубы.

Через полшага спирали по окончании сварки внутреннего шва сваривают наружный шов. В зависимости от диаметра и толщины стенки трубы для сварки применяют один, два или три электрода.

Контроль сварного шва, а также тела трубы по всей ширине полосы осуществляют ультразвуком на стане.

Бесконечную трубу разрезают плазменной резкой на мерные длины.

Выполненный вначале только один слой сварного шва при стыковке концов полос подваривают снаружи автоматической сваркой под флюсом. После этого проводят визуальный контроль поверхностей труб и сварного шва и снятие фасок на концах труб, а затем гидравлическое испытание труб, при котором давление и время выдержки назначают в зависимости от размеров и рабочего давления.

Неразрушающий сдаточный контроль ультразвуком охватывает сварной шов и концы труб со снятыми фасками по всему периметру труб. Рентгеновский контроль сварного шва осуществляют на концах труб и на участках, получивших отметки ультразвукового контроля, а также на сварных стыках полос. В заключение проводят еще раз визуальный контроль наружной и внутренней поверхностей, а также размеров труб.

Прочность и надежность спиральношовных труб, в частности, против лавинного разрушения можно повысить при изготовлении их из двух слоев ленты. Технологический процесс изготовления двухслойных спиральношовных труб (рис. 58) состоит в совместной формовке двух наложенных друг на друга полос со смещенными в горизонтальной плоскости кромками и раздельной сварке сначала технологических швов в среде углекислого газа, а затем рабочих швов под слоем флюса. Для производства двухслойных труб применяют обычный рулонный металл. К полосе внутреннего слоя трубы предъявляют повышенные требования к качеству металла.

Сварочный зазор при сварке двухслойных труб может достигать 4 мм по сравнению с 0,8–0,1 мм для однослойных труб. Это связано с тем, что сварку каждого из слоев проводят на своеобразной подкладке второго слоя, препятствующей протеканию металла из сварочной зоны и прожогу шва. Менее жесткие требования к сварочному зазору между сопрягаемыми при формовке кромками полос и первым витком трубы уменьшают влияние серповидности исходных полос на точность и стабильность формовки.

На линиях подготовки полосы проводят размотку рулонов, правку и сварку полос, обрезку концов и разделку кромок, очистку поверхности листов и др. В полосе наружного слоя специальными летучими станками сверлят перфорационные отверстия диаметром 10–12 мм, которые при аварийном разрыве в трубопроводе внутреннего слоя играют роль

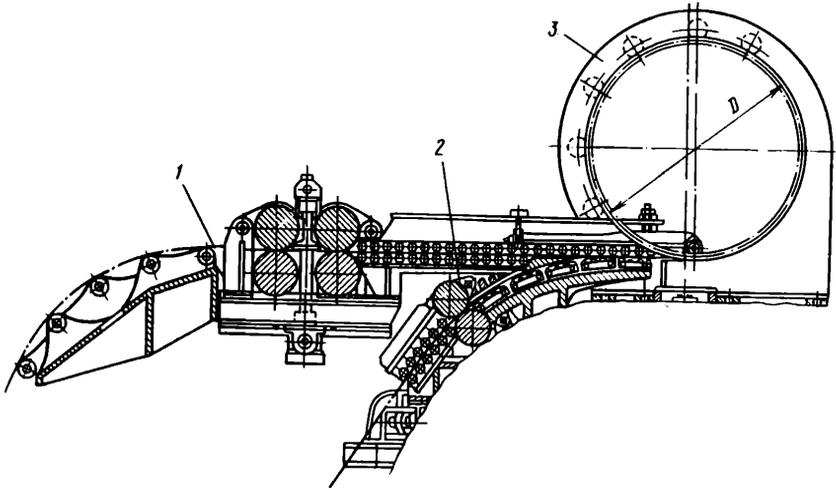


Рис. 58. Схема стана для изготовления двухслойных спиральношовных труб:

1 — линия подачи одной полосы; 2 — линия подачи второй полосы; 3 — формовочное устройство

своеобразных гасителей давления. Полоса внутреннего слоя проходит в линии подготовки 100 %-ный автоматический ультразвуковой контроль.

Особенностью изготовления спиральношовных труб является то, что формовочно-сварочное оборудование очень компактно, легко позволяет из ленты одной ширины (за счет изменения угла навивки спирали и применения соответствующего формовочного устройства) изготавливать трубы правильной формы и точных размеров, определенного диапазона диаметров без дополнительной правки и экспандирования.

Спиральношовные трубы дешевле прямошовных, так как стальная лента на 20–35 % дешевле широколистовой стали. При этом достигается экономия металла (примерно на 10 %) за счет снижения его расхода на обрезку после прокатки, уменьшения допусков по толщине и отходов при обрезке концов труб. Простота оборудования и небольшие капитальные затраты при строительстве цеха по изготовлению труб со спиральным швом являются их преимуществом по сравнению с изготовлением прямошовных труб. За счет спирального шва труба становится более жесткой, лучше сохраняет цилиндрическую форму при транспортировке. При эксплуатации трубопровода из спиральношовных труб главные напряжения располагаются под углом к направлению прокатки ленты, что повышает работоспособность металла.

Преимуществом спиральношовных труб также является то, что в процессе их изготовления металл труб практически не изменяет своих пластических и вязких свойств, а сам процесс производства труб легко

поддается механизации и автоматизации. Кроме того, металл спиральношовных труб работает в более благоприятных условиях, чем металл прямошовных труб, так как волокна его катаной структуры направлены под углом навивки к продольной оси трубы. Недостатком спиральношовных труб считают большую протяженность сварных швов по сравнению с прямошовными трубами, спиральношовные трубы нельзя гнуть, они плохо копируют местность.

Для магистральных трубопроводов спиральношовные трубы изготовляют следующих видов: из горячекатаной рулонной стали диаметром 530—820 мм; термически упрочненные диаметром 820, 1020, 1220 и 1420 мм или с локальной термической обработкой сварных швов диаметром 1020 и 1220 мм (формируют их из горячекатаной рулонной стали); толстостенные диаметром 1420 мм из последовательно стыкуемых стальных листов контролируемой прокатки; двухслойные трубы диаметром 1420 и 1220 мм, формируемые из рулонной стали с одновременной подачей двух стальных лент в формовочно-сварочное устройство с двух самостоятельных подготовительных линий или навивкой на обычную спиральношовную трубу второго слоя рулонной стали в направлении, противоположном навивке первого слоя.

Многослойные трубы

В СССР Институтом электросварки им. Е.О. Патона разработаны электросварные многослойные трубы принципиально новой конструкции с приваренными по концам кольцами (обечайками) со сплошной стенкой. Они предназначены для строительства магистральных газопроводов на рабочее давление до 10 МПа и выше. Многослойные электросварные трубы изготовляют из рулонной стальной полосы.

Специальным конвейером рулоны подают к разматывателю, оборудованному тянущими роликами, направляющими полосу в правильную машину. Передний конец выправленной полосы обрезают на ножницах. Отслоившуюся окалину и ржавчину удаляют с обеих сторон полосы вращающимися стальными щетками. После очистки полосу контролируют автоматическим ультразвуковым дефектоскопом, помечающим краской участки с дефектами. Акустический контакт датчиков дефектоскопа с металлом полосы осуществляют с помощью воды. После ультразвукового контроля полоса проходит сушильную камеру для удаления с поверхности остатка влаги.

Дисковые ножницы обрезают продольные кромки, а дробеструйная установка очищает сверху и снизу по 100 мм с краев полосы по ширине для получения качественных кольцевых швов при дальнейшей сварке трубы. Непрерывную полосу раскраивают на мерные длины, из которых далее навивают обечайку. Перед навивкой передний конец полосы с помощью специального пресса подгибают по радиусу навивки, что

обеспечивает его равномерное и плотное прилегание к последующему слою.

На входных рольгангах навивочных машин сверлят перфорационные отверстия — по два отверстия с каждой стороны на каждом витке обечайки, кроме первого. Обечайку навивают на барабан моталки регулируемого диаметра. Число слоев обечаек зависит от требуемой толщины стенки трубы и толщины каждого слоя. На полностью навитой обечайке проводят прихватку сваркой по торцам внутреннего и наружного витков. Снятые с барабана обечайки транспортируют к установке для сварки наружных нахлесточных швов.

Сварочный аппарат осуществляет автоматическую двухдуговую комбинированную сварку. Первая дуга горит в атмосфере защитного газа, вторая — под слоем флюса. Начальные и конечные участки шва выводят на приставные медные планки.

В специальном устройстве обечайки очищают от флюсовой корки и остатков флюса и подают на гидромеханический экспандер, где проводят их раздачу для устранения межслойных зазоров и получения необходимого внутреннего диаметра. После этого обечайки подают на установку для автоматической сварки внутренних нахлесточных швов. Сварку осуществляют под слоем флюса. Затем удаляют остатки флюса и флюсовой корки из внутренней полости обечаек, проводят автоматический ультразвуковой контроль качества внутреннего нахлесточного шва. Герметичность внутренних нахлесточных швов дополнительно проверяют на установке вакуум-пузырькового контроля. Перед испытанием поверхность шва смачивают индикаторным раствором. На контролируемый участок с помощью пневмоцилиндра устанавливают и прижимают вакуум-камеру, в которой создают разряжение. Через верх камеры наблюдают за появлением пульсирующих пузырьков, которые являются признаком дефекта.

Далее торцы обечаек подготавливают под сварку и подают на установку сборки и сварки их в трубу кольцевыми технологическими швами автоматической дуговой сваркой в среде защитных газов. Электромеханический копир обеспечивает автоматическое направление электрода по стыку. Технологический шов накладывают в зазоре между кромками, не превышающем 1 мм.

Собранную трубу подают на установку для автоматической сварки под флюсом внутренних кольцевых швов в один проход. Одновременно сваривают три кольцевых шва. После сварки внутренних кольцевых швов и удаления флюсовой корки и флюса трубу передают на установку с шестью сварочными аппаратами для сварки наружных швов. Сварку выполняют за один оборот трубы. Все шесть наружных кольцевых швов сваривают одновременно.

После зачистки сварных швов от флюсовой корки трубы контролируют рентгеновской телевизионной установкой. Места пересечения

кольцевых и нахлесточных швов дополнительно проверяют на вакуумной установке. Затем трубы подвергают внутреннему и наружному осмотру (и при необходимости ремонту) и подают на гидравлический пресс для испытаний. После этого у труб снимают фаски по торцам и их направляют на участок осмотра, приемки и маркировки.

На строительстве трубопроводов проходят испытания четырех- (5,4 мм×4 слоя) и пятислойные (5,2 мм×5 слоев) трубы. Концевые обечайки со сплошной стенкой имеют длину не менее 1500 мм и толщину стенки не менее номинальной толщины стенки многослойной части трубы.

Продольные нахлесточные швы наружного и внутреннего витков обечайек проваривают не менее чем на два слоя, не считая нахлеста, составляющего не менее 150 мм. Прилегание слоев многослойных обечайек должно быть плотным с зазором не более 0,1 мм.

Сделанные на каждом слое обечайки (кроме внутреннего) перфорационные отверстия обеспечивают возможность уменьшения давления в межслойном пространстве (гасители разрушений). Это делает трубу практически неразрушимой при случайных воздействиях: транспортного, строительного или эксплуатационного характера.

Вместе с тем многослойные трубы отличаются пониженной устойчивостью к действию монтажных нагрузок: изгибающих моментов, местных сосредоточенных сил.

Многослойные трубы поставляют следующих размеров по внутреннему диаметру: 990 мм толщиной стенки 16–25 мм, 1190 мм толщиной стенки 16–28 мм, 1380 мм толщиной стенки 19,6–32 мм. Длина труб составляет 10–11,6 м. Допускается поставка труб длиной 24 м, полученных путем стыковки и сварки двух труб длиной 10–11,6 м.

Каждую трубу подвергают гидравлическому испытанию давлением, вызывающим в стенке трубы напряжение, равное 95 % от гарантируемого предела текучести. Испытанию не подвергают трубы длиной до 24 м, полученные путем стыковки труб длиной 10–11,6 м, прошедших испытание. Стыковой шов труб длиной до 24 м проверяют физическими неразрушающими методами.

Трубы с гофрами

Институтом электросварки им. Е.О. Патона предложены и совместно с Миннефтегазстроем СССР и ВНИИметмашем разработаны спиральношовные трубы диаметром 530–820 мм с пониженной продольной жесткостью, что достигается формовкой в стенке трубы гофр, расположенных по винтовой линии. Гофры обеспечивают местную компенсацию продольных деформаций от изменения температуры, внутреннего давления и других воздействий, например деформации грунтов, что позволяет сооружать прямолинейные участки трубопроводов для перекачки подо-

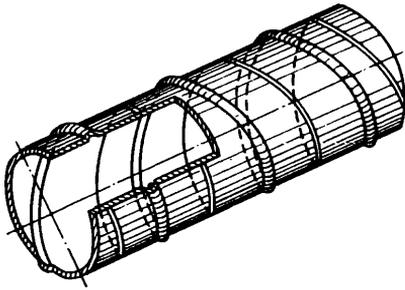


Рис. 59. Труба с гофром по винтовой линии

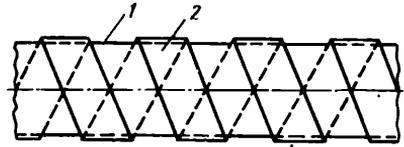


Рис. 60. Бандажированная труба:

1 — основная труба; 2 — лента из высокопрочной стали (бандаж)

гретых нефтей, мазута без установки специальных компенсирующих устройств. Поэтому трубы с винтовыми гофрами, а также трубопроводы на их основе получили название самокомпенсирующиеся. Они предназначены на рабочие давления 1,5–5,5 МПа при перепадах температур 80–170 °С.

Трубы с винтовым расположением гофров представляют собой оболочку сложной формы (рис. 59).

Гофр профилируют на рулонной полосе непосредственно перед формовкой трубы. В стенке трубы, например, толщиной 6–8 мм можно сформовать винтовой гофр с шагом 300–800 мм. В этом случае гофр компенсирует температурные удлинения участка трубопровода в пределах шага винтовой линии. Максимальные перемещения трубопровода вблизи гофра-компенсатора составляют несколько десятков миллиметра, т.е. самокомпенсирующийся трубопровод воспринимает значительные температурные деформации практически без смещений его участков, что особенно важно при подземной прокладке. Из-за пониженной жесткости труб с гофрами, продольные усилия в самокомпенсирующемся трубопроводе от воздействия температурного перепада в значительной степени уменьшаются по сравнению с гладкостенным. Гидравлическое сопротивление труб с гофрами практически не отличается от гидравлического сопротивления гладкостенных труб.

Бандажированные трубы

В нашей стране и в ряде зарубежных стран известны двухслойные предварительно напряженные трубы, получившие название бандажированных труб. Например, во внутренней (основной) стальной трубе (рис. 60) создают остаточные напряжения сжатия путем обмотки трубы проволокой или полосой (бандаж) из высокопрочной стали. При этом бандаж за-

крепляют сваркой у торца и наматывают на трубу плотно, с большим натягом.

Расстояние между витками проволоки или ленты принимают с учетом действия остаточных напряжений. На монтаже трубопроводов сваривают только основные трубы (внутренние оболочки). Наличие остаточных напряжений в бандажированной трубе приводит к повышению несущей ее способности, снижению толщины стенки и расхода стали. Кроме того, уменьшается склонность труб к хрупкому разрушению, так как наличие остаточных напряжений сжатия в металле будет способствовать затормаживанию развития возникающих очагов разрушения (трещин).

Перспективные направления совершенствования производства труб большого диаметра

Формовка трубной заготовки на непрерывных трубоформовочных станах. Формование прямошовных труб большого диаметра из листовой заготовки на гидравлических прессах связано с установлением громоздких, большой массы гидравлических прессов и обслуживающих их гидравлических станций. Производительность прессов ограничена их технической характеристикой.

На вновь создаваемых труботэлектросварочных установках формование труб будет осуществляться на непрерывных трубоформовочных станах. Этот способ формовки труб давно широко применяют при производстве труб малых и средних (до 820 мм) диаметров. Опыт некоторых заводов показал, что скорость формовки труб большого диаметра на непрерывных трубоформовочных станах достигает 25 м/мин. Рабочие клетки новых станов формовки труб большого диаметра имеют четыре валка, образующих калибр. Четырехвалковые клетки приняты исходя из того, что размеры двухвалковых клеток получились бы очень большими. Кроме того, в двухвалковом калибре разница диаметров валка по краю бочки и по глубине калибра была бы значительной, что привело бы к большой разнице окружных скоростей в соответствующих точках калибра, повышенному скольжению металла по валку и образованию на трубах рисок и задиоров.

Новый труботэлектросварочный стан предназначен для дуговой электросварки труб наружным диаметром 1220–1620 мм и толщиной стенки 8–20,5 мм из двух полуцилиндров, формовать которые будет восьмиклетевой непрерывный трубоформовочный стан со скоростью 13,5–25 м/мин. В качестве заготовки намечено использовать горячекатаный лист из стали марки 17ГС шириной 1900–2550 мм и длиной 11,5–12 м.

Сварка технологического шва токами высокой частоты. Широко применяемая электродуговая сварка под слоем флюса имеет скорость

сварки около 1,5–2 м/мин. Вследствие низких скоростей сварки в трубозлектросварочных цехах для производства прямошовных труб большого диаметра число сварочных установок для швов бывает значительным. Чтобы не создавать нескольких установок для наложения технологических швов, их стали сваривать токами высокой частоты, что позволило значительно увеличить скорость сварки.

На стане 1220–1620 технологические швы можно сваривать токами высокой частоты, а рабочие наружный и внутренний швы электродуговой автоматической сваркой под слоем флюса. Сварка труб малого и среднего диаметров с толщиной стенки до 8 мм токами высокой частоты позволяет осуществлять поверхностный нагрев весьма тонкого слоя металла кромок заготовки до высокой температуры. При этом ток идет по пути наименьшего реактивного сопротивления. Чем выше частота тока, тем меньше глубина проникновения тока в проводник. Например, при частоте тока 450 кГц глубина проникновения тока в сталь, нагретую до температуры 1000 °С, равна 0,9 мм, а при частоте тока 70 кГц – 2,3 мм.

Ток высокой частоты подводят к кромкам трубы контактными или индукционными способами.

При контактном подводе тока, осуществляемом скользящими или роликовыми контактами, ток от источника питания поступает к двум кромкам трубной заготовки. Дальше ток может идти от одного контакта к другому двумя путями: вокруг трубы или вдоль одной кромки до места стыка и обратно по второй кромке. Индуктивное сопротивление по периметру трубы будет больше, чем вдоль кромок. Поэтому ток пойдет вдоль кромок и будет их разогревать, а в месте стыка кромок их температура будет наивысшей, и под действием сдавливания сжимающими валками образуется шов, т.е. произойдет сварка заготовки в трубу.

При индукционном подводе тока, осуществляемом двух- или трехвитковым индуктором, переменный ток высокой частоты, проходящий по индуктору, создает магнитный поток, который индуцирует в металле трубной заготовки ток. Путь его прохождения по трубе будет таким же, как и при контактном подводе тока, но по периметру трубной заготовки может пойти ток большей силы, так как индуктор охватывает трубу кругом. Для того чтобы уменьшить долю электрического тока, проходящего по периметру трубы, внутрь трубы в месте установки индуктора вводят ферритовый сердечник. Индуктивное сопротивление поперечного сечения заготовки при этом увеличивается, и ток идет в основном вдоль кромок трубы, нагревая их до сварочной температуры. Кромки свариваемой заготовки трубы разогревают до сварочной температуры с оплавлением металла в точке схождения кромок. После нагрева кромки сдавливают сжимающими валками в точке схождения.

В качестве источника энергии при сварке труб токами высокой частоты применяют ламповые генераторы и транзисторные выпрямители.

Промышленный ток (обычно напряжением 400 В и частотой 50 Гц) поступает в генератор на первичную обмотку трансформатора. Со второй обмотки трансформатора ток напряжением 6000 В поступает на выпрямительный блок, а затем постоянный ток преобразуется в высокочастотный переменный благодаря совместному действию генераторной лампы и колебательного контура. Ток от лампового генератора поступает к блоку конденсаторов по специальному кабелю. От блока конденсаторов ток идет по соединительным шинам в первичную обмотку сварочного трансформатора, а от вторичной обмотки трансформатора ток подается к индикатору или к контактному электроду.

Основное преимущество сварки труб токами высокой частоты – высокая скорость. Трубы малого диаметра с толщиной стенки до 4 мм можно сваривать со скоростью до 110 м/мин при хорошем качестве шва. Для труб с толщиной до 10 мм скорость сварки 50 м/мин. Скорость сварки технологического шва труб на стане 1220-1620 составляет примерно 25 м/мин.

Технологическая последовательность и оборудование производства прямошовных труб большого диаметра новых трубозлектросварочных цехов. В современных цехах по производству прямошовных труб большого диаметра значительная часть оборудования модернизирована. Например, гидравлический пресс-расширитель заменен гидромеханическим, осуществляющим раздачу труб последовательно (участками длиной по 2 м) вместо одновременной раздачи всей трубы, что позволит в несколько раз снизить массу этого оборудования. Цехи снабжены ультразвуковыми дефектоскопами, обеспечивающими контроль всех швов труб, и рентгеновскими установками в достаточном количестве.

Примерная технологическая последовательность операций для современного производства труб диаметром 1220–1620 мм и толщиной стенки 8–20,5 мм;

правка листов на листопрямительной машине;

замер длины листов и их клеймение;

подбор листов одинаковой длины для дальнейшей сборки полуцилиндров перед сваркой;

обрезка кромок листа до необходимой ширины на кромкострогальном станке с увеличенным числом клеток;

зачистка кромок листа металлическими щетками;

формовка полуцилиндров на восьмиклетевом формовочном стане со скоростью 13,5–25 м/мин;

сборка труб из полуцилиндров (швы расположены в горизонтальной плоскости);

одновременная сварка двух технологических швов на стане высокочастотной сварки с индукционным подводом тока частотой 10 Гц;

приварка технологических планок с помощью шлангового аппарата ПШ-54;

электродуговая сварка первого внутреннего шва под слоем флюса трехдуговым сварочным аппаратом (трубу надвигают на штангу со сварочным аппаратом с помощью шлепера со скоростью 1,5–3,2 м/мин);

очистка внутренней поверхности трубы от шлаковой корки и окалины;

сварка второго наружного шва под слоем флюса трехдуговым сварочным аппаратом со скоростью 1,5–3,2 м/мин;

электродуговая сварка первого наружного шва (так же, как и второго);

сварка второго наружного шва под слоем флюса трехдуговым аппаратом со скоростью 1,5–3,2 м/мин;

контроль всех швов с помощью ультразвуковых дефектоскопов;

рентгенографический контроль труб с дефектами, обнаруженными ультразвуковыми дефектоскопами;

обрезка труб вместе с технологическими планками плазменными резаками;

раздача труб гидромеханическим прессом-расширителем последовательными участками длиной по 2 м;

промывка труб после раздачи;

испытание труб гидростатическим давлением на специальном прессе;

ремонт труб с мелкими дефектами шва на ремонтной площадке;

ремонт труб с внутренними и наружными дефектами шва большой протяженности на специальных установках по переварке швов;

ультразвуковой контроль качества труб;

рентгеновский контроль качества труб;

наружный визуальный контроль качества труб работниками отдела технического контроля (ОТК);

торцовка концов труб и снятие фаски на торцовочных станках;

принятие труб контролерами ОТК; клеймение и маркировка труб;

измерение длины и массы готовых труб.

Технические требования к трубам

Газонефтепроводы – ответственные сооружения. К ним относятся магистральные трубопроводы всех категорий, а также ответвления от них для транспортировки нефти, газа и нефтепродуктов; промысловые сборные газовые и нефтяные сети (шлейфы) и коллекторы; обвязочные (технологические) трубопроводы компрессорных и нефтеперекачивающих насосных станций, подземных хранилищ нефти и газа, промысловых сборных пунктов, установок комплексной подготовки нефти и газа.

Давление в газонефтепроводах диаметром до 426 мм может достигать до 32 МПа, а в трубопроводах диаметром от 530 мм и выше – до 10 МПа. В зависимости от рабочего давления магистральные газопрово-

ды подразделяются на два класса: класс 1 при рабочем давлении 2,5–10 МПа и класс 2 при рабочем давлении 1,2–2,5 МПа.

В зависимости от диаметра магистральные нефтепроводы и нефтепродуктопроводы подразделяются на четыре класса: класс 1 при условном диаметре 1000–1200 мм, класс 2 – 500–1000 мм, класс 3 – 300–500 мм и класс 4 – 300 мм и менее.

В зависимости от условий работы, объема неразрушающего контроля сварных соединений и испытательного давления магистральные трубопроводы и их участки делятся на категории В, I, II, III и IV.

Рабочее давление в магистральных газопроводах может достигать до 10,0 МПа, а в нефтепроводах – до 6,4 МПа.

Помимо рабочих напряжений от действия внутреннего давления в металле трубопровода возникают многочисленные, с трудом контролируемые и не поддающиеся точному расчету дополнительные напряжения, связанные с условиями его строительства и эксплуатации. Особенно усложняется напряженное состояние трубопровода при его строительстве и эксплуатации в условиях Крайнего Севера при температуре до минус 50–60 °С, увеличивающей склонность металла труб к хрупкому разрушению из-за явления хладноломкости.

На несущую способность трубопроводов, т.е. на способность металла воспринимать различные нагрузки без разрушения, большое влияние оказывают:

металлургические факторы, связанные с металлургическим производством заготовок труб – слитков, листов, полос (ликвация, расслоения, газовые пузыри, неметаллические включения, полосчатость, плены);

технологические факторы, связанные с технологическим процессом формирования труб из заготовок (локальные пластические деформации, наклеп), приводящие к изменению механических свойств металла;

строительные факторы, связанные с нарушением технологического процесса сварки и укладки трубопроводов. При транспортировке труб и их многократной переброске (выгрузка и погрузка на трубовозы, сборка на стеллажах, сварка и последующая погрузка и разгрузка на трассе) на поверхности труб образуется большое число мелких и крупных рисок, задиров и вмятин. При неправильном подъеме сваренного трубопровода могут образоваться местные вмятины, переломы в местах расположения на трубе захватов и т.д.

Несущая способность металла труб снижается пропорционально ослаблению толщины стенки различными дефектами металлургического, технологического и строительного характера, повышающими склонность металла к хрупкому разрушению.

Влияние тех или иных факторов на несущую способность трубопроводов снижается в значительной степени или устраняется полностью

при разработке и соблюдении оптимальных технологических процессов выплавки стали, прокатки листов, полос и труб, формования и сварки труб из листов и полос, а также процессов строительства трубопроводов.

Для обеспечения высокой несущей способности трубопроводов к трубам для газонефтепроводов предъявляют комплекс технических требований: по механическим свойствам, химическому составу, технологическим свойствам, точности размеров, качеству поверхности и прочности при гидравлическом испытании. При этом сталь должна быть недефицитной и обладать невысокой стоимостью, так как в затратах на сооружение газонефтепроводов стоимость стали составляет значительную часть.

Трубы, предназначенные для магистральных газонефтепроводов, нефтепродуктопроводов, технологических и промышленных трубопроводов, подразделяют по основным параметрам и размерам (в соответствии с ГОСТ 20295–85) на три типа: 1 – диаметром 159–426 мм прямошовные контактной сварки токами высокой частоты; 2 – диаметром 159–820 мм спиральношовные электродуговой сварки; 3 – диаметром 530–820 мм прямошовные электродуговой сварки. Поставляют их в зависимости от механических свойств по классам прочности К34, К38, К42, К50, К52, К55 и К60 (см. табл. 2). Трубы диаметром 1020, 1220 и 1420 мм поставляют по согласованным с потребителями техническим условиям.

Механические свойства трубной стали характеризуются гарантированными показателями прочности – временным сопротивлением разрыву σ_B и пределом текучести σ_T , пластичности – относительным удлинением δ , определяемыми при испытании на растяжение, а также ударной вязкостью, по которой оценивают склонность стали к хрупкому разрушению. Это приобретает особенно большое значение на строительстве газонефтепроводов в северных условиях.

В зависимости от климатических условий строительства и эксплуатации газонефтепроводов поставляемые трубы условно подразделяют на трубы в обычном исполнении, предназначенные для средних и южных районов страны с температурой воздуха -40°C и выше и температурой их эксплуатации не ниже 0 или -5°C , и трубы в северном исполнении, предназначенные для строительно-монтажных работ при температуре до -60°C и эксплуатации в северных районах страны при отрицательных температурах не ниже -15 или -20°C . Поэтому для трубной стали гарантируют: ударную вязкость КСУ на образцах типа 1–3 (типа Менаже) (табл. 18) с полукруглым концентратом U при минимальной температуре строительства, ударную вязкость КСВ на образцах типа 11–13 (типа Шарпи) с острым концентратом V при минимальной температуре эксплуатации; процент волокна в изломе на образцах ДВТТ при минимальной температуре эксплуатации (табл. 19). Для металла с номинальной толщиной стенки 10 мм и более процент волокна в изломе определяют на образцах ДВТТ высотой 75 мм и номинальной толщиной стенки ме-

Таблица 18. Ударная вязкость KCU (в Дж/см²) на образцах типа 1–3 (типа Менаже) при температуре –60 °С для районов Крайнего Севера и –40 °С для остальных районов

Номинальная толщина стенки труб и соединительных деталей, мм	Основной металл труб	Основной металл соединительных деталей
6–10	29,4	29,4
10–15	39,2	29,4
15–25	49	29,4
25–30	58,8	39,2
30–45	–	49

Таблица 19. Ударная вязкость KCV на образцах типа 11–13 (типа Шарпи) и процент волокна В в изломе на образцах ДВТТ основного металла труб толщиной стенка 6 мм и более при температуре, равной минимальной температуре стенки трубопровода при эксплуатации

Условный диаметр труб, мм	Рабочее давление МПа	KCV, Дж/см ² , не менее	В, % не менее
До 500	10 и менее	24,5	–
500–600	10 и менее	29,4	–
700–800	10 и менее	29,4	50
1000	5,5 и менее	29,4	50
1000	7,5	39,2	60
1000	10	58,8	60
1200	5,5 и менее	39,2	60
1200	7,5	58,8	70
1200	10	78,4	80
1400	7,5	78,4	80
1400	10	107,8	85

Примечание. Для трубопроводов, транспортирующих жидкие продукты, требования по волокну в изломе не предъявляются.

нее 10 мм – высотой 50 мм (толщина образца равна толщине стенки труб).

Для сварных труб проводят также испытания сварного соединения на разрыв и ударную вязкость.

Трубы изготавливают из стали, имеющей отношение σ_T / σ_B не более: 0,75 для углеродистой стали; 0,8 для низколегированной нормализованной стали; 0,85 для дисперсионно-твердеющей нормализованной и термически упрочненной стали; 0,9 для стали контролируемой прокатки, включая бейнитную. Для сталей с временным сопротивлением σ_B до 588,4 МПа относительное удлинение $\delta_5 \geq 20\%$, для стали с σ_B до 637,4 МПа $\delta_5 \geq 18\%$, для стали с σ_B до 686,5 МПа $\delta_5 \geq 16\%$.

Химический состав стали бесшовных горячекатаных труб определяют на специально отобранных для этого пробах. В случае необходимости проводят контрольный химический анализ от двух труб одной плавки и одной партии. У сварных труб химический состав стали допускается принимать по сертификату завода–изготовителя листовой стали, из которой выполнены трубы.

Для изготовления бесшовных горячекатаных и сварных труб диаметром не более 426 мм применяют углеродистые стали обычной прочности, для изготовления сварных труб диаметром 530, 720 и 820 мм – низколегированные стали повышенной прочности, для изготовления сварных труб диаметром 1020, 1220 и 1420 мм – низколегированные стали высокой прочности в термически- или термомеханически упрочненном (контролируемая прокатка) состоянии.

Для газонефтепроводов трубы поставляют партией, состоящей из труб одного размера по диаметру и толщине стенки, одной плавки стали (одной марки) и одного вида термической обработки (для термически обработанных) по группе В с гарантированными требованиями по химическому составу, механическим и технологическим свойствам.

Технологические свойства характеризуют способность трубной стали выдерживать различные воздействия при изготовлении труб на заводе, а также при монтажно-сварочных операциях трубопроводов на трассе без существенного нарушения исходных механических и других рабочих свойств. Прежде всего к технологическим свойствам труб относят их способность к пластической деформации и свариваемость.

Способность трубной стали подвергаться пластической деформации определяют с помощью технологических испытаний. Для сварных труб технологическое испытание проводят на изгиб на образцах, вырезанных из листов и полос, идущих на изготовление труб. Образцы подвергают испытанию на изгиб в холодном состоянии. Бесшовные горячекатаные, а также сварные трубы малого диаметра испытывают в холодном состоянии обычно на раздачу, сплющивание, изгиб и бортование по соответствующим стандартам.

Трубы считают качественными, если после соответствующих технологических испытаний не будет выявлено различных дефектов металлургического характера – мельчайших трещин, надрывов и других пороков. В случае неудовлетворительных испытаний возможны повторные испытания в соответствии со стандартом.

Испытание труб на бортование (рис. 61,а) проводят на отрезках трубы длиной не менее $0,5d$ (где d – наружный диаметр трубы) при помощи оправки путем медленной плавной отбортовки на угол 90° или 60° конца отрезка трубы до получения фланца заданного диаметра D . Радиус закругления оправки r должен быть не более $2a_0$ (a_0 – толщина стенки трубы). Допускается отбортовка с предварительной раздачей. При испытании поверхность оправки покрывают консистентной смазкой.

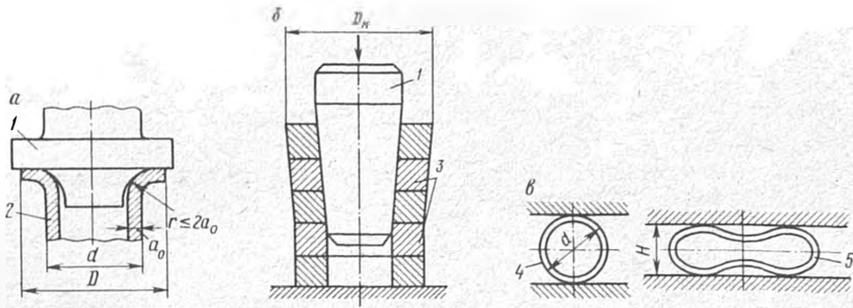


Рис. 61. Технологические испытания труб на бортование (а), раздачу (б) и сплющивание (в):

1 — оправка; 2 — отрезок трубы; 3 — образцы-кольца; 4, 5 — образец соответственно до и после испытания

Испытание труб на раздачу (рис. 61,б) заключается в расширении на конус колец (отрезков) трубы при помощи оправки до заданного размера наружного диаметра D_K у торца. Испытание проводят путем плавного введения оправки с определенным углом конусности α в торец образцов.

Испытание труб на сплющивание (рис. 61,в) заключается в деформации отрезка трубы между параллельными плоскостями до заданного расстояния H между плоскостями. Для испытания берут трубу длиной $l = 20 \div 50$ мм. Испытание можно проводить непосредственно на трубе с предварительным надрезом ее конца на глубину не менее $0,8 d$.

При испытании образцов сварных труб диаметром до 530 мм шов располагают на одинаковом расстоянии от сжимающих плоскостей. Испытуемый отрезок трубы помещают между плоскостями и плавно сплющивают до размера H , равного, например, $2/3$ от номинального наружного диаметра трубы, мм.

Технологические испытания на загиб (рис. 62) проводят на отрезках труб при диаметрах до 60 мм и на продольных или поперечных полосах шириной $2a_0$ мм (при $a_0 \geq 5$ мм), вырезанных из труб диаметром свыше 60 мм. Изгиб осуществляют плавно вокруг оправки до заданного угла.

Точность размеров и геометрической формы труб обуславливается стандартами и техническими условиями (ТУ) на их поставку. Допуски устанавливают на диаметр, толщину стенки, разностенность, длину, кривизну, а также массу трубы (у бесшовных труб). Фактически трубы могут иметь форму, несколько отличающуюся от цилиндрической. Вследствие неравномерности толщины стенки по периметру получается несоответствие осей наружной и внутренней поверхности труб. Возможны и другие отклонения. Как неизбежные, эти отклонения нормируются стандартами и ТУ. Предельные отклонения для бесшовных горячекатаных труб составляют: $\pm 0,5$ мм по наружному диаметру до 50 мм, $\pm 1\%$ по

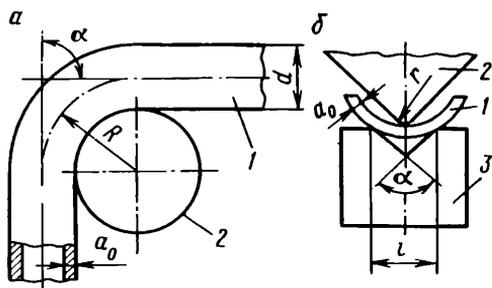


Рис. 62. Технологическое испытание отрезка трубы (а) и продольных или поперечных полос (б) на загиб:

1 — образец; 2 — оправка; 3 — опора; R — радиус загиба трубы; α — угол загиба образца; a_0 — толщина образца; d — диаметр трубы; l — расстояние между опорами; r — радиус закругления оправки при загибе полос

наружному диаметру 50–219 мм, $\pm 1,5\%$ по наружному диаметру свыше 219 мм; $+12,5$ (-15) % по толщине до 15 мм, $\pm 12,5\%$ по толщине 15–30 мм, $+10$ ($-12,5$) % по толщине 30 мм и более. Предельные отклонения торцов сварных труб типа 1 равны: $\pm 1,5$ мм по наружному диаметру 159 и 168 мм, ± 2 мм по наружному диаметру 168–325 мм, $\pm 2,2$ мм по наружному диаметру 325–426 мм, ± 3 мм по наружному диаметру 426–630 мм, ± 4 мм по наружному диаметру 630–820 мм. Предельные отклонения торцов сварных труб типа 2 равны: $\pm 1,2$ мм по наружному диаметру 159 и 168 мм, $\pm 1,5$ мм по наружному диаметру 168 до 325 мм, ± 2 мм по наружному диаметру 377 мм, ± 2 мм по наружному диаметру 530, 630, 720 и 820 мм. Предельные отклонения торцов сварных труб типа 3 составляют: ± 2 мм (обычной точности) и $\pm 1,6$ мм (повышенной точности) по наружному диаметру 530, 630, 720 и 820 мм (экспандирование), ± 2 (ТУ) и $\pm 2,5$ мм (ГОСТ) по наружному диаметру 1020 мм (прямошовные, $+3$ (ТУ) и ± 4 мм (ГОСТ) по наружному диаметру 1220 мм, $\pm 0,4\%$ по наружному диаметру 1420 мм.

Овальность — отношение разницы между наибольшим и наименьшим наружными диаметрами ($D_{\max} - D_{\min}$) в одном сечении к номинальному диаметру D : $O = (D_{\max} - D_{\min}) / 100 / D, \%$. Для концов труб она не должна превышать 1 и 0,8 % для номинальных толщин стенок 20 мм и более. Отклонения от номинальных наружных диаметров торцов труб на длине не менее 200 мм не должны превышать для труб диаметром до 800 мм предельные отклонения по диаметру и толщине стенки, приведенные в ГОСТ, а для труб диаметром свыше 800 мм — ± 2 мм.

Длина труб должна быть в пределах 10,5–11,6 м. Кривизна труб допускается не более 1,5 мм на 1 м длины. Общая кривизна труб не должна превышать 0,2 % от полной длины. Концы труб должны быть обрезаны

под прямым углом. Отклонения от перпендикулярности торца труб (косина реза) для всех видов труб – не более 2 мм. Трубы поставляют с разделкой кромок. Концы всех труб с толщиной стенки от 5 до 16 мм должны иметь фаску под углом 25–30°. Для толщин стенок более 16 мм часто используют фигурную фаску. По заказу потребителя на концах бесшовных горячекатаных труб с толщиной стенки от 5 до 20 мм можно снять фаски под углом 35–40°. Торцовое кольцо (притупление кромок) для сварных труб регламентируют размером $1,8 \pm 0,8$ мм; для бесшовных – 1–3 мм.

Качество поверхности. На заводе-изготовителе каждую трубу осматривают и обмеривают. В металле трубы не допускаются трещины, пленки, рванины и закаты, а также расслоения длиной свыше 80 мм в любом направлении. Расслоения любого размера на торцах труб и в зоне шириной 25 мм от торца труб не допускаются. Зачистка внешних дефектов труб (кроме трещин) допускается при условии, что толщина стенки труб после зачистки не выходит за пределы допусков на толщину стенки.

Сварные швы труб должны быть плотными с обеспечением плавного перехода от основного металла к шву без острых углов, подрезов, непроваров, осевой рыхлости и других дефектов. Усиление наружных сварных швов регламентируют в зависимости от толщины стенки. Усиление наружного шва должно быть в пределах 0,5–2,5 мм для труб со стенкой толщиной до 10 мм и 0,5–3 мм для труб со стенкой толщиной свыше 10 мм. Высота усиления внутреннего шва должна быть не менее 0,5 мм. На концах труб не менее 150 мм усиление внутреннего шва снимают до высоты 0–0,5 мм.

Смещение свариваемых кромок не должно превышать 10 % от номинальной толщины стенки трубы.

Основной металл и сварные соединения труб диаметром 1020 мм и более должны быть полностью проверены физическими неразрушающими методами контроля (ультразвуком с последующей расшифровкой дефектных мест рентгенотелевизионным контролем).

Прочность труб при гидравлическом испытании. Гидравлическому испытанию подвергают каждую трубу, предназначенную для сооружения газонефтепроводов.

Заводское испытательное давление не должно превышать определяемого по формуле

$$p = 200sR/D_{\text{вн}} \quad (8)$$

где s – минимальная толщина стенки трубы (за вычетом минусового допуска); R – расчетное напряжение ($R = 0,95\sigma_T$); $D_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубы.

Трубы подвергают гидравлическому испытанию под давлением p не менее 20 с. В процессе испытания трубу обстукивают. Труба считается выдержавшей испытание, если при этом не будет обнаружено течи или

остаточной деформации, превышающей пределы допускаемых отклонений по диаметру труб.

Разрешается проводить ремонт дефектов сварных швов путем их вырубки и последующей заварки, а также ремонт основного металла путем зачистки. Ремонт основного металла сваркой не допускается.

Сталь для труб отечественного производства

Для газонефтепроводов используют стали углеродистые обычной прочности, низколегированные повышенной прочности и низколегированные высокой прочности (табл. 20). Низколегированные стали высокой прочности применяют двух видов: дисперсионно-твердеющие и малоперлитные или бесперлитные (бейнитные) стали контролируемой прокатки (экономно-легированные).

Высокопрочными малоперлитными трубными сталями называют стали с очень низким содержанием углерода и микродобавками ниобия, ванадия, титана, бора марок 09Г2ФБ, 10Г2ФБ и т.д. Они имеют после контролируемой прокатки малоперлитную (феррито-перлитную) мелкозернистую структуру. При использовании ускоренного охлаждения листовой низколегированной стали непосредственно после контролируемой прокатки эти стали могут иметь феррито-бейнитную или бейнитную (бесперлитную) структуру (бейнитные стали).

В отличие от малоперлитных и бейнитных сталей дисперсионно-твердеющие стали марок 17Г2СФ, 15Г2ФЮ содержат примерно в 1,5–2 раза большее количество углерода, который в сочетании с микродобавками приводит к образованию упрочняющих карбидных, нитридных, карбонитридных и других фаз и получению мелкозернистой феррито-перлитной структуры. Причем эффект от такого упрочнения существенно возрастает при применении нормализации и других видов термообработки. Дисперсионно-твердеющие стали склонны к переходу в хрупкое состояние при температуре от 10 до –20 °С.

Контролируемая прокатка – метод термомеханической обработки металла. Она приводит к повышению прочностных характеристик и ударной вязкости листовой и рулонной стали. При этом у малоперлитных и бейнитных сталей повышается также хладностойкость. Они являются хорошо сваривающимися в заводских и полевых условиях в отличие от дисперсионно-твердеющих сталей, для сварки которых требуются специальная технология и подогрев.

Дисперсионно-твердеющие стали марок 17Г2СФ, 15Г2ФЮ, а также низколегированные стали марок 14ХГС, 17Г1С-У применяют для труб в обычном исполнении; малоперлитные и бейнитные стали марок 09Г2СФ, 09Г2ФБ, 08Г2СФБ, 08Г2СФТ, 10Г2ФБ-У, 10Г2ФТ-У – для труб в северном исполнении. Для северных условий применяют также дисперсионно-твердеющую низколегированную сталь марки 13Г2АФ с пониженным содержанием углерода.

Т а б л и ц а 20. Стальные трубы большого диаметра отечественного производства для газонефтепроводов

Наружный (внутренний) диаметр труб, мм	Номинальная толщина стенки, мм	Марка стали	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Ударная вязкость, Дж/см ²		Процент волокна в изломе образцов ДВТТ	Характеристика трубы в состоянии поставки
						по Менаже KCU	по Шарпи KCV		

Харьковский трубный завод

1420	16,8	09Г2ФБ	549,2	421,7	19	49 (-60 °C)	78,4 (-15 °C)	80 (-15 °C)	Прямошовные трубы из листовой стали контролируемой прокатки То же
	15,7	10Г2ФБ	588,7	441,3	20	53,9 (-60 °C)	78,4 (-15 °C)	80 (-15 °C)	
(1380)	21,6	10Г2ФБ-У, 10Г2ФТ-У	588,7	461,0	20	-	107,9 (-15 °C)	85 (-15 °C)	То же с последующим ускоренным охлаждением
1220	11,4	17Г1С-У	510	363,6	20	39,2 (-40 °C)	39,2 (0 °C)	-	Прямошовные трубы из низколегированной нормализованной стали
	13	17Г1С-У	510	363,6	20	39,2 (-40 °C)	39,2 (0 °C)	-	
	13,6	17Г1С-У	510	363,6	20	39,2 (-40 °C)	39,2 (0 °C)	-	
	15,2	17Г1С-У	510	363,6	20	39,2 (-40 °C)	39,2 (0 °C)	-	
	17	17Г1С-У	510	363,6	20	39,2 (-40 °C)	39,2 (0 °C)	-	
	11	13Г2АФ	529	362,6	20	39,2 (-60 °C)	39,2 (-5 °C)	60 (-5 °C)	
	12	13Г2АФ	529	362,6	20	39,3 (-60 °C)	39,2 (-5 °C)	60 (-5 °C)	
	13,2	13Г2АФ	529	362,6	20	39,2 (-60 °C)	39,2 (-5 °C)	60 (-5 °C)	
	15,2	13Г2АФ	529	362,6	20	39,2 (-60 °C)	39,2 (-5 °C)	60 (-5 °C)	
	16,3	13Г2АФ	529	362,6	20	39,2 (-60 °C)	39,2 (-5 °C)	60 (-5 °C)	
	11,4	13ГС	510	363	20	39,6 (-40 °C)	36,6 (0 °C)	60 (0 °C)	

Прямошовные трубы

Наружный (внутренний) диаметр труб, мм	Номинальная толщина стенки, мм	Марка стали	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Ударная вязкость, Дж/см ²		Процент волокна в изломе образцов ДВТТ	Характеристика трубы в состоянии поставки
						по Менаже КCU	по Шарпи KCV		
	13,2	13ГС	510	363	20	39,6 (-40 °C)	36,6 (0 °C)	60 (0 °C)	из листовой стали контролируемой прокатки
	10,8	13ГС	539	402	20	39,6 (-40 °C)	36,6 (0 °C)	60 (0 °C)	
	12,5	13ГС	539	402	20	39,6 (-40 °C)	36,6 (0 °C)	60 (0 °C)	
<i>Выксунский металлургический завод</i>									
(1376) 1368	21,6	09Г2СФ	588,7	441,3	20	—	78,4 (-20 °C)	80 (-20 °C)	Многослойные обечайные трубы из рулонной стали контролируемой прокатки
	26	09Г2СФ	588,7	441,3	20	—	78,4 (-20 °C)	80 (-20 °C)	
<i>Волжский трубный завод</i>									
1420	16,8	09Г2ФБ	549,2	421,4	19	49 (-60 °C)	78,4 (-15 °C)	80 (-15 °C)	Спиральношовные трубы из листовой стали контролируемой прокатки
	15,7	X 70	588,7	441,3	20	49 (-60 °C)	78,4 (-15 °C)	80 (-15 °C)	
	15,1	17Г1С-У	637	490	16	—	58,8 (-15 °C)	80 (-15 °C)	Спиральношовные термически упрочненные трубы из рулонной стали
1220	10,5	17Г1С	588,7	412	16	49 (-40 °C)	58,8 (-5 °C)	60 (-5 °C)	Спиральношовные термически упрочненные трубы из рулонной низколегированной стали
	12	17Г1С	588,7	412	16	49 (-40 °C)	58,8 (-5 °C)	60 (-5 °C)	
	12,5	17Г1С	588,7	412	16	49 (-40 °C)	58,8 (-5 °C)	60 (-5 °C)	

1020	9	17Г1С	588,7	412	16	39,2 (-40 °С)	39,2 (-5 °С)	60 (-5 °С)	То же
	10	17Г1С	588,7	412	16	39,2 (-40 °С)	39,2 (-5 °С)	60 (-5 °С)	
	10,5	17Г1С	588,7	412	16	39,2 (-40 °С)	39,2 (-5 °С)	60 (-5 °С)	
	11	17Г1С	588,7	412	16	39,2 (-40 °С)	39,2 (-5 °С)	60 (-5 °С)	
	12	17Г1С	588,7	412	16	39,2 (-40 °С)	39,2 (-5 °С)	—	
1020	9	17Г1С	539,4	372,7	20	39,2 (-40 °С)	39,2 (-5 °С)	—	Спиральношовные трубы из рулонной горячекатаной низ- колегированной ста- ли с локальной тер- мообработкой швов
	10	17Г1С	539,4	372,7	20	39,2 (-40 °С)	39,2 (-5 °С)	—	
	11	17Г1С	539,4	372,7	20	39,2 (-40 °С)	39,2 (-5 °С)	—	
	12	17Г1С	539,4	372,7	20	39,2 (-40 °С)	39,2 (-5 °С)	—	
820	8	17Г1С	588,7	412	16	29,4 (-40 °С)	29,4 (-5 °С)	50 (-5 °С)	Спиральношовные термически упроч- ненные трубы из рулонной низколеги- рованной стали
	9	17Г1С	588,7	412	16	29,4 (-40 °С)	29,4 (-5 °С)	50 (-5 °С)	
	10	17Г1С	588,7	412	16	29,4 (-40 °С)	29,4 (-5 °С)	50 (-5 °С)	
<i>Новомосковский трубный завод</i>									
1020	10	17Г1С-У	510	362,9	20	39,2 (-40 °С)	29,4 (0 °С)	—	Прямошовные тру- бы из низколегиро- ванной нормализо- ванной стали
	11	17Г1С-У	510	362,9	20	39,2 (-40 °С)	29,4 (0 °С)	—	
	12	17Г1С-У	510	362,9	20	39,2 (-40 °С)	29,4 (0 °С)	—	
	14	17Г1С-У	510	362,9	20	39,2 (-40 °С)	29,4 (0 °С)	—	
	14,9	17Г1С-У	510	362,9	20	39,2 (-40 °С)	29,4 (0 °С)	—	Прямошовные тру- бы из низколегиро- ванной нормализо- ванной стали
	9,7	13Г2АФ	529	362,9	20	39,2 (-60 °С)	29,4 (-5 °С)	50 (-5 °С)	
	11,5	13Г2АФ	529	362,9	20	39,2 (-60 °С)	29,4 (-5 °С)	50 (-5 °С)	
	12	13Г2АФ	529	362,9	20	39,2 (-60 °С)	29,4 (-5 °С)	50 (-5 °С)	
14,3	13Г2АФ	529	362,9	20	39,2 (-60 °С)	29,4 (-5 °С)	50 (-5 °С)		
<i>Челябинский трубопрокатный завод</i>									
1220	11	17Г1С-У	510	362,6	20	39,2 (-40 °С)	39,2 (0 °С)	—	То же
	12	17Г1С-У	510	362,6	20	39,2 (-40 °С)	39,2 (0 °С)	—	
	13	17Г1С-У	510	362,6	20	39,2 (-40 °С)	39,2 (0 °С)	—	
	14,3	17Г1С-У	510	362,6	20	39,2 (-40 °С)	39,2 (0 °С)	—	
	15,2	17Г1С-У	510	362,6	20	39,2 (-40 °С)	39,2 (0 °С)	—	
	11	13Г2АФ	529,6	362,9	20	39,2 (-60 °С)	39,2 (-5 °С)	60 (-5 °С)	
	11,5	13Г2АФ	529,6	362,9	20	39,2 (-60 °С)	39,2 (-5 °С)	60 (-5 °С)	
	12	13Г2АФ	529,6	362,9	20	39,2 (-60 °С)	39,2 (-5 °С)	60 (-5 °С)	

Наружный (внутренний) диаметр труб, мм	Номинальная толщина стенки, мм	Марка стали	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Ударная вязкость, Дж/см ²		Процент волокна в изломе образцов ДВТТ	Характеристика трубы в состоянии поставки
						по Менаже КСУ	по Шарпи КСВ		
1220	13	13Г2АФ	529,6	362,9	20	39,2 (-60 °С)	39,2 (-5 °С)	60 (-5 °С)	Прямошовные трубы из листовой стали контролируемой прокатки Прямошовные трубы из листовой нормализованной стали
	13,8	13Г2АФ	529,6	362,9	20	39,2 (-60 °С)	39,2 (-5 °С)	60 (-5 °С)	
	12	13ГС	510	363	20	39,6 (-40 °С)	39,6 (0 °С)	60 (0 °С)	
	13,9	13ГС	510	363	20	39,6 (-40 °С)	39,6 (0 °С)	60 (0 °С)	
	7	17ГС	510	353	20	29,4 (-40 °С)	29,4 (0 °С)	—	
	7,5	17ГС	510	353	20	29,4 (-40 °С)	29,4 (0 °С)	—	
	8	17ГС	510	353	20	29,4 (-40 °С)	29,4 (0 °С)	—	
	9	17ГС	510	353	20	29,4 (-40 °С)	29,4 (0 °С)	—	
	10	17ГС	510	353	20	29,4 (-40 °С)	29,4 (0 °С)	—	
	820—530	5—12	Стали по классам прочности К34, К38, К42, К50, К52, К55, К60 ГОСТ 20295—85	333,4—539,4	206—372,7	20—24	39,2—29,4 (-40 °С) для термически необработанных	—	

Примечания. 1. Трубая сталь, подвергнутая тем или иным внепечным методам обработки, в своей марке имеет дополнительно букву У (сталь улучшенного качества), например 17Г1С-У: S ≤ 0,02 %, P ≤ 0,025 %. В скобках дана температура испытаний.

Современная технология контролируемой прокатки стали регламентирует не только систему микролегирования и степень обжата при прокатке, но и режимы нагрева слитка и охлаждения полученного листа. Известны различные варианты процесса контролируемой прокатки, например, процессы НКПУ (низкотемпературная контролируемая прокатка с ускоренным охлаждением) и ВКПУ (высокотемпературная контролируемая прокатка с ускоренным охлаждением). Эти процессы позволяют получить требуемую структуру стального листа за счет ускоренного его охлаждения непосредственно после контролируемой прокатки слитка из низкотемпературной или высокотемпературной области деформирования. Широкому применению контролируемой прокатки для листовой стали в значительной мере способствует развитие внепечных методов обработки стали синтетическим шлаком, редкоземельными металлами, вакуумированием и т.д.

Институтом электросварки им. Е.О. Патона разработано получение трубной армированной квазимонолитной стали (АКМ) нового класса. Сталь АКМ получают прокаткой слитка, армированного стальными вкладышем особой конструкции, как бы разделяющим этот слиток на отдельные отсеки, параллельные его широкой грани. Полученный лист АКМ слоистого строения с особым комплексом свойств легко поддается технологическим операциям при формировании трубы. Сталь АКМ по показателям прочности не отличается от обычной монолитной стали, но значительно превосходит ее по сопротивлению разрушению газопроводов.

Марки стали для газонефтепроводов назначают в зависимости от их диаметров и температурных условий строительства (монтажа) и эксплуатации. По диаметру газонефтепроводов трубы условно подразделяют на трубы малых – менее 530 мм, средних – 530, 720 и 820 мм и больших диаметров – 1020, 1220 и 1420 мм. В зависимости от минимальных температур строительства и эксплуатации трубы изготавливают в обычном и северном исполнениях.

По состоянию металла трубы поставляют в следующих видах: горячекатаном (бесшовные горячекатаные трубы и электросварные трубы из горячекатаных листов и рулонной стали); термически упрочненном (подвергают термообработке трубы или листы для электросварных прямошовных труб); горячекатаном по контролируемому режиму (электросварные прямошовные и спиральношовные трубы из листов контролируемой прокатки); армированном квазимонолитном (электросварные прямошовные трубы). Возможна поставка электросварных труб с локальной термической обработкой сварных швов.

В качестве термической обработки листов трубной стали применяют обычно нормализацию или нормализацию с отпуском. При термическом упрочнении трубы подвергают закалке в сочетании с высоким отпуском.

Контролируемую прокатку используют для получения листов из ма-

лоперлитных и бейнитных сталей, идущих на изготовление электросварных труб больших диаметров (1220 и 1420 мм).

В зависимости от механических свойств сталь для газонефтепроводов подразделяют по минимальному временному сопротивлению σ_B на классы прочности: К34, К38, К42, К50, К52, К55, К60 (см. табл. 2).

Бесшовные горячекатаные трубы диаметром менее 530 мм изготавливают в основном из углеродистой конструкционной качественной стали марок 10, 15, 20 (для обычных условий) по классам прочности К34, К38 и К42 соответственно или из низколегированной стали (для северных условий) марок 09Г2, 09Г2С, 10Г2 по классу прочности К50. Электросварные трубы диаметром менее 530 мм изготавливают преимущественно из углеродистой стали обыкновенного качества марок ВСт2сп5, ВСт3сп5, ВСт4сп5, а также стали углеродистой конструкционной качественной марки 10 и 20 по классам прочности не выше К42 (для обычных условий). Для труб диаметром 530–1420 мм принимают низколегированную сталь повышенной и высокой прочности классов К50, К52, К55, К60, К65 и др.

Для труб диаметром 1420 мм из бейнитной стали можно достигнуть класса прочности К65 применением процесса НКПУ контролируемой прокатки, при котором в результате ускоренного охлаждения после прокатки образуется ферритобейнитная (10Г2ФБ) или бейнитная (03Г2БТР) структура стали в северном исполнении.

Новыми и наиболее экономически выгодными по сравнению с электросварными прямошовными трубами являются термически упрочненные спиральношовные трубы. Их изготавливают из низколегированной стали марки 17Г1С или 17Г2СФ диаметром 820, 1020 и 1220 мм по классу прочности К60 и из стали марки 17Г1С-У диаметром 1420 мм по классу прочности К65 для северных условий.

При использовании локальной термической обработки спиральных сварных швов достигается класс прочности К55 (сталь марки 17Г2СФ) у труб диаметрами 1020 и 1220 мм.

Экономическая эффективность термически упрочненных спиральношовных труб диаметром 820–1220 мм достигается за счет снижения толщины стенки на 12–15 % и использования наиболее дешевой рулонной стали. Для термически упрочненных труб из стали марки 17Г1С класса прочности К60 экономия составляет 22,3 руб/т.

Новое направление – применение многослойных труб. Разработанные в нашей стране двухслойные спиральношовные трубы поставляют диаметром 1220 и 1420 мм по классам прочности К60 (сталь марки 08Г2СФБ) и К57 (сталь марки 08Г2СФТ) из экономнолегированной стали. Многослойные обечаечные трубы из горячекатаной рулонной стали с внутренним диаметром 1376, 1368, 1190 и 990 мм изготавливают по классу прочности К60 (сталь марки 09Г2СФ).

В дальнейшем перспективным остается все более широкое использо-

вание листовой малоперлитной и бейнитной стали контролируемой прокатки. Освоено изготовление спиральношовных труб диаметром 1420 мм по классу прочности K56 (сталь марки 09Г2ФБ) из листовой контролируемой прокатки. Рекомендовано применение для прямошовных труб диаметром 1020 и 1220 мм класса прочности K52 листовой стали марки 13ГС контролируемой прокатки вместо нормализованной стали марок 17Г1С и 17Г1С-У, что позволяет снизить себестоимость труб за счет исключения нормализации, кроме того, это обеспечит возможность применения труб для северных условий.

Для прямошовных труб диаметром до 1220 мм рекомендуется также новая сталь марки 09ГСТ контролируемой прокатки с очень низким содержанием углерода (до 0,11 %) по более высокому классу прочности K56, что приведет к снижению металлоемкости труб диаметром 1020 и 1220 мм на 7 % и уменьшению объема сварочно-монтажных работ на 15 %. Использование в дальнейшем контролируемой прокатки по процессу ВКПУ для сталей марок 13ГС и 09ГСТ приведет к удешевлению их производства. Таким образом, дальнейшее развитие трубного производства намечается в двух направлениях: расширение применения высокопрочных малоперлитных и бейнитных листовых и рулонных сталей контролируемой прокатки для электросварных труб и применение термически упрочненных труб.

Сталь для импортных труб

В нашей стране на строительстве магистральных трубопроводов используют импортные трубы в северном или обычном исполнении из сталей примерно тех же марок, что и отечественные, в соответствии с согласованными техническими условиями на их поставку (прил.).

Из Японии, ФРГ, Италии поставляют прямошовные трубы диаметром 1420, 1220 и 1020 мм по классам прочности K65 и K60 и диаметром 720 и 530 мм по классам прочности K60 и K54 из стали регулируемой прокатки с низким содержанием углерода и микролегированием ниобием, ванадием, титаном в северном исполнении; из ЧССР – бесшовные горячекатаные трубы диаметром 530 мм по классу прочности K50 в обычном исполнении; из ФРГ – спиральношовные трубы диаметром 1020 и 720 мм по классу прочности K60 в северном исполнении.

В соответствии со стандартом Американского нефтяного института *API 5L* и *API 5LU* для газонефтепроводов изготавливают бесшовные и сварные экспандированные и неэкспандированные трубы из низколегированных сталей по группам прочности X42, X46, X52 и низколегированных дисперсионно-твердеющих сталей по группам высокой прочности – X56, X60, X70 и др. Эти стали имеют более высокое содержание углерода по сравнению с аналогичными сталями, применяемыми в нашей стране, а также микродобавки ниобия, ванадия, титана.

Двухзначные цифры при индексе стали X характеризуют группу прочности по номинальному нормативному пределу текучести $\sigma_{0,2}$ (в фунтах на квадратный дюйм, поделенных на 1000). Чтобы перевести эти величины в мегапаскалы, надо двухзначные цифры индекса стали умножить на 7,03. Например, для сталей X70 $\sigma_{0,2} \geq 492$ МПа

Широко применяют также малоперлитные и бейнитные высокопрочные стали по группам прочности X65, X70 регулируемой прокатки с низким содержанием углерода и микролегированным ниобием, ниобием и ванадием, молибденом и ниобием для северных условий. К каждой группе прочности сталей, например X65 или X70, может относиться большое число марок стали, отличающихся способом выплавки, технологией прокатки, химическим составом, но имеющих одинаковый нормативный предел текучести, т.е. марку стали определяет уровень механических свойств, а не химический состав.

Соединительные детали

Соединительными деталями трубопроводов называют тройники, переходники, отводы и днища (заглушки). Для магистральных газонефтепроводов и коллекторов компрессорных и нефтеперекачивающих станций применяют соединительные детали различных конструкций и способов изготовления: тройники (рис. 63,а) горячей штамповки; штампосварные с цельноштампованными ответвлениями горячей штамповки; сварные (рис. 63,б) без специальных усиливающих элементов (ребер, накладок и т.д.) и сварные (рис. 63,в), усиленные накладками; переходники (рис. 63,г) конические, концентрические штампованные или штампосварные; заглушки эллиптические (рис. 63,д); отводы гнутые гладкие (рис. 63,е), изготовленные из труб путем протяжки в горячем состоянии, гнутые при индукционном нагреве, штампосварные из двух половин и сварные секторные (рис. 63,ж).

Сварные тройники должны иметь длину, равную не менее чем двум диаметрам ответвления D_0 . Длина ответвления неусиленных сварных тройников должна быть не менее $0,5D_0$, но не менее 100 мм; ширина накладки усиленного тройника на магистрали и на ответвлении – не менее $0,4D_0$. Толщину накладок принимают равной толщине стенки усиливаемого элемента. Расстояние от накладки до торца тройника должно быть не менее 100 мм. Не предусматривают накладки для тройников с отношением диаметра ответвления D_0 к диаметру магистрали D_M менее 0,2, и для ответвлений тройников с отношением D_0/D_M менее 0,5.

Цельноштампованные тройники должны иметь общую длину не менее $D_0 + 200$ мм, высоту ответвления – не менее $0,2D_0$, но не менее 100 мм. Радиус закругления r в области примыкания ответвления должен быть не менее $0,1D_0$. Длину переходника определяют в соответ-

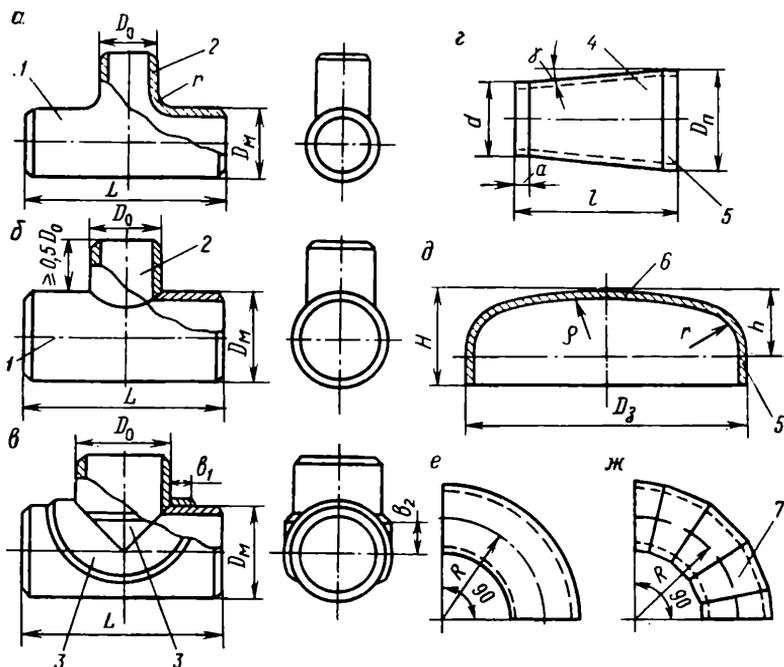


Рис. 63. Соединительные детали трубопроводов:

a – тройник горячей штамповки или штампосварной; *б* – тройник сварной; *в* – тройник сварной, усиленный накладками; *г* – переходник; *д* – заглушка; *е* – отвод гнутый гладкий; *ж* – отвод сварной; *1* – магистральная часть тройника; *2* – ответвление; *3* – накладка; *4* – коническая часть переходника; *5* – цилиндрическая часть; *б* – сферическая часть; *7* – сектор отвода; *L* – длина тройника; D_M – диаметр магистральной части; D_0 – диаметр ответвления; b_1 и b_2 – размеры накладок; d и D_n – диаметры переходника; a – ширина цилиндрической части переходника; γ – угол конуса переходника; l – длина переходника; H – общая высота заглушки; h – высота сферической части заглушки; D_3 – диаметр заглушки; r – радиус перехода от сферической к цилиндрической части заглушки; ρ – радиус сферической части заглушки; R – радиус изгиба отводов

ствии с условием

$$l = \frac{D_n - d}{2} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma} + 2a,$$

где l – длина переходника; D_n и d – наружные диаметры концов переходника; γ – угол конца переходника, равный менее 12° ; a – ширина цилиндрической части на концах переходника, принимаемая от 50 до 100 мм.

Длина секторов сварных отводов по внутренней образующей должна быть не менее $0,15D_n$.

Заглушки (днища) эллиптические изготавливают высотой $H \geq 0,4D_3$, высотой цилиндрической части — $0,1D_3$, радиусом сферической части $\rho \geq D_3$ и радиусом перехода цилиндрической части к сферической $r \leq D_3$.

Толщину стенок соединительных деталей определяют расчетом. Она не должна быть менее 4 мм.

Кромки соединительных деталей должны быть обработаны в заводских условиях под сварку с трубами без переходных колец, которые применяют в случаях неравнопрочности труб и соединительных деталей, а также при разности их толщин более чем в 1,5 раза.

При изготовлении сварных соединительных деталей используют многослойную сварку с обязательной подваркой корня шва деталей диаметром 300 мм и более.

Соединительные детали (тройники, переходники, отводы, заглушки) изготавливают из труб или листовой стали по таким же техническим требованиям (σ_T/σ_B , δ , КСУ и т.д.) и из тех же марок стали, что и трубы для магистральных газонефтепроводов, рассмотренные выше. Для соединительных деталей диаметром 57–219 мм ударная вязкость не регламентируется.

После изготовления сварные детали контролируют с помощью ультразвука или рентгена. Для снижения уровня остаточных напряжений подвергают термообработке (высокому отпуску): соединительные детали со стенками толщиной 16 мм и более (независимо от давления, марок стали и т.д.); соединительные детали из низколегированной стали повышенной прочности марок 10ХСНД; 15ХСНД, 14ХГС, 09Г2С, а также из высокопрочных низколегированных сталей с $\sigma_B \geq 550$ МПа (независимо от толщины стенок и других факторов); тройники с отношением диаметров ответвления и магистрали $D_0/D_M > 0,3$ (независимо от марки стали, толщины стенок, давления и т.д.).

Гидравлическое испытание проводят давлением, равным 1,3 рабочего давления для деталей, устанавливаемых на линейной части магистральных газонефтепроводов, и 1,5 — для деталей трубопроводов категории В.

19. ЧУГУННЫЕ ТРУБЫ

Чугунные трубы обладают по сравнению со стальными большей коррозионной стойкостью и долговечностью, а также меньшей сложностью изготовления. Вместе с тем они имеют большую металлоемкость (большая толщина стенок). Общие затраты на производство и монтаж чугунных трубопроводов, отнесенные к одному году их службы, оказываются меньшими, чем эти же затраты при сооружении стальных трубопроводов.

Трубы из серого чугуна широко применяют для изготовления водопроводов как в Советском Союзе, так и за рубежом. Они получили большое распространение также для трубопроводов различного назначения. Для газонефтепроводов используют трубы из высокопрочного чу-

гуна с шаровидным графитом, который, наряду с высокой прочностью, имеет достаточную пластичность, обладает как и серый чугун, хорошими литейными свойствами, а также имеет низкую стоимость по сравнению с другими материалами.

Трубы из высокопрочного чугуна благодаря более высокой механической прочности и пластичности способны выдерживать внутренние рабочие давления, даже несмотря на некоторое ослабление их стенок под действием точечной коррозии, и имеют больший срок службы, чем обычные трубы из серого чугуна.

Изготовление труб

Изготовление чугунных труб заключается в заливке металла в формы, осуществляемой различными способами. В Советском Союзе наибольшее распространение имеют центробежный метод литья труб из серого чугуна в водоохлаждаемые формы и полунепрерывный метод литья чугунных труб.

Центробежный метод литья. Для литья труб применяют несколько моделей центробежных машин, различающихся конструктивным оформлением в зависимости от размеров труб. На рис. 64 приведена схема одной из центробежных машин, корпус 4 которой полый. Внутри него установлена на роликах металлическая форма 3, охлаждаемая водой 7, протекающей в пространстве между корпусом 4 и формой 3. Форма приводится во вращение от электродвигателя 5, расположенного на корпусе. На станину корпус упирается четырьмя катками и перемещается по продольным направляющим планкам при помощи масляного цилиндра 8, закрепленного внутри станины.

С помощью дозирочного ковша 1 чугун заливают во вращающуюся стальную водоохлаждаемую форму 3, внутренние очертания которой соответствуют наружной конфигурации отливаемой трубы. При этом

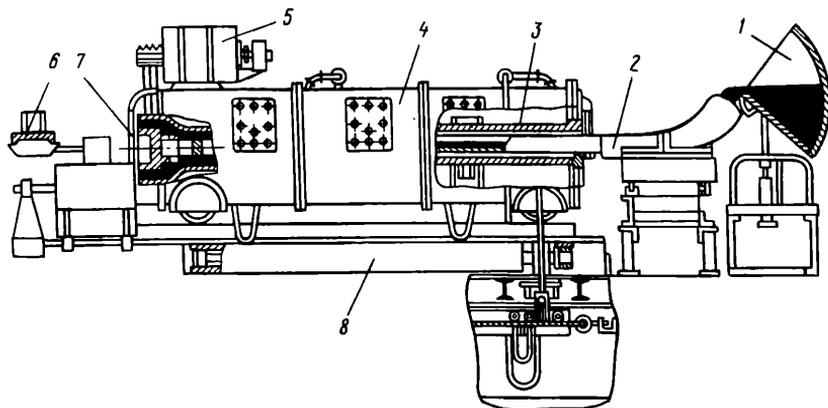


Рис. 64. Схема центробежной машины для литья чугунных труб

осуществляется продольное перемещение корпуса 4 с водоохлаждаемой формой 3 относительно заливочного желоба 2.

Заливку проводят в три этапа. Сначала при неподвижном корпусе заполняют раструбную часть трубы, для образования которой в форму устанавливают песчаный стержень 6. Затем заполняют ствольную часть трубы по мере продольного, равномерного перемещения с максимальной скоростью справа налево корпуса машины относительно заливочного желоба. И, наконец, отливают гладкий конец трубы, для чего на конце формы закрепляют специальную втулку, ограничивающую длину трубы и формирующую ее торец. На этом этапе скорость перемещения корпуса меняется от максимальной, как на втором этапе, до нуля, когда с желоба сливают остатки чугуна. По окончании слива чугуна в форму корпус машины быстро отходит в крайнее положение, желоб выходит из формы и его готовят к следующей заливке.

Трубу после застывания чугуна извлекают из формы и передают в термическую печь для отжига с целью устранения отбела поверхности. В раструбную часть формы вставляют новый песчаный стержень, в кольцевую часть – втулку, и весь технологический процесс отливки трубы повторяется.

При такой технологии изготовления труб качество их зависит не только от свойств чугуна, но и от режима работы машины: частоты вращения формы, скорости продольного перемещения корпуса машины с формой относительно заливочного желоба, а также от соотношения длительности трех этапов заливки чугуна в форму. Центробежный метод отливки чугунных труб в металлической водоохлаждаемой форме – наиболее производительный, экономичный и простой.

После графитизирующего отжига трубы отправляют на стенд для гидравлического испытания, а затем на контроль и механическую обработку.

Полунепрерывный метод литья – наиболее прогрессивный, разработанный и внедренный советским инженером А.Н. Мясоедовым.

В промышленной установке для полунепрерывного литья трубы (рис. 65) жидкий чугун из ковша 1 по желобу поступает в литниковую чашу 2, откуда через литниковые отверстия течет в кольцевую полость 3 между наружными и внутренними водоохлаждаемыми полостями кристаллизатора. Труба 4, формируемая в этой полости, непрерывно вытягивается по мере затвердевания металла вниз с помощью тросов и приспособления 5 в течение всего периода заливки чугуна в кристаллизатор. Для формования внутреннего очертания раструбной части трубы применяют песчаный или металлический стержень. Скорость формования трубы (извлечения из кристаллизатора) может составлять 1–3 м/мин в зависимости от толщины стенки и химического состава чугуна.

Отбела поверхности трубы не происходит, так как ее температура после выхода из кристаллизатора доходит до 1000–1050 °С за счет пере-

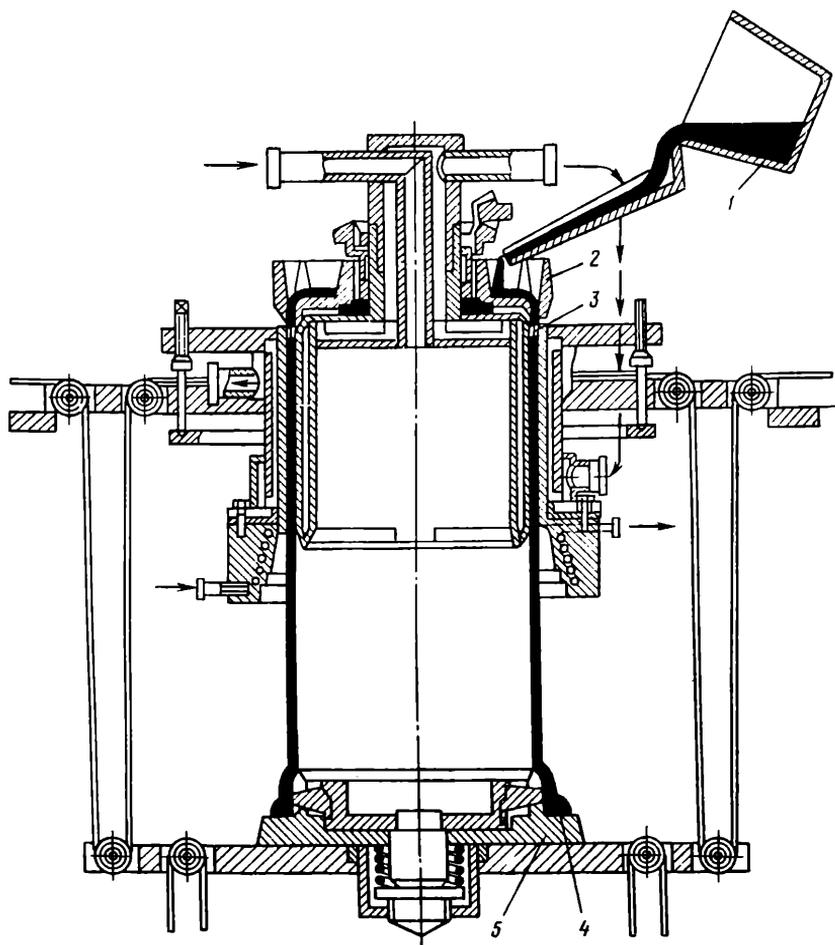


Рис. 65. Схема установки для полунепрерывного литья чугунных труб

дачи тепла из центральной полужатвердевшей зоны, находящейся в кристаллизаторе. В результате этого происходит самоотжиг поверхности трубы, что является положительной особенностью метода. Отрицательный фактор – необходимость предъявления к чугуну повышенных требований по литейным свойствам (хорошая жидкость, плотность и небольшая линейная усадка, отсутствие склонности к отбелу) и по прочности непосредственно после затвердевания, что ограничивает сырьевую базу для литья труб.

Полунепрерывным методом литья изготавливают трубы из серого чу-

гуна эвтектического состава с минимальным содержанием фосфора (3,6–3,9 % С; 1,7–2,2 % Si ; 0,6–1 % Mn; 0,2–0,3 % P; до 0,1 % S).

Дефект чугунных труб центробежного литья – разностенность. При полунепрерывном методе литья труб этого нет, так как трубы формируют на оправке (внутренний кристаллизатор). Но тем не менее эти трубы имеют шлаковые включения и газовые раковины. В случаях протекания неполного процесса самоотжига при полунепрерывном литье труб возможно ухудшение их пластических свойств, образование поверхностного отбела и даже растрескивание. С 1975 г. раструбные трубы из серого чугуна поставляют по стандарту. Улучшение свойств труб достигнуто в результате повышения качества шихтовых материалов, совершенствования процесса плавки чугуна.

Полунепрерывный метод литья рекомендуется применять также и для изготовления раструбных труб из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, в частности, диаметром свыше 300 мм. Экспериментально доказано, что процесс литья протекает нормально, без захватов и заклинивания труб. Для повышения прочности и пластичности высокопрочного чугуна необходима последующая термическая обработка труб (отжиг).

Трубы из серого чугуна

По назначению трубы из серого чугуна подразделяются на напорные водопроводные и сливные (канализационные). Напорные водопроводные трубы составляют примерно 15 % от общего выпуска чугунных труб.

Изготавливают чугунные трубы длиной L с раструбом (рис. 66, а), имеющим размеры D_1, s_1, l_1, l_2, l_3 и l_4 , и со стыковым соединением под уплотнительные манжеты (рис. 66, б), имеющим размеры $D_1, s_1, D_2, D_3, D_4, l_3$ и l_4 .

Напорные трубы с раструбом в зависимости от толщины стенки s с условным проходом $D_y = 65 \div 1000$ мм подразделяют на классы: ЛА ($s = 6,7 \div 22,5$ мм), А ($s = 7,4 \div 24,8$ мм) и Б ($s = 8 \div 27$ мм). Наружные диаметры D_n цилиндрической части труб составляют 81–1048 мм. Трубы с раструбом изготавливают методом центробежного и полунепрерывного литья мерной длины 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 и 10 м и немерной длины в пределах указанных длин (500 мм).

Допускаемые отклонения устанавливают: по длине трубы ± 20 мм, по толщине стенки $(1+0,05s)$ мм; по наружному диаметру цилиндрической части трубы $\pm (4,5+0,0015D_y)$ мм для труб $D_y \leq 300$ мм, $+(4+0,0015D_y)$ и $-(5 \pm 0,0015D_y)$ мм для труб $D_y > 300$ мм, по глубине раструба ± 5 мм при $D_y < 600$ мм и ± 10 мм при $D_y > 600$ мм.

Кривизна на 1 м длины труб диаметром до 200 мм – не более

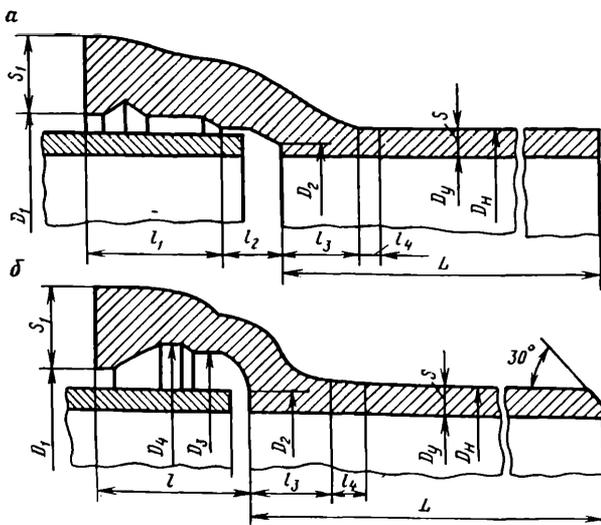


Рис. 66. Чугунная труба с обычным раструбом (а) и с соединением под резиновую уплотнительную муфту (б)

3,5 мм, свыше 200 до 300 мм – не более 2,5 мм и свыше 300 мм – не более 1,25 мм.

Трубы всех классов отливают из серого чугуна не ниже марки СЧ15. Гидравлическое испытание труб с раструбом проводят в зависимости от их размеров и класса. Для $D_y \leq 300$ мм испытательное давление составляет 2,5; 3,5 и 4 МПа; для $D_y > 300$ –600 мм – 2; 3 и 3,5 МПа и для $D_y \geq 600$ мм – 2; 2,5 и 3 МПа соответственно для классов ЛА, А и Б. Максимальное рабочее давление в чугунных трубопроводах не должно превышать испытательного.

Поверхностная твердость труб должна быть не выше НВ 230, а в середине толщины стенки – не более НВ 215. Прочность труб определяют на изгиб растяжением кольца, отрезанного от гладкого конца трубы. Предел прочности (модуль)

$$R = \frac{3P(D_H - s)}{\pi b s^2}, \quad (9)$$

где P – разрушающая нагрузка; D_H – наружный диаметр кольца; s – наименьшая толщина стенки в месте разрушения; b – ширина кольца.

Кольцо поддерживается двумя диаметрально расположенными опорами и нагружается посредством этих опор изнутри.

Предел прочности чугунных труб с раструбом из серого чугуна в зависимости от их диаметра следующий:

D_y , мм	≤300	350	400	500	600	700	800	900	1000
R , МПа.....	392	333,2	274,4	254,8	254,8	245	245	235,2	235,2

Чугунные трубы из серого чугуна со стыковым соединением под резиновые уплотнительные манжеты изготавливают как и раструбные классов ЛА, А и Б, но других размеров: $D_y = 65 \div 300$ мм, $D_H = 81 \div 326$ мм; $s = 6,7 \div 10,8$ мм (класс ЛА); $s = 7,4 \div 11,9$ мм (класс А), $s = 8 \div 13$ мм (класс Б).

Предельные отклонения этих труб составляют: по длине трубы ± 20 мм; по наружному диаметру $\pm (4,5 + 0,0015D_y)$ мм; по толщине стенки трубы $-(1 + 0,005s)$ мм; по внутреннему диаметру раструба $D_3 \pm (1 + 0,001D_y)$ мм; по внутреннему диаметру раструба D_1 и $D_4 \pm (1,5 + 0,001D_y)$ мм; по глубине раструба $l \pm 5$ мм; по ширине канавки раструба ± 2 мм.

Предел прочности труб серого чугуна, определяемый при испытании на изгиб растяжением кольцевого образца трубы, должен быть не менее 392 МПа. Эти трубы должны выдерживать гидравлическое давление 2,5 МПа для класса ЛА, 3,5 МПа для класса А и 4 МПа для класса Б.

Напорные трубы со стыковым соединением под резиновые уплотнительные манжеты изготавливают методом центробежного и полунепрерывного литья. Поставляют их в комплекте с резиновыми манжетами Б-1 при отклонениях наружного диаметра от 0 до $+(4,5 + 0,0015D_y)$ мм и манжетами Б-2 при отклонениях от 0 до $-(4,5 + 0,0015D_y)$ мм.

Трубы из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом

Напорные трубы изготавливают центробежным методом из чугуна с шаровидным графитом марок ВЧ 40; ВЧ 45 и др. (табл. 21).

Испытательное гидравлическое давление для труб $D_y = 65 \div 200$ мм составляет 5 МПа; для труб $D_y = 400 \div 600$ мм – 4,5 МПа. Кривизна труб на любом их участке допускается не более 1,2 мм на 1 м длины для труб $D_y = 65 \div 200$ мм и 1 мм – для труб $D_y = 250 \div 600$ мм.

Предельные отклонения размеров труб составляют: по длине $L \pm 20$ мм, по толщине $s -(1 + 0,05s)$ мм; по наружному диаметру цилиндрической части $D_H \pm (4,5 \pm 0,0015D_y)$ мм.

Трубы комплектуют резиновыми уплотнительными манжетами Б-1 или Б-2.

Т а б л и ц а 21. Размеры (в мм) напорных труб с раструбом из высокопрочного чугуна

Условный диаметр D_y	Наружный диаметр D_n	Толщина стенки s	Длина труб L
65	81	6	2; 3; 4
80	98	6	3; 4; 5
100	118	6	3; 4; 5; 6
150	170	6,5	3; 4; 5; 6
200	222	7	3; 4; 5; 6
250	274	7,5	3; 4; 5; 6
300	326	8	3; 4; 5; 6
400	429	8,5	3; 4; 5; 6
500	532	9	3; 4; 5; 6
600	635	10	3; 4; 5; 6

20. АЛЮМИНИЕВЫЕ ТРУБЫ

Трубы из алюминия и его сплавов обладают большей стойкостью, чем стальные в углеводородных средах, в условиях почвенной коррозии и низких температур. Алюминиевые трубы имеют небольшую массу, достаточно высокие механические и технологические свойства. За счет гладкости стенок труб повышается производительность трубопроводов на 10–15 % в результате уменьшения трения о стенки труб при перекачке продуктов, а также предотвращается отложение парафина и других примесей на их стенках.

Алюминиевые трубы рекомендуют применять: для газонефтепроводов, транспортирующих агрессивные среды, прокладываемых в коррозионно-активных грунтах; при надземной прокладке, когда необходима легкость конструкции (строительство воздушных переходов); для прокладки в труднодоступных горных условиях, в болотистой местности; в прибрежной полосе моря; при укладке газонефтепроводов на поверхности земли в районах вечной мерзлоты и т.д.

При сооружении газонефтепроводов из алюминиевых труб сокращается объем очистных и изоляционных работ, выполняемых на трассе, так как не требуется применять изоляцию (за исключением прокладки в щелочных грунтах); облегчаются транспортирование труб и монтаж трубопроводов.

Стыковые соединения алюминиевых труб выполняют сварными с применением различных методов сварки или разъемными, например, с помощью резьбовых муфт. Сопряжение алюминиевого трубопровода

со стальным можно осуществлять на фланцах с принятием мер защиты против гальванической коррозии.

Применению алюминиевых труб для газонефтепроводов способствует снижение стоимости алюминия и его сплавов благодаря строительству новых мощных заводов и комбинатов по производству алюминия и его сплавов, а также усовершенствованию технологии их производства.

Трубы из алюминия и его сплавов можно применять для магистральных газонефтепроводов диаметром до 300 мм, а также промышленных и разводящих нефтяных и газовых сетей трубопроводов.

Материал труб

Материал для труб выбирают исходя из следующих основных требований: алюминиевый сплав должен хорошо свариваться методом дуговой сварки или другими методами, предел текучести алюминиевого сплава — не более 0,7 от временного сопротивления, относительное удлинение — не менее 15 %, ударная вязкость алюминиевых сплавов при температуре 15 °С — не менее 30 Дж/см². При температуре от 60 до —50 °С нормативные характеристики алюминиевых труб не изменяются.

В качестве материала для алюминиевых труб можно использовать: чистый алюминий марок АД1, АД, АДО; сплавы алюминий-магниевого, не упрочняемые термической обработкой, марок АМг2, АМг3, АМг6, а также высокопрочные сплавы системы Al—Mg—Zn марки В92, системы Al—Cu—Mg марок Д1 и Д16 и системы Al—Mg—Si марки АД35, упрочняемые термической обработкой, и др. Выбор той или иной марки алюминиевого сплава зависит от рабочего давления газонефтепровода и технологии его монтажа.

Для сварных газонефтепроводов высоких давлений можно применять трубы, изготовленные из алюминиевых сплавов марок АМг6 и В92, а также АД35; для сварных газонефтепроводов среднего давления — из сплавов АМг2 и АМг3 и для сварных трубопроводов низкого давления — из алюминия марок АДО, АД и АД1. При изготовлении несварных газонефтепроводов с резьбовыми или фланцевыми соединениями можно использовать высокопрочные дюралюмины марок Д1, Д16 и др. Механические свойства алюминиевых труб приведены в табл. 22.

За рубежом для изготовления труб применяют аналогичные по свойствам сплавы.

Изготовление труб

Трубы из алюминия и его сплавов по способу изготовления делятся на бесшовные — прессованные, тянутые (т.е. изготовленные волочением и холодной прокаткой), плоскострачиваемые; на сварные — прямошовные, спиральношовные и плоскострачиваемые.

Т а б л и ц а 22. Механические свойства труб из алюминия и его сплавов

Марка алюминиевого сплава	Временное сопротивление, МПа, не менее	Предел текучести, МПа, не менее	Относительное удлинение при разрыве, %, не менее
АЛОМ, АД1М и АДМ	60	—	20
АМг2	166,6	—	7
АМг2М	155	60	10
АМг2Н	215,6	—	3
АМг3	215,6	—	6
АМг3М	180	70	15
АМг3Н	264,6	215,6	4
АМг6М	315	145	15
В92Т	360	200	18
Д1Т	355	195	12
Д16	156	—	6
Д16Т	390	255	12
АД35Т	200	100	14
АД35Т1	270	200	10

Пр и м е ч а н и е. М — отожженный; Т — закаленный и естественно состаренный; Т1 — закаленный и искусственно состаренный; без индекса — металл без обработки; Н — нагартованный.

Целесообразность применения того или иного способа для изготовления труб определяется рядом факторов, и прежде всего требованиями качества, точности размеров и стоимости изготовления, а также особенностями применяемого материала для труб.

Наиболее производительным является метод прессования бесшовных труб на специальных гидравлических прессах. Ассортимент труб, получаемых на прессах, весьма разнообразен.

При более высоких требованиях к точности размеров, состоянию поверхности, а также к механическим свойствам труб для их изготовления применяют метод волочения в холодном состоянии в несколько проходов. Вследствие наклепа при волочении материал становится жестче, так как его прочность увеличивается, а пластичность уменьшается. Кроме того, труба становится более прямой и приобретает гладкую поверхность. Волочению подвергают прессованные трубные заготовки.

Для изготовления труб из цветных металлов и сплавов стали используют также метод холодной прокатки. Основное его преимущество — возможность получения весьма высокой вытяжки за один проход. Качество катаных труб как по механическим свойствам, так и по состоянию поверхности более высокое, чем у труб после волочения.

Институтом электросварки им. Е.О. Патона предложен способ получения бесшовных алюминиевых плосковорачиваемых труб методом

прокатки из полых круглых слитков. Для этого изготавливали слитки с внутренним диаметром, равным диаметру готовой трубы. Их отливали полунепрерывным способом и обжимали на прессе. После подогрева такие заготовки подавали на прокатный стан, где их прокатывали в длинные полосы толщиной, вдвое превышающей толщину стенок будущего трубопровода. Чтобы внутренние стенки заготовок при прокатке не сваривались, их смазывали пастой из веретенного масла и талька. После прокатки боковые кромки заготовки (лишний металл) обрезали дисковыми ножницами по всей длине ленты (для обеспечения необходимой толщины стенки). Далее плоские трубы сворачивали в рулон и отправляли для монтажа трубопроводов.

При монтаже звеньев трубопровода концы рулонов труб сваривали встык сваркой с фтористым флюсом или аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом. После сварки шлак и остаток флюса смывали горячей водой, так как флюс, содержащий фтористые соединения, может вызвать коррозию металла при эксплуатации трубопровода.

Рулоны плоскосворачиваемых труб разворачивали и после натяжения с помощью трактора раздували сжатым воздухом при давлении 0,6 МПа. Затем снижали давление до 0,2 МПа и проверяли плотность соединений. Испытания показали, что трубы со стенками толщиной 4 мм и длиной 25–30 м разрушаются при давлении 0,3 МПа. Монтаж трубопроводов из звеньев труб можно проводить также на фланцах. Болты, шайбы и гайки оцинковывают.

У нас в стране из алюминия и его сплавов изготавливают бесшовные трубы длиной 1–6 м двух видов: тянутые диаметром 6–120 мм, толщиной стенки 0,5–5 мм и прессованные диаметром 18–300 мм, толщиной 1,5–40 мм. Сварные трубы получают из ленты методом непрерывной сварки токами высокой частоты диаметром 10–220 мм, толщиной стенки 0,5–4 мм. Освоение изготовления сварных труб из листов и полос позволит в дальнейшем расширить сортамент труб. За рубежом производят трубы примерно такого же типа.

Технические требования, предъявляемые к алюминиевым трубам

К алюминиевым трубам для газонефтепроводов, так же как и к стальным, предъявляют комплекс требований: по свойствам материала, определяемым механическими свойствами; по химическому составу, технологическим свойствам; по качеству поверхности; по точности изготовления; по гидравлическому испытанию на прочность и др.

Отожженные трубы из чистого алюминия марок АД, АД1 и АДО должны выдерживать (без образования трещин) испытание на продольное сжатие. Отожженные трубы из сплава марки АМг испытывают на сплющивание до соприкосновения стенок.

Структура труб не должна быть крупнокристаллической. Трубы должны быть прямыми, с обрезанными перпендикулярно к продольной оси концами, без заусенцев. Допускаемая кривизна тонкостенных труб или стрела прогиба — не более 1 мм на 1 м длины; толстостенных — 3–5 мм на 1 м длины. Общая кривизна труб не должна превышать произведения местной кривизны на длину труб в метрах.

Косина реза не должна выводить трубы за пределы 0,5 допускаемого отклонения по длине, но не превышать: 2 мм для труб диаметром 120–200 мм и 7 мм для труб диаметром свыше 200 мм.

Овальность и разностенность труб не должны превышать их допускаемые отклонения соответственно по наружному диаметру и толщине стенки. Наружная и внутренняя поверхности труб должны быть гладкими и ровными, без плен, трещин, пузырей, расслоений, посторонних включений, рисок, грубых следов протяжки, забоин, царапин, смятин и пятен коррозионного происхождения. Допускаются единичные мелкие дефекты: плены, забоины, царапины, пузыри и вмятины глубиной, не выходящей за пределы минусового допуска по толщине стенки трубы.

21. Пластмассовые трубы

Пластмассовые трубы находят все большее применение в нефтяной и газовой промышленности. По сравнению со стальными трубами они имеют следующие преимущества: высокую коррозионную стойкость к большинству агрессивных сред, хорошие диэлектрические свойства, низкие потери на трение и меньшую плотность при достаточно высоких прочностях и эластичности.

Коррозионная стойкость пластмассовых труб к действию большого количества неорганических и органических соединений исключает возможность загрязнения транспортируемых по ним жидкостей. Пластмассовые трубопроводы не подвержены почвенной и атмосферной коррозии и действию бактерий, поэтому их не покрывают наружным защитным изоляционным покрытием. Кроме того, из-за высоких диэлектрических свойств пластмассовых трубопроводов на них не действуют электрохимическая и гальваническая коррозия, а также блуждающие токи. Срок службы пластмассовых трубопроводов составляет 50 лет и более.

Гладкость стенок пластмассового трубопровода способствует снижению потерь на трение и уменьшению падения давления транспортируемой среды. В связи с этим пропускная способность пластмассового трубопровода выше пропускной способности трубопровода из углеродистой стали на 10–15 %.

Легкость пластмассовых труб приводит к облегчению технологического процесса сооружения трубопровода, сокращению расходов на транспортировку труб и ускорению их сборки. Плотность пластмасс труб изменяется в широких пределах, составляя, например, для поли-

этилена $\sim 0,92 \text{ г/см}^3$, а для поливинилхлорида $1,4 \text{ г/см}^3$. Большинство пластмасс в 5–6 раз легче стали и в 2 раза легче алюминия.

Достаточно высокая механическая прочность пластмассовых труб обуславливается как прочностью самих полимеров, так и прочностью наполнителей. Например, стеклопластиковые трубы по прочности не уступают стальным. Большинство пластмассовых труб применяют на давление 0,3–1 МПа, а стеклопластиковые трубы – до 2,5 МПа и выше.

Эластичность пластмассовых труб обеспечивает им высокую сопротивляемость ударам и способность многократно перегибаться без нарушения целостности.

Вместе с тем пластмассовым трубам свойственны и некоторые недостатки: низкий модуль упругости, ползучесть, старение, высокий коэффициент линейного расширения, низкая теплостойкость и др. Из-за более низкого модуля упругости они менее жестки, чем стальные. Модуль упругости самых жестких пластмасс (стеклопластиков) на один-два порядка ниже, чем у металлов.

Прочность пластмассовых труб уменьшается не только при нагревании, но и в процессе эксплуатации под давлением с течением времени при нормальной температуре, так как при этом наблюдается ползучесть материала. Явление ползучести выражается в медленном деформировании полимерного материала (холодной текучести) с течением времени под действием постоянной нагрузки (рис. 67), что приводит к уменьшению толщины стенки материала и его разрушению при напряжениях, значительно меньших расчетного. Допускаемое давление для трубопроводов, изготовленных из пластмасс, строго ограничивают. Повышение действующих нагрузок, температуры и коррозионной активности среды повышает склонность к ползучести пластмассовых труб. При применении наполнителей их ползучесть значительно снижается, но не устраняется полностью.

Старение пластмассовых труб проявляется в ухудшении их физико-механических свойств с течением времени. Атмосферные условия эксплуатации трубопроводов (температура, влажность, солнечный свет) ускоряют процесс старения пластмасс. Значительное водопоглощение, наблюдающееся у некоторых пластмассовых труб, приводит к ухудше-

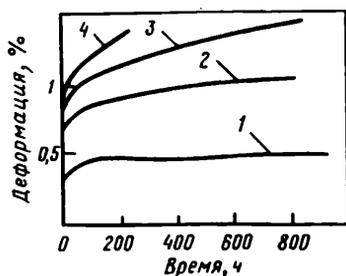


Рис. 67. Ползучесть полистирола при температуре 25°C и различных напряжениях, МПа:

1 — 12,3; 2 — 22; 3 — 23,9; 4 — 28,4

нию электроизоляционных свойств и изменению внешнего их вида из-за коробления. Большим водопоглощением отличаются, например, текстолитовые трубы. Для уменьшения влияния солнечных лучей, кислорода и влаги на свойства пластмассовых труб в них вводят стабилизаторы.

При низких температурах снижается эластичность пластмассовых труб и повышается их хрупкость. Наименее морозостойкие пластмассовые трубы применяют при температуре до -15 или до -20 °С (трубы поливинилхлоридные из оргстекла). Морозостойкость полиэтилена -70 °С, полипропилена -35 °С, фторопласта -269 °С.

Коэффициент линейного расширения у пластмассовых труб в 6–10 раз выше, чем у стальных, поэтому при строительстве трубопроводов необходимо предусматривать компенсаторы.

Теплостойкость (максимальная температура, выше которой эксплуатационные свойства материала резко ухудшаются) пластмассовых труб низкая: для полиэтиленовых она составляет 120 °С, для поливинилхлоридных труб 60 °С, для полипропиленовых труб 150 °С и для стеклопластиковых труб 120 – 160 °С.

Огнестойкость пластмассовых труб зависит от используемых полимеров и наполнителей. Известны горючие пластмассы – ацетобутират-целлюлоза, полистирол и др. Поливинилхлорид, например, только тлеет, мочевиноформальдегидные смолы даже препятствуют возгоранию. Почти все пластмассовые трубы при температуре 300 – 400 °С разлагаются, т.е. происходит их деструкция.

Теплопроводность пластмассовых труб в 500–600 раз ниже теплопроводности металла. Это может служить и как положительное свойство, например, при транспортировании горячих продуктов.

Несколько большая стоимость пластмассовых труб компенсируется меньшей стоимостью их прокладки и увеличением срока службы.

Материал труб

Состав пластмасс для труб. Основой пластмассы для изготовления труб служит полимерное связующее, а также наполнитель, пластификатор, стабилизатор, краситель и другие добавки (ингредиенты).

Полимерное связующее вещество представляет собой однородную полимерную смолу или композицию смол. Смолой называется сложная смесь родственных или взаимно растворимых органических высокомолекулярных соединений, находящихся в устойчивом твердо-жидком состоянии. Смолы имеют стабильную аморфно-стекловидную структуру и подразделяются на природные, искусственные и синтетические. В производстве пластмасс применяют главным образом синтетические смолы.

Природными являются растительные смолы (канифоль, добываемая из смолы хвойных деревьев – живицы), ископаемые смолы (янтарь, копал, сандарак) и смолы животного происхождения (шеллак).

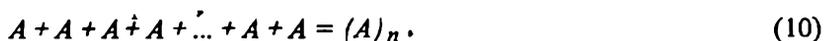
Искусственными смолами называются полимерные вещества, получаемые модифицированием (химическим синтезом) таких природных высокомолекулярных соединений, как белки и целлюлоза.

Синтетическими смолами называются полимерные вещества, получаемые из низкомолекулярных соединений при помощи специальных химических процессов. Полимерами называются высокомолекулярные вещества, молекулы которых содержат многократно повторяющиеся простые структурные элементарные звенья (группы атомов) в виде химических соединений. Исходные низкомолекулярные вещества органического происхождения, способные соединяться между собой в гигантские молекулы, называются мономерами. Благодаря наличию двойных или тройных связей мономеры способны соединяться между собой, образуя молекулы удвоенной (димер), утроенной (тример) или многократно увеличенной молекулярной массы (полимер). Если молекулы полимера имеют очень большие размеры по сравнению с размерами молекулы мономера, то их называют высокополимерами.

Молекулярная масса полимера достигает десятков и сотен тысяч единиц, а в некоторых случаях даже и нескольких миллионов, тогда как у обычных низкомолекулярных веществ она исчисляется десятками или сотнями единиц (например, водород — 2, вода — 18, этиловый спирт — 46, стирол — 104).

Превращение исходного низкомолекулярного вещества (мономера) в высокомолекулярное полимерное вещество осуществляется при помощи полимеризации, поликонденсации и других реакций, т.е. синтетическим путем. Химические процессы получения полимеров определяют их свойства.

Полимеризацией (цепкой) называется процесс соединения большого числа молекул низкомолекулярных ненасыщенных веществ A (имеющих двойную химическую связь между атомами) по цепной реакции. Гигантская молекула, образовавшаяся в результате этого процесса, имеет тот же эмпирический состав, что и исходная:



Достаточно привести в активное состояние сравнительно небольшое количество молекул, как они вызовут последующее превращение сотен и тысяч других молекул.

Можно сказать, что молекулы высокополимеров, получаемых методом полимеризации, построены из одной и той же молекулярной детали, многократно повторенной, поэтому различие их свойств определяется только числом этих деталей, соединенных в длинную цепочку. Такое строение и определяет основные свойства высокополимеров: твердость, прочность, гибкость, пластичность, эластичность и т.д. Значит, при полимеризации химический состав полимера соответствует химическому составу исходного мономера.

При полимеризации всегда образуется смесь соединений с различной длиной молекулярных цепей, поэтому высокомолекулярное вещество не представляет собой химически индивидуальное соединение, а является сложной смесью компонентов, близких по составу, но отличающихся длиной молекулярных цепей. Такие смеси молекул называют полимергомологами.

Для получения материалов со специальными сочетаниями свойств в качестве исходного продукта берут не один, а два или три различных мономера в определенных пропорциях. Такой процесс полимеризации называется совместной полимеризацией, или сополимеризацией, а готовый продукт называют совместным полимером, или сополимером. Для сополимеров характерно то, что они сочетают в себе свойства обоих или нескольких полимеров, получаемых отдельно из исходных мономеров. Причем в зависимости от соотношения числа применяемых мономеров, а также предполагаемого назначения сополимеров те или иные присущие мономерам свойства могут быть усилены или ослаблены. Современное состояние химии высокополимеров позволяет получать полимеры с заранее заданными свойствами.

Поликонденсацией называется процесс соединения друг с другом большого числа молекул низкомолекулярных полифункциональных веществ, происходящий с отщеплением простых составных частей молекул в виде воды, спирта, хлористого водорода, аммиака и др.

Функциональными называют соединения, содержащие две или более химически активные группы атомов. В результате реакции поликонденсации бифункциональных соединений с двумя функциональными группами получают полимеры линейной структуры, а в результате реакции поликонденсации соединений с тремя и более функциональными группами получают полимеры пространственной трехмерной структуры.

√ Поликонденсация в отличие от цепной реакции полимеризации — ступенчатый процесс. Рост цепи молекул полимеров происходит путем взаимодействия одной исходной молекулы с другой. Образовавшееся соединение (олигомер) реагирует со следующими молекулами исходных веществ и т.п.

При формовании труб и других изделий на основе полимеров, отверждающихся с выделением летучих веществ, необходимы высокие давления и температуры, чтобы изделия были плотными и качественными. Отверждение их осуществляется горячим способом с применением отвердителей — веществ, добавляемых к полимерам и служащих для "сшивания" их молекул друг с другом.

Обе реакции получения высокомолекулярных веществ — частные случаи двух основных реакций органической химии — реакции присоединения (полимеризации) и реакции замещения (поликонденсации).

Некоторые полимеры образуются в результате ступенчатой полиме-

ризации, состоящей из нескольких реакций, протекающих путем последовательного контакта реагирующих молекул с возникновением на каждой ступени реакции промежуточных устойчивых линейных соединений без выделения побочных продуктов, что позволяет получить с их использованием качественные пластмассовые трубы и другие изделия без применения высоких температур и давлений при холодном отверждении.

Полимерные вещества получают не только химическим синтезом простых веществ путем использования реакций полимеризации, поликонденсации и других (синтетическим путем), но также в результате химической модификации природных высокомолекулярных веществ, например, путем химической обработки природной целлюлозы хлопка или целлюлозы, выделенной из древесины (химическим синтезом).

В качестве полимерного связующего часто используют смеси полимеров. При этом стремятся к оптимальному сочетанию свойств компонентов, обеспечивающему достижение заданного комплекса эксплуатационных свойств материала или изделия. При составлении смеси полимеров учитывают их совместимость.

Под совместимостью полимеров понимают их способность образовывать при определенных температуре, давлении, концентрации устойчивую систему из молекулярно диспергированных компонентов. На практике в большинстве случаев смеси полимеров оказываются термодинамически несовместимыми. Причем оптимальные эксплуатационные свойства полимерного материала на основе смеси полимеров, например прочность, достигаются не при молекулярном перемешивании компонентов смеси, а при некоторой степени неоднородности системы.

Как правило, при составлении полимерной композиции отправной точкой служат такие условия эксплуатации материала, как интервал температур эксплуатации, уровни механических и других воздействий, при которых рабочие характеристики должны иметь допустимые значения в пределах заданного времени эксплуатации.

Наполнитель — важнейшая составная часть пластмассовых труб. Полимерное связующее цементирует наполнитель и придает пластические свойства всей полимерной композиции. Наполнители служат для модификации свойств материала. Они улучшают физико-механические, диэлектрические и другие свойства пластмасс, повышают их теплоустойчивость, уменьшают усадку, а также снижают стоимость.

В пластмассовых трубах применяют органические и неорганические наполнители. Органические наполнители — древесная мука, хлопковые очесы, целлюлоза, бумага, хлопчатобумажная ткань, древесный шпон и стружка. В качестве неорганических наполнителей используют асбест, графит, стекловолокно, стеклоткань, слюду, кварц и т.д. Наполнители применяют в порошкообразном виде, а также в виде волокон (волокна хлопка, асбеста и др.) и полотнищ. Наполнители в виде полот-

ниц (тканых или нетканых) и листов позволяют получать трубы из слоистых пластмасс высокой прочности. При использовании в качестве наполнителя хлопчатобумажной ткани получают текстолитовые трубы, при использовании стеклоткани — стеклотекстолитовые трубы, при использовании бумаги — гетинаксовые трубы и при использовании асбестовой ткани — асбестотекстолитовые трубы.

Особую группу наполнителей составляют армирующие стекловолоконистые материалы — стекловолокно, стекложгуты, стекломаты, стеклоткани, с применением которых изготавливают, например, стеклопластиковые трубы, по прочности не уступающие стали.

В последнее время в качестве наполнителей применяют графитизированные волокна, а также волокна из полимерных материалов: полиамидные, полиамидазольные, полиэфирные и др.

Графитизированные волокна получают нагреванием полимерных волокон в среде инертного газа до тех пор, пока в результате отщепления атомных группировок от основных цепей не образуются волокна, состоящие из графита, имеющие очень высокую прочность (~300 МПа). Их можно получать и из натуральных материалов.

Большое внимание в науке и технике уделяют разработке так называемых композитов, создаваемых с применением различных наполнителей. Композиты — класс гетерогенных материалов, состоящих из металлической или полимерной основы (матрицы) с равномерно распределенными в ней непрерывными или короткими волокнами или нитевидными кристаллами. Удельная прочность композитов, а также жесткость, термостойкость и другие свойства очень высоки.

Пластификаторы вводят в пластмассы для улучшения их технологических свойств (при переработке и эксплуатации) и повышения их эластичности. При снижении температуры стеклования смолы пластификаторы улучшают морозостойкость, повышают эластичность и гибкость пластмасс. Пластификаторами могут служить как низкомолекулярные, так и высокомолекулярные соединения различной природы. К ним предъявляются следующие основные требования: способность совмещаться с полимером, низкая летучесть, бесцветность, отсутствие запаха, сохранение пластифицирующего действия при самых низких температурах, химическая стойкость, как и у полимерных компонентов.

К числу важнейших пластификаторов относятся эфиры ароматических и алифатических карбоновых кислот, фосфорной кислоты, полиэфиры, эфиры гликолей и поликарбоновых кислот и другие вещества. В качестве пластификаторов часто применяют, например, дибутилфталат, трикрезилфосфат и другие вещества в зависимости от вида полимера.

Стабилизаторы предотвращают термическую деструкцию (разложение) полимерных материалов в процессе их переработки, а также останавливают их старение при эксплуатации под действием атмосферных условий, повышенных температур и других факторов.

Стабилизаторы делятся на антиоксиданты, антиозонанты, антирады и светостабилизаторы. Антиоксидантами и антиозонантами называют вещества, повышающие устойчивость полимеров к действию кислорода и атмосферного озона соответственно. Антирады повышают стойкость полимерных композиций к ионизационному излучению. Светостабилизаторы повышают стойкость полимеров против старения от действия солнечного света.

Основная причина старения полимерных материалов – их окисление молекулярным кислородом. Старение полимеров проявляется в деструкции и структурообразовании и ускоряется с температурой и под воздействием видимого света, а особенно ультрафиолетовых лучей. Термическая деструкция – обычно цепная реакция. Ее можно замедлить добавлением в полимерную композицию стабилизаторов.

Для стабилизации, например, полиэтилена применяют ароматические амины, фенолы, сернистые соединения и газовую сажу. Для предотвращения деструкции поливинилхлорида в процессе его переработки при повышенных температурах вводят в качестве стабилизаторов различные вещества и их сочетания: оловоорганические соединения, силикат кальция, стеарат свинца и др.

Отвердитель (сшивающие агенты) вводят в полимерные композиции на определенной стадии переработки с целью сшивания линейных макромолекул в единую трехмерную (сшитую) сетку. При этом происходят химические реакции и отверждение полимерной композиции. Эти реакции могут протекать под действием теплоты, излучений высокой энергии, ультрафиолетового излучения, а также катализаторов. Выбор отверждающей системы, катализатора или собственно отвердителя проводят исходя из требуемого комплекса свойств пластмассы и химического строения полимера. Отвердители должны раствориться в исходном полимере (олигомере), быть нетоксичными, обеспечивать необходимую скорость отверждения и заданную скорость поперечного сшивания, сохранять свои свойства достаточно длительное время до начала процесса отверждения (полиэтиленполиамин, гексаметилендиамин, перекись бензола и др.).

Краситель вводят в полимеры для придания окраски. Полимеры окрашивают синтетическими органическими красителями, а также органическими и минеральными пигментами. Цвет окраски не должен изменяться при изготовлении и эксплуатации изделий из пластмасс.

Смазочное вещество (стеарин, олеиновая кислота, трансформаторное масло) уменьшает трение внутри пластмассовой композиции при ее переработке в изделия, снижает ее вязкость и предупреждает прилипание пластмассы к пресс-форме.

В настоящее время полимерные композиции составляют на основе новейших достижений химии, физики и технологии полимеров с использованием математических приемов с применением ЭВМ.

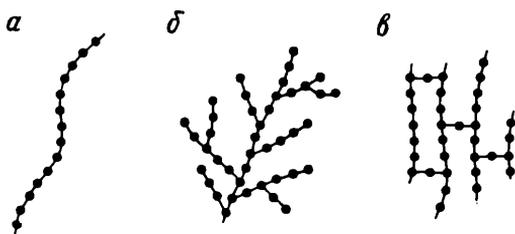


Рис. 68. Схемы строения полимера:

а – линейная структура; *б* – разветвленная структура; *в* – сетчатая структура

Высокомолекулярные полимерные вещества по строению их молекул можно разделить на две основные группы: полимеры, состоящие из длинных цепей молекул линейной или разветвленной структуры (рис. 68, *а, б*); полимеры, построенные из сетчатых плоскостных (рис. 68, *в*) или объемных структур.

Полимеры разветвленной структуры обладают большей мягкостью и эластичностью по сравнению с полимерами линейной структуры, так как чем длиннее боковые цепи, тем слабее межмолекулярные силы. Наоборот, уменьшение длины боковых цепей увеличивает жесткость полимера. Однако при очень длинных боковых цепях жесткость полимера вновь возрастает, потому что при этом увеличивается торможение движения молекул и может образоваться сетчатая структура.

Характерные особенности термопластичных полимеров – цепное строение молекул и их высокая гибкость.

По структуре в твердом состоянии полимеры могут быть аморфными и кристаллическими (рис. 69). Твердое аморфное тело отличается от кристаллического тем, что в нем сохраняется структура, соответствующая структуре жидкости. Такое состояние твердого вещества называется стеклообразным.

Кристаллизация наблюдается только у линейных полимеров или у полимеров, обладающих очень слабо развитой разветвленной структурой. Полимеры с сетчатой структурой практически не кристаллизуются.

В кристаллическом состоянии плотность упаковки молекул осуществляется за счет параллельного расположения их осей.

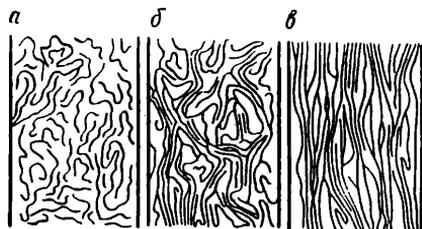


Рис. 69. Структура полимера в твердом состоянии:

а – аморфная; *б* – аморфная с кристаллическими участками; *в* – преимущественно кристаллическая

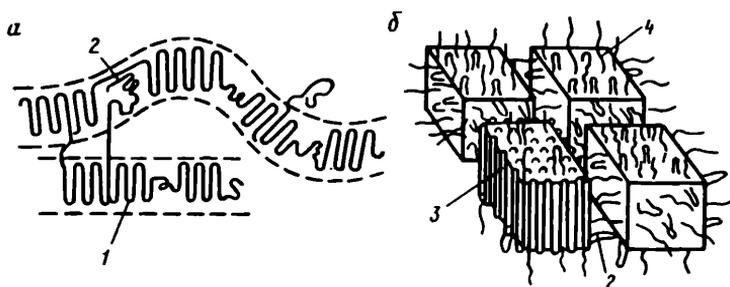


Рис. 70. Схема структуры кристаллического полимера:

а – доменно-фибрилярное строение расплава полимера; *б* – группа кристаллов полимера в твердом состоянии; 1 – домена; 2 – проходной участок макромолекулы (аморфная область); 3 – петля домены; 4 – кристаллит-фибрилла

Кристаллическая структура полимера характеризуется определенной элементарной ячейкой кристаллической решетки. Например, кристалл полиэтилена имеет орторомбическую элементарную ячейку. Если в полимере к моменту начала кристаллизации существовало очень много зародышей и было достигнуто большое переохлаждение расплава, то кристаллизация протекает быстро и возникает микрокристаллическая структура. Но особенно часто кристаллизация протекает медленно; тогда возникают более крупные кристаллические структуры, простейшими из которых являются фибриллярные кристаллы (фибриллы). Фибриллы образованы из доменов (рис. 70), связанных мостами – проходными петлеобразными участками (аморфные области). Домены – локализованные области, состоящие из сложенных участков (сегментов) макромолекул. Кристаллизация полимеров протекает не полностью. Обычно кристаллизуется часть полимера (50 %, лишь в очень редких случаях 70–90 %).

В кристаллических образованиях молекулы имеют более плотную упаковку и меньшую гибкость. Поэтому кристаллические полимеры обладают большей жесткостью, большим модулем упругости и меньшей способностью к деформации.

Степень кристаллизации полимеров зависит также от стереоизомерии молекулы – различного пространственного размещения одних и тех же атомов или их группировок в молекуле.

То или иное полимерное вещество в зависимости от особенностей строения его молекул и от внешних условий при охлаждении может застекловаться (затвердеть в стеклообразном состоянии) или перейти в кристаллическое состояние. При этом происходит резкое изменение механических свойств, и прежде всего резкое снижение способности тела к деформации под действием определенных нагрузок.

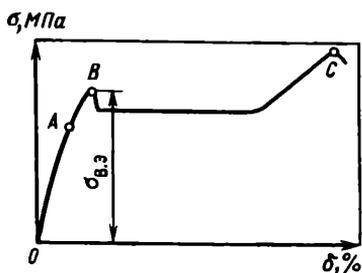


Рис. 71. Кривая растяжения аморфного (стеклообразного) полимера

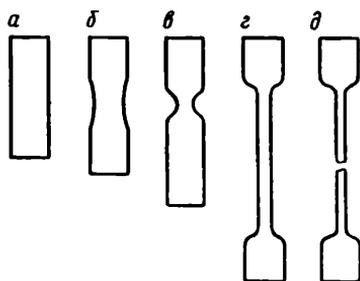


Рис. 72. Деформация образца из стеклообразного полимера при растяжении:

a – исходный образец; *б* – незначительное уменьшение поперечного сечения за счет увеличения общей длины; *в* – начало образования шейки; *г* – шейка сформирована; *д* – разрушение шейки

Высокомолекулярные полимеры в стеклообразном состоянии способны деформироваться на десятки и даже сотни процентов и переходить в хрупкое состояние лишь при температурах, иногда на много десятков градусов более низких, чем температура их стеклования.

Для аморфных полимеров в стеклообразном состоянии на зависимости напряжения σ от относительной деформации δ (рис. 71) наблюдается участок *OA*, соответствующий пропорциональной зависимости между напряжением σ и деформацией δ (закону Гука). Модуль упругости таких полимеров составляет около 10^3 МПа. Деформация на этом участке обратима. Она равна нескольким процентам от первоначальной длины образца. При приближении к точке *B* кривая все больше отклоняется от линейной зависимости.

В точке *B* достигается максимум напряжений. Напряжение, соответствующее точке *B*, называют пределом вынужденной эластичности $\sigma_{в.э.}$

Как только механические напряжения в материале достигают значений, соизмеримых с межмолекулярными силами, начинается взаимное перемещение сегментов макромолекул. Сегменты макромолекул как бы "плавятся" в поле механических сил. По достижении $\sigma_{в.э.}$ материал начинает течь – происходит вынужденно-эластическая деформация. При этом макромолекулы полимера ориентируются в направлении действия силы, что прекращает дальнейшее проявление высокопластичности. Деформация полимера быстро увеличивается даже при снижении $\sigma_{в.э.}$ до постоянного значения в некоторый период. Эта деформация способна быть обратимой, но она не является следствием вязкого течения, поэтому она недопустима для конструкционных материалов.

Эта деформация является почти полностью обратимой при нагреве до температуры, лишь незначительно превышающей температуру стекло-

вания. В ориентированном при растяжении аморфном полимере при дальнейшем нагружении до точки C снова возникают упругие деформации, исчезающие после снятия нагрузки.

При деформировании полимеров в стеклообразном состоянии наблюдаются следующие изменения внешнего вида образцов при растяжении (рис. 72). Началу образования шейки при растяжении образца соответствует момент достижения максимума напряжения — $\sigma_{в.э}$. После достижения предела вынужденной эластичности поперечное сечение образца в шейке уменьшается, но лишь до известного предела. Шейка начинает образовываться в наиболее слабом месте (например, в месте микродефекта). Но перенапряжение в микродефекте не приводит к хрупкому разрушению, а вызывает вынужденноэластическую деформацию в этом месте. Происходит как бы втекание материала в шейку. Когда вся так называемая рабочая часть образца перейдет в шейку, образец начинает тянуться как единое целое и снова наблюдается рост напряжения по мере увеличения деформации до точки C .

Кривая растяжения кристаллического полимера состоит из трех резко обособленных участков (рис. 73). На участке I деформация при растяжении пропорциональна напряжению σ согласно закону Гука. При этом деформация образца обратима. При некотором напряжении происходит резкий перегиб кривой. Кривая переходит в участок II , на котором напряжение практически остается постоянным, а удлинение быстро возрастает. При этом на образце возникает шейка, которая постепенно распространяется на всю рабочую часть образца, но не сосредоточивается в одном месте, как это происходит при растяжении металла. Считают, что на участке II происходит рекристаллизация полимера. Беспорядочно расположенные кристаллы разрушаются (как бы "плавятся") и образуются новые, ориентированные в направлении растяжения более прочные кристаллы. Деформация образца, соответствующая участку II , необратима, т.е. не исчезает после снятия нагрузки. Она составляет несколько сот процентов. Напряжение, определяемое как отношение нагрузки на этой стадии растяжения к первоначальному сечению образца, называется пределом текучести σ_T .

Со временем, когда необратимая деформация достигнет некоторого максимума, усилие растяжения начинает возрастать и кривая переходит в участок III . На этой стадии растяжения удлинение почти пропорционально растягивающей силе и деформация почти обратима. Далее происходит разделение образца на части при напряжении, называемом разрушающим.

Предел текучести зависит от рода полимера, степени его кристалличности и температуры, при которой происходит растяжение. Чем сильнее выражена кристаллическая структура полимера, тем выше будет предел текучести. Разрушающее напряжение (предел прочности) зависит от

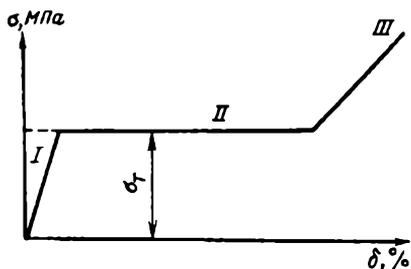


Рис. 73. Кривая растяжения кристаллического полимера

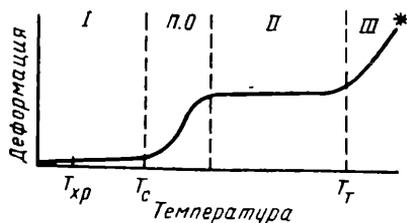


Рис. 74. Термомеханическая кривая аморфного полимера (звездочкой отмечена температура начала термодеструкции)

свойств полимера, температуры и скорости нагружения, а также от времени воздействия внешних сил.

Предел текучести образца при испытании на растяжение определяют по нагрузке, соответствующей началу роста удлинения образца и образования шейки. Разрушающее напряжение при растяжении определяют как частное от деления разрушающей нагрузки на первоначальную площадь поперечного сечения образца.

Полимеры могут находиться в твердом или жидком агрегатном состоянии в зависимости от температуры. Но твердому агрегатному состоянию могут соответствовать два фазовых состояния: кристаллическое и стеклообразное (жидкостное), а жидкому фазовому состоянию — твердое (стеклообразное) и жидкое (расплав).

Физическое состояние полимеров при нагревании характеризуется их деформационной способностью под действием постоянного усилия. Аморфные полимеры при нагревании последовательно находятся в трех состояниях: стеклообразном I, высокоэластичном II и вязкотекучем III (рис. 74). При переходе из стеклообразного состояния в высокоэластичное наблюдается переходная область (п.о.). Механизм перехода полимера из одного физического состояния в другое можно представить исходя из особенностей теплового движения макромолекул. У полимера одновременные поступательные или даже колебательные движения молекул в целом невозможны. Благодаря значительной гибкости макромолекул их относительное перемещение происходит не сразу, а постепенно, частями, в результате теплового движения отдельных сегментов. В то время как перемещается один из сегментов макромолекулы, другие сегменты могут не изменять своего относительного расположения. Сегментом называют средний статистический отрезок макромолекулы, перемещающийся как единое целое в элементарном акте теплового движения.

При низких температурах в стеклообразном состоянии *I* молекулы полимера можно считать неподвижными и деформацию обратимо упругой. В высокоэластичном состоянии *II* под действием постоянного усилия полимеры приобретают способность к обратимой деформации. При этом отдельные секторы макромолекул находятся в интенсивном тепловом движении, но относительное положение всей молекулы остается неизменным. В вязкотекучем состоянии полимер напоминает жидкость. При этом у полимеров возникает необратимая пластическая деформация под воздействием иногда сравнительно небольших внешних воздействий. Она обусловлена в основном скольжением молекул относительно друг друга.

Температура, при которой аморфный полимер переходит при охлаждении в стеклообразное состояние, называется температурой стеклования T_c . При понижении температуры ниже температуры стеклования наблюдается уменьшение теплового движения тех сегментов макромолекул, которые до того обладали некоторой подвижностью. Полимер разрушится как хрупкое тело при ничтожной деформации. Температура, при которой наблюдается это явление, называется температурой хрупкости $T_{хр}$. Если нагревать застеклованный полимер, то сразу после превышения температуры стеклования полимер размягчается (переходная область) и переходит в высокоэластичное состояние. Температуру перехода в этом случае удобнее называть температурой размягчения (температура стеклования).

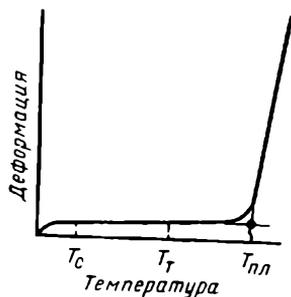
Физическое состояние полимера в условиях эксплуатации, частичная или полная его кристалличность обуславливают комплекс его механических свойств и характер практического применения.

Полимеры, находящиеся при обычной температуре в стеклообразном состоянии или же в значительной мере закристаллизованные, — жесткие пластики, часть которых может быть переработана в волокна, а также лаки. Полимеры, находящиеся в высокоэластичном состоянии (эластомеры), применяют обычно для получения резиновых изделий.

Температура, при которой аморфный полимер переходит при нагревании в вязкотекучее состояние (жидкое), называется температурой текучести T_T .

У кристаллических полимеров обычно не выражено высокоэластичное состояние (рис. 75). Тогда они плавятся в узком температурном интервале, превращаясь в вязкую жидкость, т.е. в интервале температур $T_c - T_{пл}$ (где $T_{пл}$ — температура плавления). Таким образом, при температурах ниже температуры стеклования T_c полимеры обладают способностью к упругой деформации. При превышении T_c аморфные полимеры приобретают способность к высокоэластичной и пластической деформациям, а кристаллические полимеры — к пластической деформации. При температурах выше T_T (для аморфных полимеров) и $T_{пл}$ (для кристал-

Рис. 75. Термомеханическая кривая кристаллического полимера



лических) полимеров преобладающей становится пластическая деформация.

При нагревании кристаллического полимера до расплавления его свойства меняются скачкообразно, т.е. при $T_{пл}$ происходит фазовое превращение полимера из твердого в жидкое состояние и соответственно этому резко изменяются и свойства полимера.

Классификация труб. В зависимости от изменения свойств при нагревании синтетических смолы (полимерное связующее), а соответственно и пластмассовые трубы подразделяются на термопластичные (термопласты) и терморезистивные (реактопласты).

Термопластичными называются смолы, свойства которых при нагревании меняются обратимо: размягчаясь при нагревании, они затвердевают при охлаждении и приобретают исходные свойства. Многократное нагревание с последующим охлаждением не вносит существенных изменений в этот процесс. Поэтому трубы из термопластичных пластмасс сваривают различными методами сварки.

Терморезистивными называются такие смолы, которые при нагревании вследствие химических превращений необратимо переходят в неплавкое и нерастворимое состояние, что исключает возможность сварки труб на их основе.

В зависимости от рода полимерного связующего и способа его получения для изготовления труб применяют пластмассы следующих классов:

класс А — пластмассы на основе высокополимеров, получаемых цепной полимеризацией;

класс Б — пластмассы на основе высокополимеров, получаемых поликонденсацией и ступенчатой полимеризацией;

класс В — пластмассы на основе химически модифицированных природных высокомолекулярных веществ.

В зависимости от химической структуры и свойств полимеров классы пластмасс делятся на группы.

Класс А включает следующие группы пластмасс, получившие применение в производстве пластмассовых труб: этиленопласты — на ос-

нове продуктов полимеризации этилена и его гомологов (гомологами называют близкие по составу и строению вещества); винипласты — на основе продуктов полимеризации хлорзамещенных производных этилена; акрилопласты — полимеры производных акриловой и метакриловой кислот и др.

К классу Б относятся: фенопласты — полимеры на основе продуктов конденсации фенолов с альдегидами; аминопласты — на основе продуктов конденсации аминов (мочевины, меламина и др.) с альдегидами; эфиропласты — на основе сложных эфиров многоосновных кислот и многоатомных спиртов; эпоксиласты — на основе эпоксидных смол; аминопласты — на основе полиамидов; силикопласты — на основе кремнийорганических соединений, применяемых в производстве, например стеклопластиковых труб.

По классу В применение в производстве труб имеет одна группа пластмасс: целлопласты — на основе продуктов химической переработки целлюлозы (простых и сложных эфиров, а также регенерированной целлюлозы), например ацетобутиратцеллюлозы.

Каждая группа пластмасс подразделяется на различные виды. Так, группа этиленопластов включает в себя следующие виды пластмасс: полиэтилен, полипропилен, полиизобутилен.

Виды пластмасс делятся на различные сорта и марки.

Из термопластичных пластмасс (термопласты) класса А наиболее широкое применение для изготовления труб в Советском Союзе и за рубежом имеют полиэтилен, поливинилхлорид, полиметилметакрилат, полипропилен и др.

Наиболее подходящими для нефтяной и газовой промышленности трубами из терморезистивных пластмасс (реактопласты) класса Б являются стеклопластиковые трубы.

Терморезистивные трубы в отличие от термопластичных всегда содержат наполнитель. Наименование их соответствует применяемому наполнителю — стеклопластиковые, текстолитовые и др.

В Советском Союзе и за рубежом наибольшее применение получили пластмассовые трубы из термопластичных смол (50–90 % от общего количества пластмассовых труб).

Терморезистивные смолы используют только в тех случаях, когда трубы из термопластичных полимеров нельзя применять из-за высоких давлений, повышенных температур и значительной коррозионной опасности.

Пластмассовые трубы наиболее целесообразно использовать взамен стальных для сооружения городских газопроводов (табл. 23), а также обвязочных трубопроводов на нефтяных промыслах для сбора попутных газов, транспортировки от скважин коррозионно-активных нефтей, пластовых вод и т.д.

Все более широкое использование пластмассовых труб обусловлено

Т а б л и ц а 23. Область применения различных пластмассовых труб в зависимости от допускаемого давления в газопроводе

Трубы	Допускаемое давление газа, МПа	Область применения
Полиэтиленовые	0,6	Вне территории городов, поселков и сельских населенных пунктов
Полихлорвиниловые Полиэтиленовые с небольшим числом ответвлений от этих газопроводов	0,3 0,3	То же На территории поселков и сельских населенных пунктов с малым насыщением инженерными коммуникациями
Полихлорвиниловые с небольшим числом ответвлений от этих газопроводов	0,005	То же

строительством химических комбинатов и заводов, дешевизной сырья и открытием новых сырьевых ресурсов, а также удешевлением производства и повышением качества и стабильности свойств синтетических смол за счет совершенствования существующих и создания новых технологических процессов в химии полимеров, повышением качества используемых при этом исходных материалов, совершенствованием и созданием новых методов изготовления труб и т.д.

Непрерывное улучшение свойств пластмасс и создание новых их видов — предпосылки для получения высококачественных пластмассовых труб, выдерживающих высокие давления и температуры.

Изготовление труб

В отличие от других материалов процесс изготовления труб и различных изделий из пластмасс характеризуется почти полным отсутствием отходов, более высоким уровнем производительности труда и небольшими эксплуатационными затратами.

Формование труб из термопластичных и термореактивных пластмасс осуществляется различными методами. Наиболее распространенный способ изготовления труб из термопластичных пластмасс — непрерывная шнековая экструзия (выдавливание). Процесс изготовления труб диаметром до 500 мм методом экструзии заключается в непрерывном выдавливании полимерной композиции через кольцевую щель формирующей головки экструдера с последующим охлаждением.

Гранулы полимера загружают в бункер экструдера 1 (рис. 76), где они расплавляются и выдавливаются через формирующую трубную

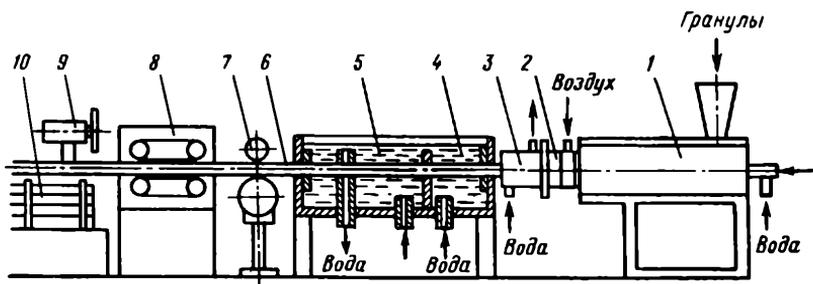


Рис. 76. Установка для изготовления труб методом экструзии

головку 2 в виде трубы 6. Далее труба поступает в калибровочную насадку (гильзу) 3, в которой она частично охлаждается и приобретает необходимые размеры. При этом в трубу подводится сжатый воздух для прижатия ее к стенкам насадки или создается вакуум между трубой и насадкой. Затем труба охлаждается в ванне с двумя температурными зонами 4 и 5, проходит маркировку в устройстве 7, протягивается тянущим устройством 8 и разрезается пилой 9. Готовые трубы поступают на приемный стол 10. Трубы небольшого диаметра сматываются в бухты.

Трубы из термопластичных, а также из термореактивных пластмасс можно изготавливать методом горячего прессования на гидравлических прессах (рис. 77). Материал 5 после специальной подготовки на вальцах или смесителях загружают в горячем состоянии в обогреваемый цилиндрический корпус 1 пресса и выдавливают плунжером 6 через головку пресса. Головка имеет распределительную сетку для смешивания материала, а также сменные мундштук 2 и дорн 4, образующие кольцевое пространство для оформления трубы 3 по заданным размерам. Трубу, сформованную на основе термореактивных полимеров, подают далее на горячее отверждение для закрепления полученной формы. Труба на основе термопластичных полимеров приобретает форму и размеры после остывания материала. Отверждение термореактивных смол проводят холодным или горячим способом в зависимости от химической природы полимерного связующего.

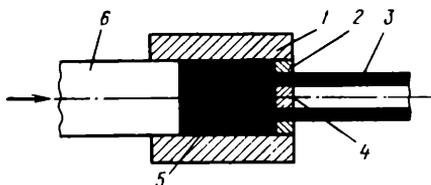


Рис. 77. Схема изготовления пластмассовой трубы методом горячего прессования на гидравлических прессах

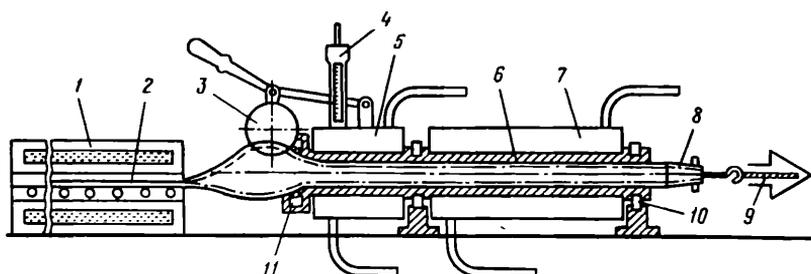


Рис. 78. Схема изготовления пластмассовых труб из листовой заготовки:

1 – печь; 2 – заготовка из термопласта; 3 – сварочная головка; 4 – контактный термометр; 5 – камера предварительного охлаждения; 6 – оформляющая часть раструбной трубы; 7 – камера интенсивного охлаждения; 8 – захват; 9 – тяговое устройство; 10 – стойка; 11 – раструбная часть оформляющей трубы

Недостатки метода горячего прессования труб – цикличность процесса, большое число немеханизированных операций, необходимость в дополнительном оборудовании для подготовки полимерных материалов (вальцы, смесители и др.), нестабильность качества труб (вздутия, трещины), а также большие отклонения по толщине стенки, овальности и др.

Из листовых термопластов трубы можно изготавливать способом сварки давлением (компрессионной) (рис. 78). Заготовки из термопластичного материала подвергают предварительному нагреву в электропечи 1 до пластичного состояния и протягивают через специальную раструбную оформляющую трубу 6 с помощью специального устройства 9. При протягивании через раструбную часть оформляющей трубы заготовка сворачивается в трубу, а ее кромки в момент схождения интенсивно разогреваются электрическими элементами или струей горячего воздуха, поступающего из специальной сварочной головки 3. Разогретые кромки трубы свариваются под действием давления по мере прохождения через раструбную часть 11 оформляющей трубы. Давление при сварке определяется размером листовой заготовки и температурой кромки. Далее сваренную трубу калибруют в цилиндрической части оформляющей трубы и охлаждают.

Для изготовления труб диаметром 300–1200 мм из термопластичных и термореактивных пластмасс применяют центробежный способ (рис. 79). При изготовлении, например, полиэтиленовой трубы порошок полиэтилена засыпают во вращающийся металлический обогреваемый цилиндр 3. Когда температура стенок цилиндра достигает более 200°С, происходит сплавление порошка в монолитную массу. Эта масса под действием центробежной силы равномерно распределяется по стенке цилиндра. После отключения обогрева цилиндр продолжает

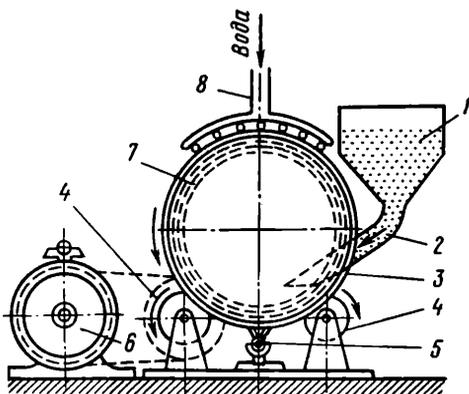


Рис. 79. Схема изготовления полистиленовой трубы центробежным способом:

1 — бункер; 2 — питающая труба; 3 — вращающийся цилиндр; 4 — приводной ролик; 5 — горелка для нагрева; 6 — электродвигатель; 7 — слой полистилена; 8 — устройство для водяного охлаждения

вращаться и его охлаждают водой или воздухом. Охлажденную трубу благодаря усадке полистилена легко извлекают из формы. По количеству засыпаемого в цилиндр порошка определяют толщину трубы. При изготовлении труб диаметром 500 мм и более в цилиндр помещают эксцентрично вращающийся вал, который как бы обкатывает и утрамбовывает слой полистилена.

Формование центробежным способом (рис. 80, а) труб из термоактивных материалов со слоистым или стекловолоконистым наполнителем начинают с изготовления заготовки из наполнителя с помощью оправки. Полученную заготовку из наполнителя снимают с оправки и помещают в цилиндрическую форму. Затем вовнутрь формы вводят связующее и форму приводят во вращение. В процессе вращения формы происходит выравнивание армирующего стеклонаполнителя и полимерного связующего под действием центробежных сил. Для отверждения полимерного связующего формуемую трубу нагревают, например, подачей пара в рубашку, располагающуюся вокруг формы.

Трубы больших диаметров с более высокими механическими свойствами, чем трубы, изготавливаемые на центробежных установках, получают также способом намотки. В случае изготовления труб из термопластичных материалов лента расплавленного материала, полученная экструзионным методом, подается на вращающийся сердечник, расположенный перпендикулярно к направлению экструзии. Так как сердечник одновременно с вращением совершает поступательное движение вдоль своей оси, полимерная лента навивается на сердечник и сваривается по спиральной линии. Таким способом можно изготавливать прочные полистиленовые, полипропиленовые и другие трубы с армированием в процессе экструзии текстильными, металлическими или стеклянными нитями. Армирующая нить, сходящая с вращающейся катушки при определенном натяжении, внедряется в стенку формируемой трубы и остается в ней в виде спиральной арматуры.

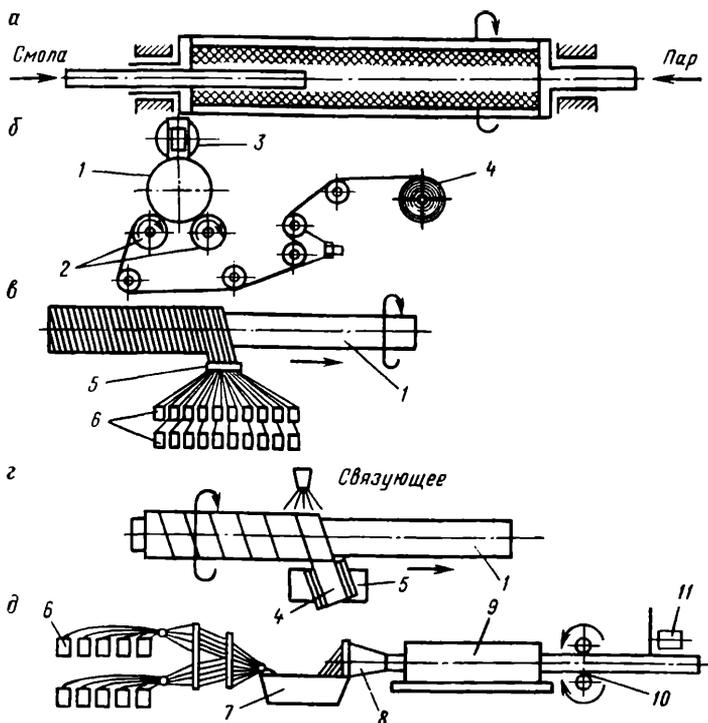


Рис. 80. Схемы изготовления труб методами: центробежным (а), намотки стеклоткани (б), стеклонитей (в), стеклолент (з), протяжки стеклонитей (д):

1 — оправка; 2 — ведущие (обогреваемые) валки; 3 — прижимной валок; 4 — рулон стекломатериала; 5 — каретка; 6 — бобины со стеклонитями; 7 — проточная ванна; 8 — узел формования; 9 — полимеризационная камера; 10 — протяжные валки; 11 — резак

Метод намотки широко распространен и для изготовления труб из терморезистивных материалов, особенно из стеклопластиков. Технологический процесс производства труб из стеклопластиков состоит из пропитки стекломатериала, формования трубы, опрессовки, полимеризации и окончательной ее обработки. Формование труб из стеклопластиков выполняют по-разному. При формовании трубы на намоточном станке с прижимным валом (рис. 80, б) стеклоткань шириной, равной длине формуемой трубы, сматывается с рулона 4 и при равномерном натяжении передается с помощью системы валков на цилиндрическую оправку. Оправка 1 приводится во вращение от ведущих обогреваемых валков 2, служащих также и для прогрева исходного материала. Плотность прилегания слоев стеклоткани достигается с помощью прижимного валка 3. Стеклоткань пропитывают заранее. Можно про-

питьвать стекломатериал и в процессе намотки с помощью специального устройства. Отверждение смолы осуществляют при нагреве. В некоторых случаях трубы подвергают опрессовке в обогреваемых формах. Этот способ формования труб периодический. Трубы получают с калиброванным внутренним диаметром.

При использовании армирующего материала в виде тканой стеклянной ленты или ровницы (жгутов) трубы изготовляют с помощью спиральной намотки (рис. 80, в). Жгуты стекловолокна, заранее (или в процессе намотки) пропитываемые связующим веществом, сматывают с бобин б и укладывают на оправку (дорн) по винтовой линии с помощью каретки 5. Винтовую намотку осуществляют сочетанием вращательного движения оправки и поступательного или возвратно-поступательного движения каретки 5 с бухтами жгутов или нитей.

Процесс изготовления труб может быть непрерывным, в этом случае формуемая труба с оправкой перемещается в продольном (осевом) направлении, а катушки со жгутами вращаются вокруг оправки. Изготовление труб способом спиральной намотки лент из стекломатериала (рис. 80, з) аналогично изготовлению труб способом спиральной намотки жгутов стекловолокна. Получаемые трубы отличаются более высокой газонепроницаемостью. Изготовление труб из стеклопластиков осуществляют также непрерывной протяжкой жгутов стекловолокна через специальное формующее устройство с предварительной пропиткой связующим (рис. 80, д). Получаемые трубы используют как конструкционный материал; для работы под давлением не применяют ввиду невысокой их прочности.

Особый вид представляют трубы из стекловолокнистого анизотропного материала (СВАМ), изготовленные при параллельной укладке стеклонитей или элементарных волокон на вращающуюся оправку с помощью каретки, движущейся возвратно-поступательно относительно оправки, с одновременной пропиткой наносимых слоев синтетическим связующим. С увеличением числа наматываемых слоев прочность труб из СВАМ значительно возрастает.

Полиэтиленовые трубы

Полиэтилен — продукт полимеризации газа этилена $\text{CH}_2=\text{CH}_2$. Он имеет линейное молекулярное строение и относится к термопластичным материалам. По внешнему виду полиэтилен представляет собой твердый высокоупругий белый материал, жирный на ощупь, режущийся ножом. Плотность его меньше единицы. По плотности полиэтилен подразделяется на полиэтилен низкой плотности — ПЭНП (молекулярная масса 80 000 — 500 000, плотность 0,92 — 0,93 г/см³), средней плотности — ПЭСП (молекулярная масса 300 000 — 400 000, плотность 0,93 —

0,94 г/см³) и высокой плотности — ПЭВП (молекулярная масса до 3 000 000, плотность 0,94–0,96 г/см³).

Полиэтилен низкой плотности получают при высоком давлении (100–300 МПа), температуре 200–300°С и небольших количествах кислорода в качестве инициатора полимеризации. Поэтому его называют также полиэтиленом высокого давления (ПЭВД). Полиэтилен средней плотности получают при средних давлениях 3,5–7 МПа и температуре 150–190°С в среде растворителя с катализатором. Полиэтилен высокой плотности получают при атмосферном или низком давлении 0,2–0,6 МПа в присутствии катализатора в среде растворителя (полиэтилен низкого давления — ПЭНД).

ПЭНП (ПЭВД) в своей структуре имеют меньше кристаллической фазы (55–70 %), чем ПЭВП (ПЭНД) (80–90 %). Наличием кристаллической фазы объясняется различие свойств видов полиэтилена. ПЭНД обладает малой разветвленностью молекул, большой молекулярной массой и отличается поэтому большей плотностью, прочностью, жесткостью, теплостойкостью по сравнению с ПЭВД и ПЭСД, которые, наоборот, являются мягкими и эластичными материалами. Прочность при растяжении ПЭВД составляет 10–17 МПа, относительное удлинение при разрыве 500–600 %. Прочность при растяжении ПЭНД составляет 18–35 МПа, относительное удлинение при разрыве 250–1 000 %, ударная вязкость по Шарпи на образцах с надрезом 2–150 кДж/м².

Зависимость свойств полиэтилена от температуры наблюдается как и у других полимеров. Особенно сильно изменяется при нагревании до различных температур предел прочности полиэтилена при растяжении. Например, у ПЭВД предел прочности (в МПа) составляет 38 при температуре –60°С, 13–16 при температуре 20°С и до 0,8 при температуре 60°С. При температуре выше 60°С полиэтилен становится высокоэластичным материалом.

Полиэтилен обладает высокими диэлектрическими свойствами, морозостойкостью (ниже –70°С), химической стойкостью в растворах щелочей, солей, кислот (в том числе плавиковой) и водостойкостью. Разрушается он лишь в присутствии окислителей (растворы азотной кислоты, перекисей). При обычной температуре полиэтилен нерастворим в органических растворителях, но набухает в диэтиловом эфире, бензине, бензоле, толуоле, ксилоле, хлороформе и четыреххлористом углероде. Растворимость ПЭВД несколько больше, чем ПЭНД. Набухание полимера сопровождается снижением прочности. С повышением температуры набухаемость полиэтилена возрастает. Выше температуры 60–80°С, по мере снижения степени кристалличности полиэтилена, он начинает растворяться в перечисленных растворителях. По отношению к нефти, газу и нефтепродуктам полиэтилен считают достаточно устойчивым. Набухание полиэтилена в нефтяных средах хотя и происходит в течение длительного времени, вызывает незначительное его разупрочнение.

Опыт эксплуатации газопроводов показал, что полиэтиленовые трубы имеют высокую стойкость к природному углеводородному газу (CH_4) и меньшую устойчивость к сниженной и газообразной пропан-бутановой смеси. Под воздействием паровой фазы пропан-бутановой смеси полиэтилен набухает, а при длительном действии жидкой фазы он теряет часть массы. Причем ПЭНП имеет меньшую устойчивость к этим средам, чем ПЭВП.

Действие активных сред на полиэтилен возрастает при работе его в напряженном состоянии.

Полиэтилен подвержен старению в процессе эксплуатации под действием тепла, кислорода воздуха, ультрафиолетовых лучей. При старении происходит ухудшение физико-механических свойств: уменьшаются морозостойкость, текучесть, относительное удлинение, ударная вязкость, повышается хрупкость. Поэтому при изготовлении полиэтилена вводят противостарители (например, фенолы). Влияние солнечного света на полиэтилен устраняется введением в него сажи в количестве 1–10 %. Для повышения физико-механических свойств и теплостойкости полиэтилен обрабатывают радиоактивными лучами.

При отсутствии прямого воздействия солнечной радиации и температурах до минус 15–20°C у подземных полиэтиленовых трубопроводов старение резко замедляется. Поэтому полиэтиленовые трубы ПЭНП рекомендуют к широкому применению для подземных газопроводов, транспортирующих природный газ. Для транспортировки искусственных газов и пропан-бутановой смеси газов в жидком и паровом состоянии полиэтиленовые трубы не рекомендуются.

Полиэтилен – горючий материал. Для уменьшения его горючести вводят специальные добавки (оксид сурьмы III, хлорированные углеводороды и др.). Наполнители, вводимые в полиэтилен, повышают его механические свойства и жесткость при нормальных и повышенных температурах. В полиэтилен также вводят минеральные наполнители: асбест, стекловолокно, кварц и др. В таких случаях полиэтилен называют соответственно асболополиэтиленом, стеклополиэтиленом и т.д. Модуль продольной упругости у асболополиэтилена и стеклополиэтилена выше, чем у чистого полиэтилена. Асболополиэтилен так же хорошо поддается механической обработке и сварке, как и чистый полиэтилен.

Полиэтиленовые трубы диаметром до 200 мм изготавливают методом экструзии путем непрерывного выдавливания размягченного пластика через профильное отверстие головки шнек-машины. Для труб диаметром 300–1200 мм применяют способ центробежного литья, а также способ намотки ленты полиэтилена на вращающийся сердечник. Ленту расплавленного полиэтилена получают методом экструзии.

Полиэтиленовые трубы изготавливают без наполнителя из ПЭНП и ПЭВП или с наполнителем в количестве 10–25 %. Например, для армирования полиэтиленовых труб стабилизированный полиэтилен

смешивают с асбестом марки П-3 (или другими наполнителями) на вальцах в течение 40 мин при температуре 160°С до получения однородной массы с равномерным распределением наполнителя. Вальцованную массу перерабатывают далее на шнек-машине в гранулы, а затем в трубы из асболополиэтилена методом экструзии. При смешивании полиэтилена со стекловолокном, например, в виде рубленой ровницы получают таким же способом трубы из стеклополиэтилена.

Полиэтиленовые трубы обладают некоторыми преимуществами, благодаря которым они получили наиболее широкое применение для изготовления как газонефтепроводов, так и трубопроводов различного назначения во всех отраслях промышленности. Основные из них – эластичность, морозостойкость, малое водопоглощение (менее 0,03 %), большая химическая стойкость, высокие диэлектрические и теплоизоляционные свойства, простота переработки в изделия и небольшая себестоимость. Применению полиэтилена способствует также его легкость, прекрасная сопротивляемость ударным нагрузкам и способность выдерживать напряжения, возникающие в случае замерзания воды в трубах. Благодаря хорошим электроизоляционным свойствам полиэтиленовые трубы не подвергаются воздействию блуждающих токов.

Гладкость стенок полиэтиленовых труб вызывает незначительные потери напора. Большая гибкость полиэтиленовых труб диаметром до 70 мм позволяет выпускать их длиной 100–200 м и поставлять намотанными на катушках.

К недостаткам полиэтиленовых труб относят их небольшую теплоустойчивость, высокий коэффициент линейного расширения, подверженность тепловому и световому старению, воспламеняемость и горючесть. Вследствие высокого коэффициента линейного расширения (в 60–65 раз больше стали) на длинных участках полиэтиленового трубопровода устанавливают компенсаторы, различные фасонные части (колена, тройники и т.д.).

Большой недостаток полиэтилена, как и других термопластов – полипропилена (ПП), поливинилхлорида (ПВХ), – ползучесть, т.е. медленная деформация при действии нагрузок. Поэтому в расчетах труб принимают длительное нормативное сопротивление материала разрушению R_n в зависимости от срока службы t и температуры эксплуатации T в соответствии с рис. 81, а–г.

По номинальному условному давлению напорные трубы из ПЭНД и ПЭВД делятся на четыре типа: легкого – тип Л (номинальное давление 0,25 МПа); среднелегкого – тип СЛ (номинальное давление 0,4 МПа), среднего – тип С (номинальное давление 0,6 МПа); тяжелого – тип Т (номинальное давление 1 МПа).

Номинальным условным давлением называется внутреннее гидростатическое давление, фиксируемое при длительной эксплуатации в

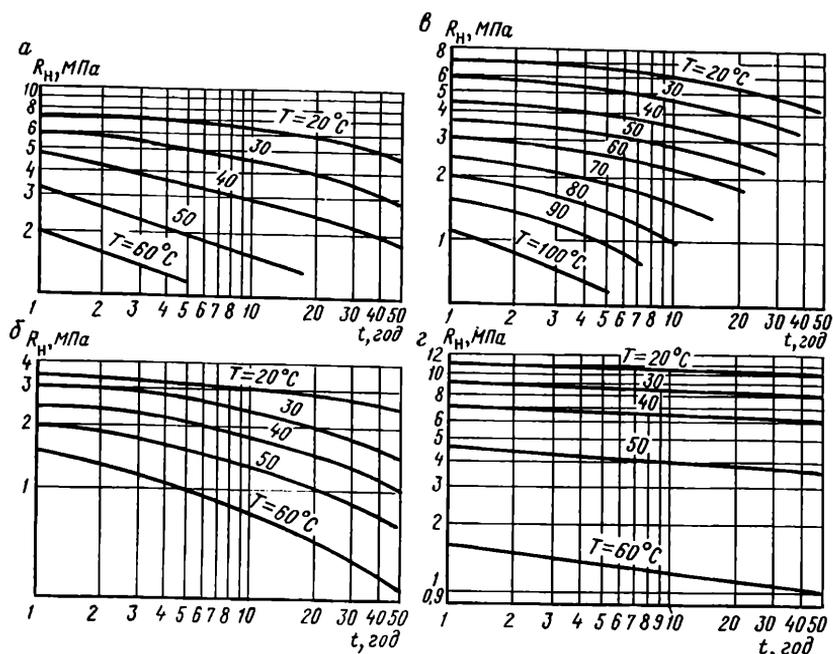


Рис. 81. Нормативное длительное сопротивление разрушению различных полимерных материалов R_H в зависимости от температуры T и срока службы трубопровода t :

a – из ПЭНД; $б$ – из ПЭВД; $в$ – из ПП; $г$ – из ПВХ

трубах, в которых транспортируют нейтральные жидкости или газы при температуре 20°C. Рабочие давления зависят от условий эксплуатации (рис. 82).

Для газонефтепроводов поставляют стандартные напорные трубы из ПЭВД типов: СЛ диаметром 75–160 мм, С диаметром 50–125 мм, Т диаметром 32–125 мм; а также из ПЭНД типов: СЛ диаметром 90–630 мм, С диаметром 63–450 мм, Т диаметром 40–280 мм.

По техническим условиям трубы изготавливают из ПЭНД типов: СЛ диаметром 710–1200 мм, С диаметром 63–800 мм и Т диаметром 63–500 мм.

Свойства труб и пределы их применения приведены в табл. 24.

Толщина труб из ПЭНД должна быть не менее 3 мм, труб из ПЭВД – не менее 6 мм. Длина труб диаметром свыше 160 мм составляет 6, 8 и 12 м. Их соединяют в секции длиной до 24 м. Трубы диаметром до 160 мм наматывают на барабан.

Полиэтиленовые трубы применяют для подземных нефтепроводов на давление до 0,3 МПа, а также для технологических трубопрово-

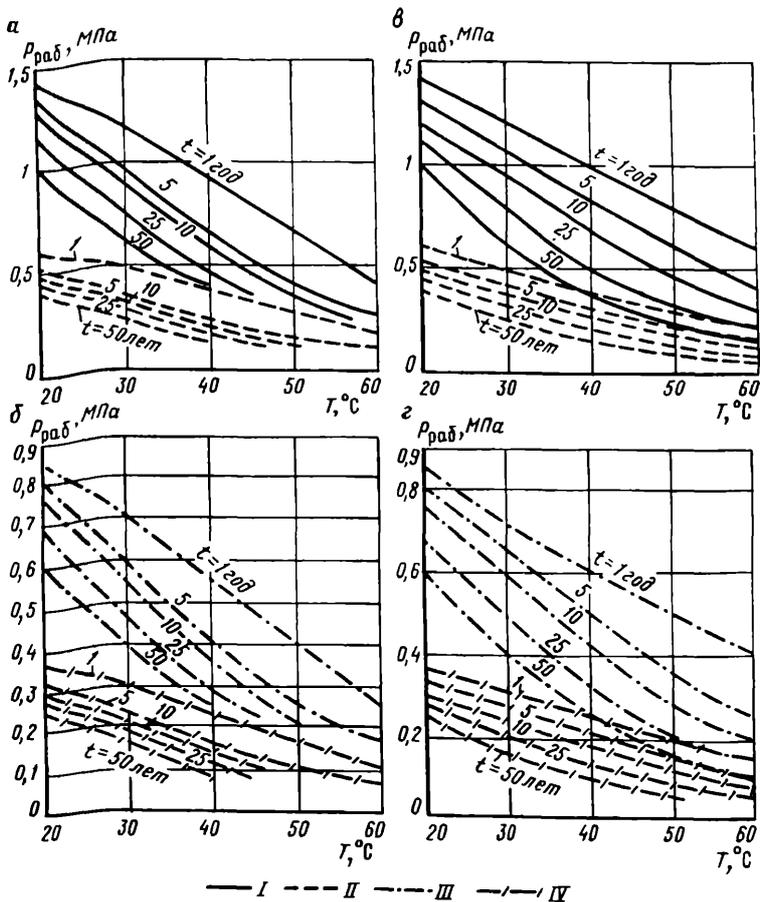


Рис. 82. Допускаемые рабочие давления $P_{раб}$ в зависимости от температуры T и срока службы трубопровода t :

а – трубы из ПЭНД типов Т и СЛ; б – трубы из ПЭНД типов С и Л; в – трубы из ПЭВД типов Т и СЛ; г – трубы из ПЭВД типов С и Л; I – типа Т; II – типа СЛ; III – типа С; IV – типа Л

дов, разводящих газонефтепроводов, промысловых нефтепроводов и переходов через водные преграды при давлениях не выше 0,6 МПа, а в некоторых случаях до 1 МПа.

Газопроницаемость труб из ПЭНД примерно в 4 раза меньше газопроницаемости труб из ПЭВД. В связи с этим для газопроводов предпочтительнее применять ПЭНД.

Полиэтиленовые трубы наиболее экономичны из всех пластмассовых

Таблица 24. Основные показатели полимерных труб

Показатели	ПВХ	ПЭВД (ПЭНП)	ПЭНД (ПЭВП)	ПП
Плотность, г/см ³	1,38–1,4	0,92–0,93	0,94–0,96	0,90–0,91
Предел текучести при растяжении, МПа, более	>50	>9,5	>20	>26
Относительное удлинение при разрыве, %, более	>25	>210	>200	>200
Модуль упругости при изгибе, МПа	2500–3000	110–160	680–750	670–1190
Твердость по Бринеллю, Н/мм ²	100–160	14–25	45–54	60–85
Температура плавления, °С	–	105–108	120–125	160–170
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м	$4,5 \cdot 10^{15}$	$7,8 \cdot 10^{14}$	$8,2 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{16}$
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м ² ·°С)	0,17	0,35	0,42	0,23
Температура транспортируемого продукта, °С	0–60	–30–40	–30–40	0–60
Температура окружающего воздуха на монтаже, °С	–10	–40	–40	–10

труб. Капитальные затраты на изготовление 1 м полиэтиленовых труб в 1,5–2 раза меньше капитальных затрат на изготовление 1 м стальных труб одинакового диаметра.

Трубы диаметром 63–160 мм поставляют в бухтах, диаметром 160–400 мм – намотанными на катушках, а диаметром свыше 400 мм – отрезками длиной 6 и 12 м.

Соединяют полиэтиленовые трубы друг с другом сваркой в раструб, а также с помощью муфт, втулок, фланцев. Соединения с арматурой и со стальными трубами выполняют стальными или полимерными фланцами. При монтаже гнутье труб осуществляют с нагревом. Трубы диаметром более 110 мм изгибают в станках, вставляя до нагрева в них чехол с песком наружным диаметром на 1–2 мм меньше, чем внутренний диаметр трубы. Трубы диаметром менее 110 мм можно изгибать вручную без применения чехла с заполнением изгибаемого участка горячим песком.

За рубежом полиэтиленовые трубы применяют для газосборных и газораспределительных систем. Их широко используют также для замены стальных и чугунных газопроводов, не разбирая металлические, которые служат в процессе эксплуатации защитным футляром полиэтиленовых труб.

Поливинилхлоридные трубы

Поливинилхлоридные трубы изготовляют на основе непластифицированного поливинилхлорида (полимера винилхлорида или хлорвинила).

Поливинилхлорид (полихлорвинил) получают полимеризацией газа хлористого винила (хлорвинила или винилхлорида $\text{CH}_2 = \text{CHCl}$). Исходный продукт (мономер) — хлористый винил получают из ацетилена и хлористого водорода. Молекула хлористого винила похожа на молекулу этилена, атом водорода в которой замещен атомом хлора.

Поливинилхлорид непластифицированный называют по-разному в различных странах: бреон корвинк в Великобритании; децелит, хосталит, винидур в ФРГ; игелит в ГДР; винибан в Японии; винипласт в СССР.

Поливинилхлорид, образующийся при полимеризации в виде мелкодисперсного порошка белого или слабо-желтого цвета, является смолой. Температура плавления такого поливинилхлорида $150\text{--}160^\circ\text{C}$, а температура разложения 160°C .

Путем термической обработки поливинилхлоридной смолы, смешанной со стабилизаторами и смазывающими веществами без пластификаторов, на горячих вальцах получают рогообразный твердый материал поливинилхлорид — винипласт. Стабилизаторы добавляют также для предотвращения деструкции смолы, возможной в процессе переработки (меламин, соли свинца и др.). Поливинилхлорид — один из наиболее технически ценных материалов. Он представляет собой достаточно прочный и пластичный непластифицированный поливинилхлорид, имеющий аморфную структуру, степень его кристалличности не более 10%. Поливинилхлорид химически устойчив к воздействию почти всех кислот, щелочей и растворов солей любых концентраций, за исключением азотной кислоты концентрацией выше 50% и олеума. Растворяется он в дихлорэтаноле и метилэтилкетоне, набухает в бензоле и толуоле. Спирт, бензин и другие нефтепродукты на него не действуют. Он обладает хорошими электроизоляционными свойствами, мало изменяющимися при увлажнении. Однако при температуре ниже -15°C поливинилхлорид становится хрупким. Он подвержен хладнотекучести (ползучести при комнатной температуре), т.е. нарастанию деформации во времени при постоянном воздействии даже небольших нагрузок, и очень чувствителен к температуре. Изменение свойств поливинилхлорида в зависимости от температуры наблюдается аналогично другим термопластам.

Непластифицированный ПВХ имеет плотность $1,29\text{ г/см}^3$, прочность при растяжении $40\text{--}120\text{ МПа}$, относительное удлинение при разрыве $5\text{--}100\%$, ударную вязкость по Шарпи на образцах с надрезом $2\text{--}10\text{ кДж/м}^2$. Поливинилхлоридную композицию для изготовления труб составляют с добавлением стабилизаторов до 10% от массы ПВХ смолы, смазывающих веществ $0,5\text{--}1\%$, красителей до 10%, а иногда наполнителей и модифицированных пластификаторов.

Широко применяют также сополимеры винилхлорида, из которых с винилиденхлоридом путем прессования и литья под давлением изготавливают различную арматуру, патрубки, тройники, крестовины, фланцы и др. Материал легко сваривается и экструдирован. Известны также и другие сополимеры.

Поливинилхлоридные трубы по сравнению с полиэтиленовыми имеют несколько большую плотность, меньшую морозостойкость, такую же теплостойкость и высокую химическую стойкость по отношению к транспортируемым по ним газу, нефти и другим нефтепродуктам. Теплопроводность труб примерно в 300 раз меньше, чем теплопроводность стальных.

Природный (CH_4), сжиженный и искусственный (с содержанием ароматических углеводородов не более 15 мг/м^3) газы на поливинилхлоридные трубы воздействия не оказывают. При подземной прокладке ПВХ показывает высокую стойкость к большей части реагентов, присутствующих в грунтах и грунтовых водах. Поэтому трубы из непластифицированного поливинилхлорида применяют для подземных трубопроводов с температурой грунта не ниже минус $1-2^\circ\text{C}$, транспортирующие жидкие и газообразные среды.

Поливинилхлоридные трубы склонны к старению от воздействия ультрафиолетовых лучей, несмотря на присутствие стабилизаторов. Срок эксплуатации труб из ПВХ в условиях надземной (воздушной) прокладки газопроводов при рассеянной освещенности составляет не более 20 лет, а при непосредственном воздействии солнечных лучей — не более 14–15 лет.

С понижением температуры повышается хрупкость труб из ПВХ: предел текучести повышается, а относительное удлинение уменьшается. При температуре минус $8-10^\circ\text{C}$ относительное удлинение ПВХ близко к нулю.

Трубы из ПВХ чувствительны к надрезам, царапинам и требуют бережного к ним отношения.

При длительном действии постоянного напряжения, особенно при нагреве, трубы из ПВХ обладают склонностью к нарастанию деформации, поэтому они имеют ограниченный предел применения по рабочим давлениям и температуре. Повышение температуры приводит к увеличению пластичности и уменьшению прочности труб. Низкие температуры, наоборот, вызывают нарастание хрупких свойств. Ударная вязкость труб, так же как у полиэтиленовых, резко падает при наличии на их поверхности надрезов и царапин. Поливинилхлоридные трубы имеют сравнительно большой коэффициент линейного расширения (в 5,8 раза больше стали), поэтому при их укладке также необходимо устанавливать компенсаторы.

Изготавливают поливинилхлоридные трубы выдавливанием на поршневых прессах, непрерывной шнековой экструзией и сваркой из отдель-

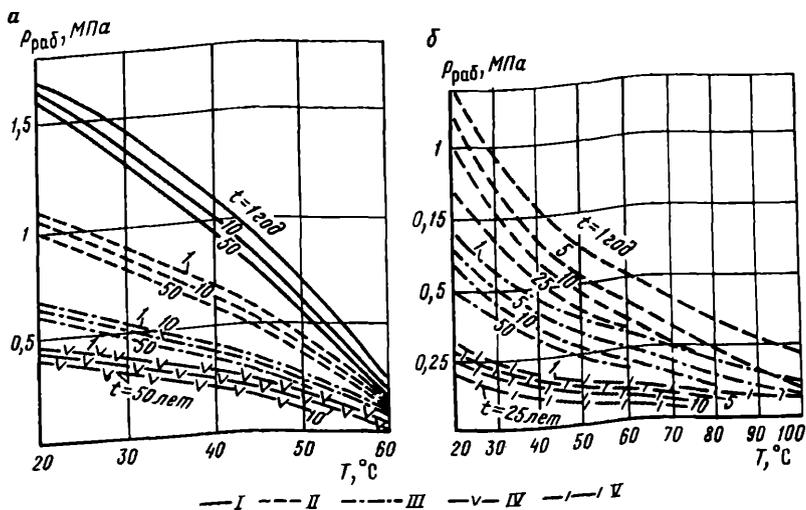


Рис. 83. Допускаемые рабочие давления $P_{\text{раб}}$ в зависимости от температуры T и срока службы газопровода t :

a – трубы из ПВХ типов ОТ, Т, С и СЛ; b – трубы из ПП типов Т, С и Л; I – тип ОТ, II – тип Т; III – тип С; IV – тип СЛ; V – тип Л

ных листов поливинилхлорида. Трубы из непластифицированного поливинилхлорида выпускают диаметром 10–450 мм различных классификационных рядов толщин (1, 2, 3, 4 и 5) для номинальных давлений 0,25 (тип Л), 0,4 (тип СЛ), 0,6 (тип Т) и 1,6 МПа (тип ОТ – особо тяжелый).

Для газонефтепроводов напорные трубы из непластифицированного ПВХ применяют типа С – диаметром 63–250 мм, типа Т – диаметром 40–160 мм, толщиной стенки не менее 3 мм.

Трубы из ПВХ используют для технологических трубопроводов с агрессивными средами, если температура жидкости или газа не больше 40°C , а также для систем водоснабжения, канализации и ирригационных систем. Пропускная способность у них на 6–10 % больше, чем пропускная способность у стальных труб. Не допускается применять трубы из ПВХ в средах, содержащих ароматические углеводороды (бензол, толуол и др.), азотную кислоту концентрацией больше 50 % и др. Рабочие давления зависят от условий эксплуатации трубопроводов (рис. 83).

Поливинилхлоридные трубы применяют для газораспределительных систем, городских газопроводов и др.

Полипропиленовые трубы

Полипропилен — продукт полимеризации пропилена $\text{CH}_3\text{-CH=CH}$ — газообразного гомолога этилена. Пропилен, как и этилен, содержится в нефтяных газах, а также в газах крекинга и пиролиза нефти. Получают его при давлениях до 0,3 МПа и температуре 50–70°С в присутствии металлоорганических катализаторов. Полипропилен обладает многими положительными качествами, присущими ПЭВП, и в меньшей степени его недостатками. Это объясняется значительно большей молекулярной массой и большей степенью его кристалличности по сравнению с полиэтиленом. В отличие от полиэтилена полипропилен при обычной температуре имеет незначительную хладнотекучесть и может длительное время работать под нагрузкой при температуре 100°С, сохраняя форму.

Полипропилен обладает более высокой прочностью, жесткостью и теплостойкостью по сравнению с полиэтиленом в интервале температур от –10 до 150°С. Но при нагреве его прочностные показатели падают так же резко, как и у полиэтилена. Так, предел прочности для растяжения при температуре –20°С составляет 60 МПа, при температуре 20°С – 25–40 МПа, а при температуре 100°С – 10 МПа (для полиэтилена при температуре 100°С прочность равна 2 МПа). Морозостойкость полипропилена –35°С, прочность при растяжении 25–40 МПа, относительное удлинение при разрыве 200–800 %, ударная вязкость по Шарпи на образцах с надрезом 33–80 кДж/м², плотность 0,9 г/см³

Изделия из пропилена изготавливают центробежным способом, литьем под давлением или экструзией в атмосфере азота при температуре 150–250°С и давлении 7–20 МПа. Полипропилен, как и полиэтилен, особенно широко используют при изготовлении различных трубопроводов и емкостей для агрессивных сред, а также в виде пленочного, изоляционного и облицовочного материала, например, для облицовки железобетонных резервуаров, изоляции магистральных трубопроводов. Отечественная промышленность выпускает полипропилен марок от ПП-1 до ПП-5, которые различаются содержанием аморфной низкомолекулярной фракции, а также морозостойкостью. Для труб применяют полипропилен марок ПП-3 и ПП-5 с пределом текучести не менее 2,5 МПа, относительным удлинением не менее 400 %, морозостойкостью не ниже –10°С.

Полипропиленовые трубы отличаются еще большей легкостью и теплостойкостью, чем полиэтиленовые. Прочность полипропиленовых труб выше, а газо- и паропроницаемость значительно ниже, чем у полиэтиленовых, при такой же хорошей коррозионной стойкости. Трубы из полипропилена изготавливают теми же способами, что и полиэтиленовые. Для предотвращения старения в них добавляют 1–2 % газовой сажи.

Трубы напорные из полипропилена бывают следующих типов: Л на-

ружным диаметром 40–315 мм, С диаметром 20–315 мм и Т диаметром 32–315 мм. Для газонефтепроводов используют напорные трубы из полипропилена типов С диаметром 50–315 мм и Т диаметром 32–200 мм.

Трубы поставляют длиной 6, 8, 10 и 12 м.

Для газонефтепроводов различных категорий из ПЭНД, ПЭВД, ПВХ и ПП значения R_n и $P_{\text{раб}}$ определяют по графикам (см. рис. 81, 82 и 83), а затем корректируют, умножая на различные коэффициенты: коэффициент условий работы $K_y < 1$, учитывающий опасность транспортируемого продукта; коэффициент прочности соединений $K_c < 1$, учитывающий использование соединений, неравнопрочных основному материалу труб; коэффициент химической стойкости труб $K_x < 1$.

Трубы из полиметилметакрилата

Полиметилметакрилат (органическое стекло), или плексиглас, относится к группе акрилопластов и является широко распространенным пластиком. Получают его блочной полимеризацией метилового эфира метакриловой кислоты. Полиметилметакрилат представляет собой бесцветную прозрачную стекловидную массу. Выпускают его в виде прозрачных листов, блоков, а также литевых и прессовочных профилей. По сравнению с минеральными стеклами полиметилметакрилат имеет меньшую поверхностную твердость, хуже подвергается механической обработке, а также пластической деформации.

Органическое стекло обладает прозрачностью и стойкостью ко многим минеральным и органическим растворителям, высокими электроизоляционными и антикоррозионными свойствами. Органическое стекло имеет прочность при растяжении 63–100 МПа, относительное удлинение при разрыве 2,5–20 %, ударную вязкость по Шарпи на образцах без надреза 8–18 кДж/м², плотность 1,18–1,2 г/см³, теплостойкость до 100°С.

Известен полимерный материал акрилонитрилбутадиенстирол (АБС), который представляет собой продукт сополимеризации акрилонитрила, стирола и бутадиена. Пластик АБС имеет прочность при растяжении 32–65 МПа, относительное удлинение при разрыве 12–70 %, ударную вязкость по Шарпи на образцах с надрезом 8–25 кДж/м², плотность 1,02–1,04 г/см³, теплостойкость до 85°С. За рубежом трубы из акрилонитрилбутадиенстирола получили название "красластик". Их изготавливают методом экструзии. Они отличаются легкостью (в 7 раз легче стальных), высокой химической стойкостью и достаточно высокой механической прочностью и теплостойкостью. Температурный диапазон их применения от –40 до 80°С. Трубы "красластик" способны выдерживать ударную нагрузку при температуре ниже –18°С и давление до 0,4 МПа и более. Применяют их для газораспределительных и город-

ских газовых сетей, особенно в условиях повышенной агрессивности грунтов. Соединения в трубопроводах из "красластик" осуществляют на клею или на резьбе.

Трубы из полиметалметакрилата обладают малой плотностью, хорошими физико-механическими, диэлектрическими и химическими свойствами.

В противоположность другим прозрачным пластикам органическое стекло с течением времени не желтеет, не становится хрупким под действием света и атмосферных условий. Трубы из органического стекла эластичны и сохраняют это свойство при пониженных температурах.

Трубы из органического стекла подвергаются действию в основном только органических растворителей, таких, как бензол, ацетон, хлорированные углеводороды и т.п.; даже кратковременное воздействие паров этих веществ может привести к образованию трещин. Близость температуры текучести к температуре начала термической деструкции у органического стекла затрудняет применение таких методов для изготовления труб из него, как центробежное литье и экструзия, связанных с переводом полимера в пластичное состояние. Во избежание деструкции применяют ряд марок пластифицированного органического стекла, но по своим свойствам они хуже непластифицированного полимера.

Некоторые зарубежные фирмы для изготовления труб применяют пластифицированное органическое стекло, идя на ухудшение их свойств — потеря жесткости, твердости, теплостойкости. За рубежом организовано также производство труб методом блочной полимеризации метилметакрилата непосредственно в кольцевых формах из силикатного стекла. Но это сложный процесс, так как трудно создавать необходимый силовой режим при таком способе производства труб. В Советском Союзе освоено изготовление труб из листового органического стекла методом компрессионной сварки.

Ацетобутиратцеллюлозные трубы

Ацетобутиратцеллюлоза (АБЦ) представляет собой сложный эфир целлюлозы, являющийся продуктом взаимодействия целлюлозы с ангидридами уксусной и масляной кислот. Это белый волокнистый материал, пластичный, светостойкий, хорошо совмещающийся со смолами.

Трубы из АБЦ изготавливают экструзией и прессованием. Они имеют большую гладкость стенок и прозрачность и обладают также малым коэффициентом теплопроводности, стойкостью к слабокислым растворам, достаточно высокой прочностью.

Ацетобутиратцеллюлозные трубы можно применять для транспортировки нефти и газа. Например, в ФРГ для газовой промышленности

ацетобутиратцеллюлозные трубы и фитинги изготовляют черного цвета, плотностью $0,95 \text{ г/см}^3$, свернутые в бухты диаметром до 1 м ввиду их эластичности. Расчетный предел прочности материала при температуре $23,8^\circ\text{C}$ составляет примерно 6 МПа.

Соединение труб между собой выполняют на ацетобутиратцеллюлозных муфтах склеиванием. Ацетобутиратцеллюлозные трубы соединяют с металлическими при помощи натяжных хомутов и специальных патрубков с резьбой.

К недостаткам ацетобутиратцеллюлозных труб относят горючесть, слабую сопротивляемость ударам при низких температурах, разрушение под действием кислот и щелочей, а также органических растворителей. Монтаж трубопроводов из них допускается проводить при температурах не ниже 0°C .

Стеклопластиковые трубы

Стеклопластик – это композиционный материал, состоящий из стекловолоконного наполнителя и полимерного связующего. Стекловолоконный наполнитель – основной несущий элемент композиции. Он выполняет роль упрочняющего, армирующего компонента. Полимерное связующее обеспечивает более равномерное распределение нагрузки между стеклянными волокнами, склеивая их, и придает всей композиции жесткость. Особенностью стеклопластика как конструкционного материала является то, что сам материал создается только в процессе изготовления изделия, а его свойства зависят от вида и свойств компонентов, их количественного соотношения, схемы армирования, способа изготовления изделия и других факторов.

Компоненты стеклопластика имеют весьма различающиеся по значению прочностные и физико-химические характеристики. Параметры прочности и жесткости у связующих обычно ниже, чем у армирующего материала, а температурный коэффициент линейного расширения связующего больше, чем у армирующего материала. В зависимости от способа изготовления, видов армирующего стекловолоконного наполнителя и смолы, а также от их количественного соотношения могут быть получены следующие свойства у стеклопластиков: разрушающее напряжение при растяжении от 49 до 950 МПа, разрушающее напряжение на изгиб от 120 до 1000 МПа, плотность от $1,7$ до $2,2 \text{ г/см}^3$

Стекловолоконный наполнитель. Для изготовления стеклопластиков используют стекловолоконистые изделия из бесщелочного стекла в виде: элементарных волокон различного диаметра (7–13 мм); прядей или нитей, полученных из непрерывных или штапельных элементарных стеклянных волокон, а также ровницы (жгутов); стеклянных тканей и лент, стеклянных матов и стеклорожи.

Стекло для изготовления водостойкого стекловолокна должно быть алюмоборосиликатного или алюмоборобариевосиликатного состава с

гарантированным содержанием окислов щелочных металлов не более 2 %.

Свойства стекловолокна. Стекловолокна обладают наиболее высокими пределом прочности, модулем упругости и удельной прочностью по сравнению с различными природными и синтетическими волокнами.

При изменении диаметра стекловолокна от 6 до 2 мкм предел прочности может повышаться от 2000 до 6000 МПа, в то время как блочное стекло имеет предел прочности 40–60 МПа.

Стеклообразные волокна обладают более высокой термостойкостью (до 1000 °С и выше в зависимости от химического состава) по сравнению с органическими волокнами. Температурный коэффициент линейного расширения при нагреве (до температуры 300 °С) для стекловолокна равен примерно $49 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Стекловолокна и материалы из них обладают высокими диэлектрическими характеристиками, плавятся, но не горят и не подвергаются гниению. Они могут длительное время находиться в среде кислорода, так как сами состоят из окислов.

Недостатки стекловолокна – снижение прочности при термической обработке – нагреве и охлаждении. Понижение прочности волокна после его охлаждения имеет необратимый характер, т.е. при повторном нагреве нельзя привести свойства волокна к первоначальному состоянию. Считают, что уменьшение прочности волокна после термической обработки связано с рекристаллизацией стекла на границе раздела фаз. У блочного стекла понижения прочности после термической обработки не наблюдается – процесс кристаллизации внутри массы стекла невозможен.

Прочность стекловолокна зависит от трех основных факторов: химического состава стекла, диаметра волокна и способа его изготовления.

Химический состав. Стекловолокно изготавливают из алюмосиликатного бесщелочного (с содержанием до 2 % щелочных окислов) или щелочного (с содержанием до 15 % щелочных окислов) стекла. Более широко применяют бесщелочное стекло. Основа бесщелочного и щелочного стекол состоит из главного компонента – кремнезема, имеющего высокую точку плавления. Увеличение содержания щелочей понижает прочность стекловолокна и уменьшает химическую стойкость к воде. Изменение состава стекла в большей мере влияет на технологический режим формирования стекловолокна, чем на его физико-химические свойства.

Диаметр волокна. Высокая механическая прочность стекловолокон по сравнению с механической прочностью блочных стекол объясняется линейной структурой волокна со слабыми боковыми связями. При уменьшении диаметра стекловолокна увеличивается линейная ориентация структурных цепей и уменьшается число наиболее опасных поверхностных трещин, что способствует повышению прочности. В отечественной промышленности для стеклотканей применяют в основном

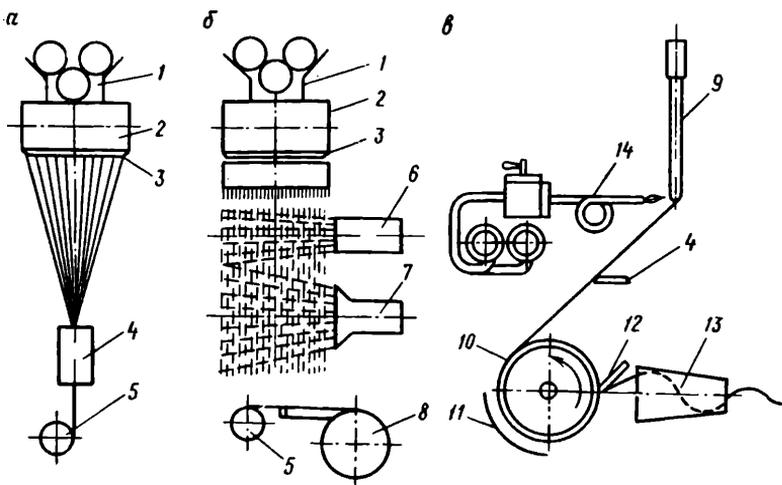


Рис. 84. Схема способов изготовления стекловолокна:

а – непрерывного; *б* – штапельного; *в* – из штабика; 1 – бункер для загрузки стеклянных шариков; 2 – печь для плавления стекла; 3 – фильеры; 4 – устройство для подачи замазливателя; 5 – бобина для намотки стеклянных нитей; 6 – дутьевая головка для распыления воздухом или паром; 7 – пульверизатор для нанесения связующего; 8 – перфорированный барабан; 9 – стеклянный стержень – штабик; 10 – барабан; 11 – ограждающий отделитель; 12 – направляющий отделитель; 13 – конус; 14 – газовая горелка

стекловолокна диаметром 7 мкм. При большем диаметре стекловолокна (свыше 13 мкм) затрудняется его текстильная переработка (без текстильной переработки можно использовать элементарное волокно диаметром до 20 мкм).

Способ изготовления стекловолокон влияет на их свойства. Непрерывное стекловолокно изготавливают вытягиванием из стекломассы (со скоростью примерно 2000 м/мин), которая образуется при расплавлении стеклянных шариков в специальных электрических печах при температуре 1200–1400°С (рис. 84, *а*) Температура плавления стекломассы зависит от химического состава стекла. Расплавленная стекломасса под действием силы тяжести вытекает через отверстия (фильеры), расположенные на дне электропечи в виде тонких волокон, охлаждающихся на воздухе.

Диаметр стекловолокон зависит от количества стекломассы в электропечи, диаметра фильер, скорости вытягивания стекловолокон и температуры (вязкости) стекломассы.

Более грубое и короткое стекловолокно (длиной 5–50 см), называемое штапельным (рис. 84, *б*), получают дутьевым способом, имеющим несколько разновидностей. Аналогично способу получения непре-

рывного волокна жидкая стекломасса проходит через фильеры, а затем распыляется струей воздуха, пара или горячего газа, подаваемой с высокой скоростью (150–200 м/с). Образующиеся при этом короткие волокна обрызгиваются связующим веществом в виде эмульсии или раствора полимера и осаждаются на вращающемся перфорированном барабане или на движущейся сетке конвейера.

Осажденное стекловолокно прочно удерживается на вращающемся барабане за счет создания вакуума внутри него. Стекловолокно наматывается на барабан, образуя непрерывный стеклянный мат – стекломат.

Непрерывное стекловолокно можно получать вытягиванием при температуре 1600°С из кварцевого стеклянного стержня – штабика (рис. 84, в). В этом случае стекловолокно получается грубым с невысокой механической прочностью, а сам способ является малопродуктивным. Но из-за высокой температуры плавления кварцевого стекла (1725°С) применить вытягивание кварцевого волокна из расплава через фильеры не удастся. Поэтому для получения кварцевого волокна используют штабиковый метод.

Прядь или нить получается при склеивании 100–200 элементарных стекловолокон друг с другом при помощи замазливателя на выходе из электропечи. Готовая прядь, имеющая однонаправленное волокно, наматывается на бобины. Замазливатели облегчают съем пряди с бобины и при дальнейшей текстильной переработке предохраняют пряди от истирания и разрушения. При текстильной переработке прядь поступает с бобины на крутильные машины и затем на ткацкие станки, на которых изготавливают из нее стеклоткани переплетений различных видов. На основе стеклотканей с пропиткой связующим изготавливают стекло-текстолиты.

Путем размотки и трощения пряди (процесс обратной крутки) получают ровницу или стекложгут, т.е. непрерывную прядь из некрученых стеклонитей. На ткацких станках из ровницы делают стеклорогожку в виде тонких или грубых тяжелых жгутовых тканей. Из рубленой ровницы изготавливают стеклянную крошку, применяемую также в качестве наполнителя.

В процессе текстильной переработки стекловолокон в пряжу (нить), а затем в ткань коэффициент использования прочности элементарного стекловолокна постепенно понижается. Для уменьшения истирания и разрушения стекловолокон применяют замазливатели, в качестве которых служат плавкие смеси, застывающие при обычной температуре, а также различные растворы и эмульсии, дающие сухой остаток после испарения (удаления) жидкой фазы. В состав замазливателей входят смазывающие вещества (жирные кислоты, минеральное масло), улучшающие работу волокон в пряди; связующие (декстрин, парафин, казеин), склеивающие элементарные волокна в прядь; поверхностно-активные вещества (например, аминоспирты), увеличивающие адгезию

замазливателя к стекловолокну. Чаще всего используют застывающий парафиновый замазливатель или желатин. В то же время замазливатель — вредная добавка, так как он препятствует установлению хорошей связи между поверхностью стекловолокна и синтетической смолой при изготовлении стеклопластиков.

Наиболее дешёвый вид наполнителя, удобный для переработки, — нетканый рулонный стекловолокнистый материал — стекломат (стеклохолст), который изготавливают из рубленой ровницы или из штапельного волокна, получаемого дутьевым способом. Стекловолокна в матах удерживают при помощи небольших количеств полимерных связующих (химический способ соединения) или переплетения отдельных волокон между собой и прошивания их (механический способ соединения).

Физико-механические свойства стеклопластиков зависят не только от вида и свойств стекловолокнистого наполнителя, его размеров, но и от его количества. Разрушающее напряжение при растяжении имеет максимальное значение для стеклоткани из непрерывного волокна при 70 % стекловолокнистого наполнителя, для штапельных стеклотканей — при 50 %, а для стекломатов — при 55 %. Максимальная ударная вязкость наблюдается при 65–70 % стекловолокнистого наполнителя.

Оптимальное количество стекловолокнистого наполнителя зависит также от вида полимерного связующего, применяемого при изготовлении стеклопластика.

Кроме стекловолокнистых наполнителей иногда добавляют такие неорганические наполнители, как кварцевая мука, тальк, каолин, мел и другие, которые улучшают внешний вид изделий и уменьшают усадку связующего.

В качестве *полимерного связующего* используют термореактивные смолы: полиэфирные, эпоксидные, фенолформальдегидные, кремнийорганические, фурановые и некоторые другие, а также различные их сочетания. Кроме термореактивных начинают применять также и термопластичные смолы, такие, как полиэтилен, фторопласт и др.

Связующее пропитывает стеклянный наполнитель и после отверждения склеивает между собой отдельные его волокна и слои, обеспечивая совместную их работу в пластике. Поэтому связующее должно обладать хорошей смачивающей способностью и адгезией к стекловолокну; небольшой усадкой при отверждении, вызывающей образование микротрещин; высокой когезионной прочностью; устойчивостью вязкостных свойств в течение длительного времени; быстрым отверждением по возможности без выделения летучих продуктов.

Физико-механические свойства стеклопластиковых труб зависят также от физико-механических свойств связующего. Так, с увеличением предела прочности смолы при сдвиге и растяжении прочность стеклотекстолита возрастает. Режим и скорость отверждения связующего определяют технологический процесс изготовления труб из стеклопластиков и производительность оборудования.

В качестве связующего используют сочетания из полимерных и мономерных соединений или их смесей и различных добавок — инициаторов, инертных разбавителей (растворителей), катализаторов, пластификаторов, стабилизаторов и др.

Инертные растворители (спирт, толуол, ацетон) применяют для смол, которые имеют высокую вязкость и плохо смачивают и пропитывают стекловолоконный наполнитель, например для таких, как фенолформальдегидные и эпоксидные.

Полиэфирные смолы обычно разбавляют не растворителями, а мономером-стиролом. Такой раствор полимера и мономера хорошо пропитывает стекловолоконный наполнитель и не требует предварительного испарения растворителя, из-за которого в готовой трубе могут образоваться поры. Стирол служит также сополимером при отверждении. Стеклопластиковые трубы на основе ненасыщенных полиэфирных и эпоксидных смол холодного отверждения можно изготавливать при обычной температуре и без приложения формовочного давления или при небольшом давлении. Но при формовании труб из смол холодного отверждения при высоком давлении и температуре обеспечивается более высокая их механическая прочность.

Стеклопластиковые трубы на основе фенолформальдегидных, карбамидных, фурановых и других смол горячего отверждения изготавливают только при высоких температурах (до 170°C и выше) и формовочных давлениях (до 2,5–10 МПа).

В производстве стеклопластиков связующее на основе фенолформальдегидных смол — смол горячего отверждения — применяют мало. Кроме того, они обладают более низкой адгезией к стекловолокну по сравнению с другими смолами. В связи с этим их используют в сочетании с поливинилбутиралем (бутваром) или с фурановыми, кремнийорганическими и эпоксидными смолами, например, в виде смол марок: ФН — фенолформальдегидная смола, модифицированная фурфуролом; БФ и ВФБ-1 — смола, модифицированная бутваром, и др.;

Фурановые смолы применяют для получения теплостойких и химически стойких стеклопластиковых труб. В этих случаях в качестве связующих используют фенолофуриловую смолу марки ФФС или лаки марок ФЛ-1, ФЛ-2, ФЛ-10, ФЛ-12 и др. Стеклопластики на основе фурановых смол не уступают по своим свойствам стеклопластикам на фенольных смолах. Более широкое применение нашли эпоксидные смолы, как обладающие высокой прочностью, хорошей адгезией к стекловолокну и имеющие незначительную усадку при отверждении. В случаях отверждения при температуре $15-25^{\circ}\text{C}$ в качестве отвердителей применяют различные полиамины — гексаметилендиамин, полиэтиленполиамин, метафенилендиамин и др. При их отверждении в условиях повышенных температур (до $120-180^{\circ}\text{C}$) в качестве отвердителей исполь-

зуют малеиновый и фталевый ангидриды, а также различные смолы – фенолформальдегидные, анилиноформальдегидные.

Стеклопластики на основе эпоксидных смол превосходят по механическим свойствам стеклопластики на основе всех других смол. Но подавляющее большинство стеклопластиковых труб и других изделий изготавливают на основе ненасыщенных полиэфирных смол. Известны смолы марок ПН-1, ПН-2, ПН-3, ПН-4, ПН-6, ПН-7, ПН-10, ПН-62 и другие, отличающиеся друг от друга по теплостойкости и физико-механическим свойствам. Самая водостойкая и химически стойкая из них – смола марки ПН-10. К наиболее теплостойким и трудновоспламеняющимся относятся смолы марок ПН-6, ПН-7 и ПН-62. При изготовлении более высокопрочных стеклопластиковых труб можно применять полиэфиракрилатные смолы марок МГФ-9, ТМГФ-11 и ТГМ-3.

Для отверждения полиэфирных смол в качестве отвердителей применяют различные перекисные соединения – перекись бензола, гидроперекись кумола, перекись метилэтилкетона, циклогексанона и др. За рубежом применяют метилдициклогексил, а в качестве ускорителей отверждения вводят различные нафтенаты металлов, например нафтенат кобальта.

Полиэфирные и другие стеклопластики не огнестойки. Для обеспечения огнестойкости применяют связующие с инертными наполнителями. Так, в качестве инертного наполнителя полиэфирного связующего наиболее часто используют гидроокись алюминия, обеспечивающую очень высокие самозатухающие свойства стеклопластиков. В качестве добавок, способствующих повышению огнестойкости, применяют также галогены. Наиболее часто используется хлор, а веществ, содержащих бром, избегают из-за нестабильности при хранении или эксплуатации и большой стоимости. Обычно вместе с хлором в компаунд добавляют около 5 % треххлористой сурьмы, которая способствует образованию при термическом разложении очень эффективного пламягасителя – оксихлорида сурьмы. Однако следует отметить, что добавление треххлористой сурьмы без галогеносодержащих компонентов не совсем эффективно. В настоящее время имеется группа огнестойких полиэфирных смол, которые в своем составе содержат тетрахлорфталевою кислоту. Существуют и негорящие эпоксидные смолы, содержащие 15 % хлорированного полифенола и 5 % оксида сурьмы.

Свойства и применение труб из стеклопластиков. Свойства труб из стеклопластиков зависят от вида и свойств наполнителя и связующего, их количественного соотношения, способа изготовления труб и др.

Трубы из стеклопластиков обладают высокой коррозионной стойкостью, хорошими диэлектрическими свойствами, низким коэффициентом шероховатости, малой плотностью и большой прочностью. Они не подвержены действию блуждающих токов. Масса труб из стек-

лопластиков в 4 раза меньше массы стальных и в 1,5 раза меньше массы дюралюминиевых труб, что является важным их преимуществом при транспортных и монтажных работах в осложненных условиях трубопроводного строительства.

Материал труб имеет относительно низкий модуль упругости (8—16 раз ниже, чем у стали) и, следовательно, обладает значительной гибкостью, что облегчает работу трубопровода в грунте.

Коэффициент линейного расширения стеклопластиковых труб составляет примерно от $1/5$ до $1/8$ коэффициента линейного расширения термопластичных и $1/2$ стальных труб. В связи с этим изменение их длины в результате термического расширения небольшое, а так как трубы имеют сравнительно невысокий модуль упругости, то и внутренние напряжения при нагреве незначительны. Указанное различие в коэффициентах линейного расширения не препятствует совместной работе стальных и стеклопластиковых труб.

Стеклопластиковые трубы имеют коэффициент теплопередачи, в 200 раз меньший по сравнению с коэффициентом теплопередачи стальных труб. Это свойство труб позволяет во многих случаях избежать применения теплоизоляции для предотвращения охлаждения и конденсации транспортируемой жидкости.

Стеклопластиковые трубы совершенно не подвержены обычному коррозионному разрушению электрохимического характера. Коррозионная стойкость и другие свойства стеклопластиковых труб зависят также от вида связующего. Так, трубы на полиэфирном связующем стойки в кислых средах и в различных минеральных кислотах, включая концентрированные окисляющие агенты, которым не могут противостоять трубы на эпоксидном связующем. Эпоксидные стеклопластиковые трубы обладают высокой коррозионной стойкостью в щелочных средах. При этом они имеют большую прочность благодаря лучшей адгезии эпоксидной смолы со стеклом, чем полиэфирной смолы.

Свойства стеклопластиковых труб в значительной мере зависят также от вида и количества наполнителя. Трубы, армированные непрерывным стекловолокном, обладают большей механической прочностью, особенно при динамическом нагружении. В то же время трубы с беспорядочным расположением стекловолокна в меньшей степени подвержены коррозионному воздействию, чем трубы с непрерывным стекловолокном.

В условиях коррозионно-активных сред с температурой выше 80°C в стеклопластиковых трубах могут возникать значительные термические напряжения из-за различия в коэффициентах линейного расширения стеклонаполнителя и связующего. Причем их значение зависит от соотношения количества стеклонаполнителя и связующего. При соотношении стеклонаполнителя и смолы 25 : 75 по массе неко-

торые трубы разрушаются в результате термических напряжений даже без коррозионного воздействия среды. Увеличение количества стеклонаполнителя до соотношения со смолой 40 : 60 по массе и выше предотвращает такое разрушение труб. Оптимальным соотношением стекловолокна и смолы считают 60 : 40 по массе, при котором наблюдается сочетание наиболее высоких химической стойкости и прочности труб. При более высоком содержании стеклонаполнителя (до 75 %) трубы хотя и обладают высокой прочностью, но при контакте с агрессивной средой имеют невысокую коррозионную стойкость.

Стеклопластиковые трубы обладают также способностью предотвращать отложения парафина, так что во многих случаях отложений парафина в них вообще не образуется. Это объясняется низкой теплопроводностью стеклопластика, его инертностью по отношению к парафину, гладкостью внутренней поверхности труб. Стеклопластиковые трубы обладают этим преимуществом не только перед стальными, но и перед трубами из термопластов.

Внутренняя поверхность стеклопластиковых труб менее шероховатая, чем у стальных, и приближается к поверхности стекла. Причем шероховатость стеклопластиковых труб практически не изменяется в процессе эксплуатации.

Трубы из стеклопластиков имеют высокие прочностные показатели, близкие к сталям, но высокая прочность материала на разрыв не может быть использована ввиду раннего образования в нем неплотностей разного вида (при $1/6$ – $1/10$ напряжений, при которых происходит разрушение).

Одна из основных причин появления неплотностей в стеклопластиковых трубах — их склонность к растрескиванию, под которой понимают образование микроскопических трещин в структуре смолы под действием нагрузки. Вследствие образования неплотностей трубы из стеклопластиков становятся газопроницаемыми. Это считается главным фактором, ограничивающим их применение для трубопроводов, работающих под высоким давлением. Исследованиями возникновения и распространения трещин установлено, что ухудшение механических свойств стеклопластиков после растрескивания происходит из-за адсорбции влаги. Так, для эпоксидной смолы растрескивание начинается при относительной деформации, равной 0,3–0,4 %, а наличие дефектов в смоле, особенно мельчайших пустот, способствует образованию трещин.

Особенно чувствительны стеклопластики к перегрузкам: долговечность стеклопластиковых труб, рассчитанных на 10-летнюю работу, снижается до 1 года при превышении давления в трубопроводной системе выше нормативного на 25 %.

Прочность труб в продольном направлении примерно в 2 раза ниже прочности в направлении, перпендикулярном к их оси (по кольцу), т.е. трубы обладают анизотропией свойств.

Изготавливаемые в настоящее время трубы имеют большой разброс значений показателей механических свойств. Поэтому при расчете трубопроводов из таких труб приходится исходить из наиболее низких показателей прочности.

Рабочее давление в трубопроводах из стеклопластиков пока не может быть принято более $1/3$ от давления, при котором появляется в трубах течь, т.е. оно составляет примерно $1,5 - 2,5$ МПа.

Важное условие применения стеклопластиковых труб в нефтяной и газовой промышленности — их огнестойкость. Известно много случаев горения стеклопластиковых трубопроводов, емкостей и т.д., когда происходит обугливание наружной поверхности. Однако повреждение поверхности распространяется только на несколько десятков микрометров в глубину, так как полимерный материал не может передать достаточного количества тепла из-за весьма низкой теплопроводности.

Стеклопластик имеет низкую электропроводность и способен накапливать статический заряд электричества, поэтому при транспортировке взрывоопасных газов, жидкостей или сыпучих материалов существует серьезная опасность взрыва в результате разряда накопившихся статических зарядов на поверхности пластика. Интенсивность накопления статических зарядов возрастает с увеличением скорости потока. Когда заряд достигает высокого потенциала, внезапно происходит его разряда на грунт или соседнее заземленное оборудование, а сопровождающая этот разряд искра может воспламенить взрывоопасный газ или горючую жидкость. Во избежание этого применяют различные способы предотвращения накопления электростатических зарядов. Наиболее общий способ — поддержание высокой относительной влажности внутри трубы, в результате чего на поверхности образуется пленка влаги. Действуя как поверхностный проводник, эта пленка отводит статические заряды. Тем не менее постоянное поддержание высокой относительной влажности не всегда практически выполнимо. Другой способ — использование статических нейтрализаторов, которые насыщают зазор между нейтрализатором и наэлектризованным пластиком положительными и отрицательными ионами. Это могут быть высоковольтные, радиоактивные или индукционные нейтрализаторы.

Отвод статических зарядов можно осуществлять через заземленную металлическую сетку или фольгу, а также посредством антистатических брызг.

Наиболее простой и перспективный способ, предупреждающий накопление статических зарядов, — превращение пластика из электрического изолятора в электрический проводник с различной электропроводностью за счет введения в полимерный материал наполнителей в виде графита, ацетиленовой сажи и т.п.

Стеклопластиковым трубам свойственны и другие недостатки: низ

кий предел прочности на скалывание вдоль слоев, зависимость прочности от температуры, нестабильность показателей механических свойств, сложность обеспечения герметичности стыковых соединений труб и относительно высокая стоимость. Эти и отмеченные выше недостатки ограничивают их использование. Тем не менее перспективность применения стеклопластиковых труб не вызывает сомнения.

Трубы из стеклопластиков найдут широкое применение при строительстве различных газонефтепроводов – отводов, кольцевых газовых, нефтяных и других магистралей, эксплуатируемых при давлении 1–2,5 МПа и выше. Сооружение этих газонефтепроводов из стальных труб нерационально, так как прочностные свойства стали при указанных давлениях используют лишь в малой степени.

Применение труб из стеклопластиков, обладающих некоторыми ценными свойствами по сравнению со стальными, позволяет значительно облегчить монтаж, сэкономить средства на строительство и эксплуатацию трубопроводов, повысить их долговечность. Стеклопластики используют и для создания изоляционно-силовой оболочки во время ремонта, а также строительства стальных трубопроводов.

На нефтяных промыслах за рубежом стеклопластиковые трубы применяют: для прокладки сборных линий всех назначений, где происходит интенсивное отложение парафина или твердых осадков; для обвязки резервуаров и монтажа линий, транспортирующих кислоту; при капитальном ремонте скважин; для транспортировки сжиженного нефтяного газа и сточных вод; для сбора сырой сернистой нефти; для обвязки резервуарных парков. Кроме того, трубы из армированных пластмасс сооружают также на заводах для сброса химических стоков и внутризаводской транспортировки различных жидкостей.

Виды стеклопластиковых труб. В зависимости от вида наполнителя и технологических свойств полимерной композиции стеклопластиковые трубы можно подразделить на следующие виды: трубы из стекло-текстолита – слоистого пластика с наполнителем в виде стеклянной ткани или ленты; трубы из стекловолокнита – прессовочной композиции с наполнителем в виде рубленого стекловолокна, ровницы и нити; трубы из СВМ – ориентированного стекловолокнистого анизотропного материала с наполнителем в виде элементарных стеклянных волокон, прядей или нитей, параллельно уложенных относительно друг друга в один или несколько слоев по толщине стенки трубы; трубы с наполнителем в виде предварительно формованного короткого стекловолокна или стекломатов; трубы с комбинированным наполнителем из стеклоленты, стеклонитей или прядей различной их ориентации по слоям стенки трубы, а также в сочетании с лентами или трубами из термопластов – бипластмассовые трубы.

Трубы последних двух видов наиболее целесообразны для газонефтепроводов.

Особенности свойств труб зависят от методов их изготовления.

Существует несколько способов изготовления стеклопластиковых труб; способ намотки на оправку стекловолоконистого материала, пропитанного смолой (при этом формование трубы ведут по внутреннему диаметру); центробежный способ, при котором смесь из смолы и стеклонеполнителя равномерно распределяется при вращении формы на ее внутренней поверхности, формирующей наружный диаметр трубы; способ прессования или протяжки, при котором для производства трубы используют оправку и форму, когда оформляют одновременно наружную и внутреннюю поверхности трубы. Но любой процесс их производства обязательно включает в себя операции пропитки стекловолоконистого наполнителя связующим, формования трубы и полимеризации связующего. Наибольшее применение нашел способ намотки, при котором стекломатериал (нить, ровница, лента и др.) пропитывают термоактивной смолой и наматывают на оправку необходимого размера. Способ намотки позволяет изготавливать трубы высокой прочности любых размеров (до нескольких метров в диаметре и нескольких десятков метров в длину).

По типу оправок, применяемых в различных странах, способ намотки подразделяют на следующие разновидности.

1. Намотка армирующего материала на жесткую оправку, закрепленную с обоих концов. По окончании формования стеклопластиковой трубы оправку вместе с ней вынимают из машины и освобождают от трубы. Таким периодическим способом можно изготавливать и бипластмассовые трубы, если перед намоткой на оправку надеть трубу из термопласта.

2. Намотка стеклопластика на оправку, представляющую собой трубу из термопласта. Оправку перед намоткой нагревают (при этом она расширяется под действием внутреннего давления) и охлаждают в таком напряженном виде. После формования и отверждения на этой оправке трубы из стеклопластика и снижения давления оправку снова нагревают до восстановления исходных размеров. При этом оправка из термопласта сокращается в размерах и сформованная стеклопластиковая труба с нее свободно снимается.

3. Намотка стеклопластика на консольно закрепленную оправку. На одном участке оправки непрерывно происходит формование трубы, а на другом — ее отверждение и стягивание специальным устройством. При этом можно применять пленочное герметизирующее покрытие.

4. Намотка на консольную оправку с подвижными секторами (шаговую оправку). Формование трубы аналогично предыдущему способу, но перемещение готовой трубы вдоль оправки осуществляется осевым перемещением попарно противоположных секторов оправки. Иногда на оправку перед зоной намотки армирующего стекломатериала

ла наматывают ленту из термопласта, которая затем спекается со стекломатериалом.

5. Жесткая оправка с надетым на нее рукавом из стеклоткани непрерывно перемещается, а на нее наматывают ленту из термопласта, после чего происходит спекание материала.

6. Намотка стеклопластика на трубу из термопласта непосредственно после выхода ее из экструдера или на трубу, предварительно изготовленную центробежным или другим способом.

7. Намотка сухого армирующего стекломатериала на трубу из термопласта. Затем ее помещают в форму и раздувают горячим воздухом до размягчения и полного прилегания к стенкам формы.

Возможны и другие варианты намотки.

По методам подачи стекловолоконистого наполнителя в производстве стеклопластиковых труб обычно различают установки двух типов:

токарные, когда стержень (оправка) вращается в одном направлении, а армирующий материал, наматываемый на него, подается механизмом, движущимся в продольном (относительно оправки) направлении;

кабельные, когда армирующие ленты или ровница вращаются вокруг поступательно движущейся оправки, наматываясь на нее.

Наиболее распространен кабельный способ изготовления труб из стеклопластиков.

По расположению оправки для производства стеклопластиковых труб установки подразделяют на два вида: вертикальные и горизонтальные.

В вертикальной установке (рис. 85), применяемой в США для производства стеклопластиковых труб диаметром 50–150 мм способом намотки, на стальную полированную и хромированную оправку наносят слой антиадгезионного покрытия для облегчения съема сформованной трубы. Оправке придают поступательное перемещение в вертикальном направлении при помощи валков 1, расположенных в нижней части машины. В процессе изготовления трубы оправка проходит последовательно через центральные отверстия в шести столах, расположенных один под другим. На столах производят намотку определенного слоя стекломатериала или продольную укладку жгутов с пропиткой связующим. Наружный слой трубы наматывают на столе 9 из ленты стекловолокна при вращении, противоположном вращению столов 2 и 7. Намотку осуществляют со значительным натяжением ленты, без пропитки ее связующим, так как предыдущие слои трубы пропитаны с избытком. Связующее выдавливается из предыдущих слоев трубы при намотке наружного слоя и пропитывает его. На столе 11 проводят уплотнение стенки трубы и снятие избытка смолы с помощью деревянных лопаток 10 и намотку на трубу целлофановой ленты.

Таким образом, многослойную трубу изготавливают способом спи-

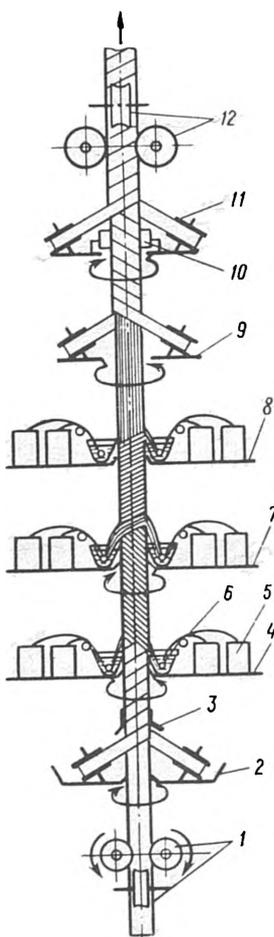


Рис. 85. Схема вертикальной установки для изготовления труб из стеклопластиков:

1 — приводные валки; 2 и 9 — столы для намотки лент стеклоткани; 3 — уплотняющая диафрагма; 4 и 7 — столы для намотки жгутов стекловолокна; 5 — бухта стекловолокна; 6 — ванна со связующим; 8 — стол для продольной укладки жгутов стекловолокна; 10 — уплотняющие лопатки; 11 — стол для обмотки трубы целлофаном; 12 — направляющие валки

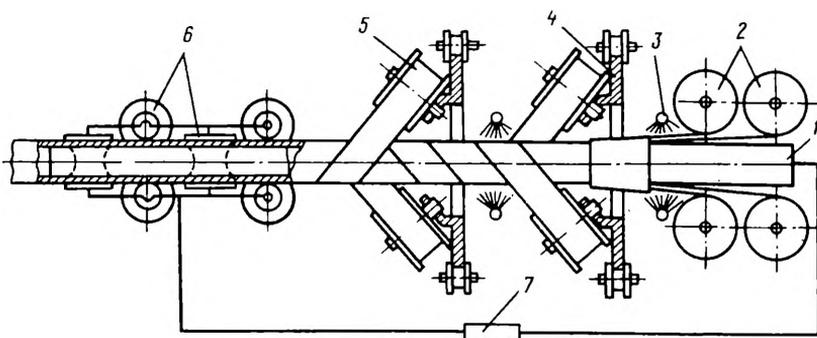


Рис. 86. Схема горизонтальной установки для изготовления труб из стеклопластиков

ральной перекрестной намотки на оправку стеклолент и стекложгутов с дополнительной продольной укладкой жгутов стекловолокна, предварительно пропитанных полиэфирной смолой горячего отверждения. Внутренний слой сформованной трубы состоит из двух слоев стеклолент, пропитанных полиэфирной смолой. Второй и третий слои наматывают по спирали из ровницы в 60 сложений сначала в одном направлении, затем — в другом. Четвертый слой состоит из ровницы, уложенной вдоль оси, а пятый — из стеклоленты, уложенной по спирали в направлении, противоположном первому слою.

Процесс формования трубы из стеклопластиков непрерывен. Для этого оправку состыковывают на ходу из отдельных частей.

По мере изготовления сформованную трубу разрезают на отрезки по разъемному стыку оправки и вместе с оправкой подают в печь для отверждения.

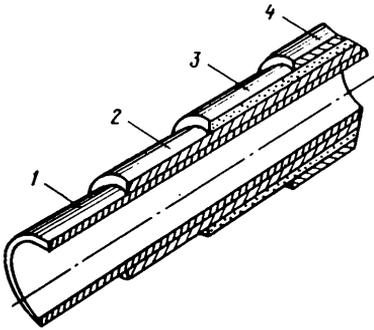
Горизонтальная установка для производства труб из стеклопластиков, разработанная во Франции, позволяет изготавливать конструкционные и водонепроницаемые трубы диаметром от 30 до 150–350 мм. Последние могут выдерживать давления до 30,0 МПа. На станине машины укрепляют неподвижно оправку 1 (рис. 86). В качестве антиадгезионного слоя на нее укладывают в продольном направлении целлофановые ленты, а затем в том же направлении ленты стеклоткани с одновременным нанесением связующего. Для этого катушки 2 с лентами целлофана и стеклоткани крепят на неподвижных осях. Последующие слои стеклоткани укладывают с перекрытиями на 10 мм с помощью формовочного устройства при подаче связующего форсунками 3. Формующее устройство представляет собой два диска 4 с центральными отверстиями для оправки. На каждом диске установлены по четыре катушки 5 со стеклолентами. Для регулирования натяжения стеклолент катушки имеют тормозные устройства. При вращении дисков с катушками на оправку наматывается одновременно восемь слоев стеклоленты. Стеклоленты можно применять и с предварительной пропиткой. Вместо стеклолент можно использовать ровницу или сочетание ровницы и стеклолент.

Дальнейшие формовку, отверждение и протяжку трубы проводят с помощью специального устройства, состоящего из нескольких пар вращающихся роликов 6, являющихся электродами генераторов токов высокой частоты 7. Профиль роликов очерчен по дуге окружности, благодаря чему они хорошо прилегают к трубе, уплотняя и нагревая ее по толщине. Нагрев ТВЧ позволяет вести процесс отверждения термореактивного связующего быстро и равномерно по всей толщине трубы.

Способ изготовления труб намоткой непрерывно совершенствуется.

Стеклопластиковые многослойные трубы (рис. 87) диаметром 100–120 мм длиной 6 м разработаны одной из фирм Великобритании

Рис. 87. Стеклопластиковая многослойная труба



на основе эпоксидной смолы. Эти трубы предназначены для транспортировки природного и нефтяного газов на давления от 1,05 до 4,22 МПа. Они состоят из несущей высокопрочной оболочки из стекловолоконистой ровницы, получаемой методом намотки на стальные сердечники установки с контролем скорости намотки электронными установками. Внутренний слой наматывают из тонкого акрилового волокна 1, поверх него — ленту из стекловолокна 2. Эта оболочка — прочный каркас для восприятия нагрузки. На ленту из стекловолокна наматывают стеклянную ровницу 3, пропитанную эпоксидной смолой горячего отверждения, и затем — наружный слой из акрилового волокна 4. Сформованную трубу снимают с намоточной машины и переносят в камеру для отверждения эпоксидной смолы, после чего из трубы извлекают сердечник.

Бипластмассовые трубы также производят способом намотки. На основу из термопластичного материала — поливинилхлорида — наматывают, например, стекловолокно, пропитанное смолой. Для лучшего соединения поливинилхлорид обрабатывают подаваемым одновременно с намоткой растворителем или смолой специальной марки. Известны и другие варианты их изготовления. Так, трубы диаметром 800—1400 мм толщиной стенки 4—9,5 мм могут состоять из трех слоев, когда между двумя слоями стекловолокна наматывают один слой полимерной ленты из термопласта, или из восьми слоев, когда после трех слоев стеклонаполнителя наматывают два слоя ленты из термопласта, а затем снова три слоя стеклонаполнителя.

Определенный интерес представляет способ получения труб высокой химической стойкости, выдерживающих температуру 260°С, из политетрафторэтилена (тефлона) или фторопласта, стеклоткани с дополнительным нанесением наружного покрытия из пастообразного фторопласта.

В США большой интерес вызывают так называемые надувные трубы. Их поставляют в рулонах как эластичный шланг, развертывают и отверждают на месте монтажа трубопровода. Такие трубы, эксплуатирующиеся при высоких давлениях в коррозионных условиях сред,

выпускают для нефтехимических заводов и нефтепромыслов. Трубы состоят из нескольких слоев: внутреннего слоя из смолы, намотанной герметизирующей пленки из термопласта, основного слоя смолы и наружного слоя из окрашенной полиэфирной смолы. Трубы выпускают диаметром: 50,8; 76,2; 102,6; 152,4 мм и др. Трубы, например, диаметром 50,8 мм имеют толщину стенки 2 мм и могут работать при давлении 2,1 МПа и температуре до 65°С.

В полевых условиях применяют портативные воздухонагреватели и парогенераторы для надувания и отверждения труб на месте монтажа. На поворотах большого радиуса трубы можно укладывать по оси трубопровода и отверждать, не применяя фитинги. Трубы используют также при ликвидации утечек в трубопроводах: длинную неотвержденную трубу протаскивают в зону повреждения, после чего ее подвергают полимеризации внутри трубопровода. Простота монтажа, минимальное число соединений, компактность транспортировки могут дать значительный экономический эффект при использовании этих труб. По стоимости эти трубы вполне могут конкурировать со стальными.

Кроме рассмотренных видов стеклопластиковых труб и установок для их производства в разных странах применяют установки со своими специфическими особенностями. В Советском Союзе для изготовления труб из стеклопластиков используют главным образом установки, основанные на способе намотки.

Прочность при растяжении материала труб из стеклопластиков составляет 100—400 МПа и более.

ВНИИСТом совместно с Всесоюзным научно-исследовательским институтом токов высокой частоты им. В.П. Вологодина (ВНИИТВЧ) разработан метод непрерывного изготовления труб из стеклопластиков. С помощью специального станка на стальной цилиндр наматывают стекловолокно и стеклоткань, пропитанные полиэфирной смолой, затем включают ток высокой частоты и через 30—40 с труба из мягкой и вязкой становится твердой. Отвержденный участок продольным движением стаскивают с дорна, затем отверждают следующий отформованный участок трубы. Процесс непрерывен. Этим способом получают напорные трубы из стеклопластиков диаметром 100—150 мм, пригодные для эксплуатации при рабочем давлении до 2,5 МПа.

Разработана конструкция стыковых соединений труб, обеспечивающая легкость монтажа трубопроводов в полевых условиях склеиванием. Ведут работы по созданию газонепроницаемых труб для более высоких давлений. В Харьковском политехническом институте им. В.И. Ленина разработаны конструкции установки для изготовления стеклопластиковых труб способом непрерывной намотки диаметром 15—75, 50—100, 75—300 и 300—500 мм. Эти трубы рекомендуют для напорных трубопроводов, транспортирующих газы, агрессивные и абразивные среды.

Непрерывность процесса производства труб способом намотки создают применением шаговой оправки, позволяющей непрерывно перемещать сформованную на ее поверхности трубу в продольном направлении. Оправка для формования труб состоит из восьми сегментов, которые совершают возвратно-поступательное движение вдоль ее оси с помощью кулачкового механизма (копира). Профиль копира подобран так, что шесть сегментов из восьми движутся вперед, а два диаметрально расположенных сегмента быстро возвращаются назад. При вращении оправки на нее наматывают стеклонаполнитель, пропитываемый связующим. Для укладки нитей в продольном направлении служит раскладчик. Петли продольной армировки на трубе закрепляют жгутами поперечной намотки. Пропитку продольного стеклонаполнителя связующим осуществляют с помощью барабана, который погружен на одну треть своего диаметра в связующее: при вращении барабана связующее наносится на поверхность трубы. Стекложгуты поперечной намотки пропитывают связующим в отдельной ванне.

Участок оправки, на котором происходит намотка трубы, составляет 500 мм. Часть оправки длиной 700 мм после намотки трубы помещают в тепловую камеру для отверждения. Трубы выдерживают внутреннее давление 10 МПа и выше.

Трубы из стекловолокнистого анизотропного материала можно изготовлять непрерывной намоткой параллельно укладываемых стеклянных нитей, пропитанных смолой, на цилиндрическую оправку с последующей тепловой обработкой для отверждения сформованного изделия. Трубы из СВМ выдерживают внутреннее давление до 40 МПа и выше.

Трубы из СВМ изготовляют периодическим методом. Сначала производят полотнища стеклошпона, затем полотнища СВМ, пропитанные смолой, наматывают на вращающуюся оправку (дорн) длиной, равной длине стеклошпона, и одновременно обкатывают и разогревают тремя роликами специальной установки.

При достижении нужной толщины трубы намотку полотнищ стеклошпона прекращают и оправку со сформованной трубой помещают в разъемную пресс-форму, в которой трубу опрессовывают с одновременной полимеризацией связующего из термореактивных полимерных смол. После отверждения трубу снимают с оправки, обрабатывают и направляют на испытание.

Для обеспечения газонепроницаемости напорных труб из стеклошпона нажимное давление при намотке должно составлять не менее 6–9 МПа. При нажимном давлении 12–18 МПа трубы, испытанные на давление выше 10 МПа, практически газонепроницаемы. Такие трубы являются стойкими к бензину, природному газу и воде, загрязненной сероводородом.

За рубежом резервуары из стеклопластиков сооружают различной

формы (цилиндрической, прямоугольной, сферической) и разных размеров в заводских условиях или на монтажной площадке в полевых условиях.

В заводских условиях резервуары изготавливают контактным формированием или методами намотки. При этом на вращающийся стальной дорн, обмотанный тонкой полимерной (полиэтилентерефталатной) пленкой, укладывают стеклопластиковый материал, пропитанный полимерной смолой. Резервуары, получаемые методом намотки, дешевле, имеют более высокие механические свойства материала, но менее коррозионностойки.

В полевых условиях стоимость изготовления резервуаров дороже, но их объемы значительно выше (до 4000 м³ и более). Применяют методы намотки, а также монтаж из отдельных секций сегментов, скорлуп заводского изготовления.

Для изготовления днищ резервуаров и различных их деталей, нанесения покрытий, футеровок и ремонта используют метод напыления стеклопластиков. Установка для напыления состоит из автоматической системы непрерывно подготавливающей, смешивающей и подающей (по усмотрению оператора) материал в пистолет-распылитель с тремя головками, который раздельно распыляет смолу с инициатором, смолу с ускорителем и резаный стекложгут. Напыляют стеклопластиковое покрытие в три этапа: сначала наносят слой покрытия из полимерной смолы, затем — смесь из рубленого стекловолокна и смолы с ускорителем, инициатором и другими добавками, после этого — наружное покрытие из смолы.

22. ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ ТРУБЫ

Железобетонные трубы по сравнению с чугунными и стальными обладают рядом преимуществ:

пропускная способность их на 15–25 % больше пропускной способности чугунных за счет гладкости стенок;

внутри труб при их эксплуатации не образуется коррозионных отложений, увеличивающих потери напора и уменьшающих пропускную способность трубопроводов;

коррозионная стойкость и долговечность выше, чем у стальных и чугунных труб;

срок службы составляет примерно 80 лет, а стальных — 20–30 лет и менее;

в меньшей степени подвергаются разрушающему действию блуждающих электрических токов;

имеют сравнительно небольшую металлоемкость; на их изготовление даже со стальной облицовкой или внутренним цилиндром рас-

ходуется металла в 2,5–3 раза меньше, чем на стальные трубы того же диаметра;

стоимость значительно ниже стоимости металлических.

К недостаткам напорных железобетонных труб относятся: значительная масса, что осложняет их транспортировку и укладку; невозможность предварительного соединения звеньев труб на поверхности земли у траншеи; трудность установки арматуры и фасонных частей.

Напорные железобетонные трубы изготовляют с раструбом.

Железобетонные предварительно напряженные напорные трубы классифицируют по ряду признаков: назначению; размерам; способу изготовления, т.е. методу укладки и уплотнения бетонной смеси; способу осуществления предварительного напряжения спиральной и продольной арматуры; конструкции, форме торцов и виду стыкового соединения; классам прочности и др.

По конструкции трубы подразделяют на цилиндрические (в стенке которых имеются стальные, сваренные из тонколистовой стали, или пластмассовые цилиндры) и бесцилиндрические со спиральным каркасом и продольной арматурой.

По способу изготовления и арматуре предварительно напряженные железобетонные трубы подразделяются на следующие виды:

- 1) со стальным цилиндром и предварительно напряженной спиральной арматурой с нанесением необжато защитного слоя на поверхность;
- 2) с предварительно напряженной продольной и спиральной арматурой с нанесением необжато защитного слоя;
- 3) с предварительно напряженной продольной и спиральной арматурой с нанесением обжато защитного слоя в процессе передачи гидравлического давления на стенки трубы;
- 4) с предварительно напряженной продольной и спиральной арматурой, с одновременно бетонированным и обжатым внутренним и защитным слоем стенки трубы в процессе виброгидропрессования;
- 5) со спиральной и продольной арматурой и с самонапрягающим цементом;
- 6) стеклопластикобетонные с предварительно напряженной продольной арматурой.

Трубы первых трех видов изготовляют по трехступенчатой технологии (сначала выполняют железобетонный сердечник, а затем навивают спиральную арматуру и наносят защитный слой на поверхность трубы). Трубы четвертого и пятого видов изготовляют по одноступенчатой технологии, а шестой – по двухступенчатой технологии.

Производство железобетонных труб организовано как на специализированных заводах, так и в цехах и отделениях, входящих в состав комбинатов и заводов железобетонных изделий. В качестве основной технологии производства железобетонных напорных труб в СССР принята технология с использованием метода виброгидропрессования.

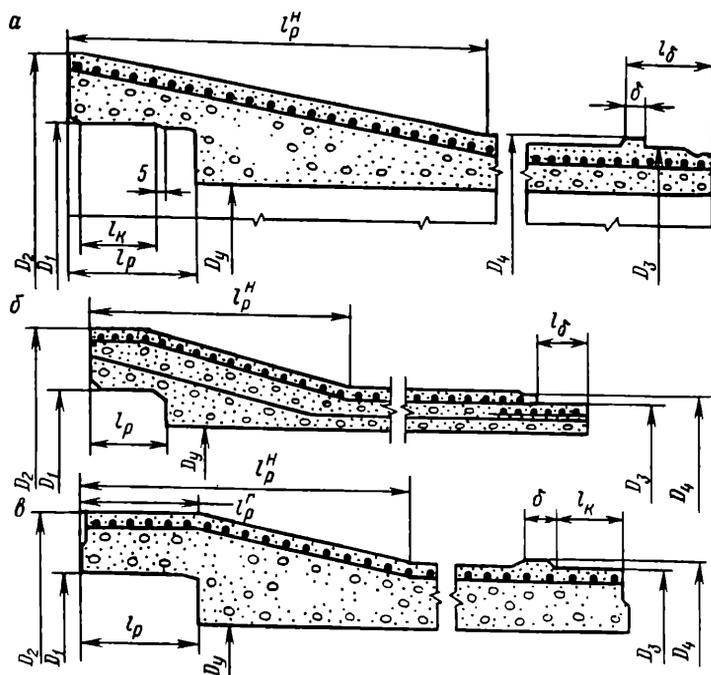


Рис. 88. Железобетонные напорные трубы:

а – виброгидропрессованные; *б* – центрифугированные со ступенчатым втулочным концом; *в* – центрифугированные с буртовым втулочным концом

Кроме того, изготавливают напорные железобетонные трубы методом центрифугирования по трехступенчатой технологии. Технология изготовления железобетонных труб на различных предприятиях имеет специфические особенности при всей общности основных технологических операций.

По прочности железобетонные трубы делятся на три класса: класс I на рабочее давление 1,5 МПа; класс II на давление 1 МПа и класс III на давление 0,6 МПа. Класс железобетонных напорных труб определяют по результатам гидравлических испытаний труб. Если трубы не выдерживают испытательное давление, соответствующее рабочему давлению труб класса I, то их переводят в класс II или III или в безнапорные трубы.

Виброгидропрессованные трубы (рис. 88, а) поставляют по трем классам прочности диаметром условного прохода D_y 500, 600, 800, 1000, 1200, 1400 и 1600 мм длиной 5 м с толщиной стенки 1/9–1/15 диаметра на давления до 1,5 МПа. Железобетонные центрифугированные трубы с арматурным каркасом, а также трубы со стальным цилиндром

ром обычно производят на давление до 1 МПа. Центрифугированные трубы (рис. 88, б, в) изготавливают диаметром условного прохода D_y 500, 600, 700, 800, 900 и 1000 мм. По своим размерам и свойствам трубы разных заводов-изготовителей имеют некоторые различия. Раструб труб характеризуется размерами D_1 , D_2 , l_p , l_p^H , l_p^T ; ступенчатый и буртовой втулочный концы труб – размерами σ , l_σ , r_k , D_3 и D_4 .

Из рассмотренных видов железобетонных труб наиболее перспективны для газонефтепроводов трубы со стальным или пластмассовым цилиндром и виброгидропрессованные.

При современном уровне развития производства возможно создание железобетонных труб на давление до 2,5 МПа за счет усовершенствования способов изготовления труб со стальным или пластмассовым цилиндром, а также благодаря изменению технологии изготовления напряженно армированных труб методом виброгидропрессования с применением специальных плотных бетонов и т.д.

Железобетонные трубы целесообразно использовать для сооружения отводов от магистральных газопроводов, коллекторов и других трубопроводов на промыслах, а также для разводящих сетей на нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводах, нефтебазах, для городских газовых сетей и т.д.

Центрифугированные трубы

Материалы для труб. Для изготовления напорных железобетонных труб обычно применяют бетонную смесь, состоящую из портландцемента (силикатцемента – вяжущее), песка (мелкий заполнитель) и фракционированного щебня из естественного камня или гравия (крупный заполнитель в соотношении 1 1, 5 : 2,5). Замешивают бетонную смесь на воде. Соотношение воды и цемента (В/Ц) не должно превышать 0,4–0,42. Кроме того, в бетон можно вводить добавки различного назначения: для ускорения или замедления сроков схватывания бетона, улучшения его удобоукладываемости, ускорения твердения, улучшения его физико-механических свойств, например, понижения водопроницаемости, повышения сопротивляемости агрессивным воздействиям и т.д.

При изготовлении труб особое внимание уделяют контролю качества бетонной смеси. В бетономешалку сначала засыпают щебень, цемент и песок и перемешивают сухую смесь в течение 1 мин. Затем в течение 1–1,5 мин вливают в смесь воду и перемешивают 1,5–2 мин.

Защитный слой стенки железобетонной трубы наносят главным образом в виде цементно-песчаного раствора состава 1 : 2 – 1 : 2,5 с В/Ц = 0,3 ÷ 0,35.

Предварительно напряженные трубы со стальным цилиндром изготавливают с металлическим цилиндром толщиной 1–2 мм внутри стенки или в виде облицовки внутренней поверхности. Сначала выполняют

железобетонный сердечник (первая ступень). Для этого стальной цилиндр с приваренными к нему концевыми обечайками (для образования раструба и гладкого конца) бетонируют прессованием, центробежным или вибрационным способом, а затем на сердечник навивают с определенным контролируемым напряжением проволоку. Навивку проволоки осуществляют обычно механическим способом на специальных установках при вращении трубы (вторая ступень). Третья ступень изготовления трубы – нанесение на сердечник поверхностного защитного слоя толщиной 15–20 мм, что осуществляют способом торкретирования путем бетонирования сердечника в вертикальных виброформах или другим способом.

Преимущества таких труб – герметичность благодаря наличию металлического цилиндра (что особенно важно при транспортировке газа и светлых нефтепродуктов), а также простота их стыкования. Однако металлоемкость и стоимость этих труб из-за металлического цилиндра повышаются, стойкость же против коррозии снижается. Стальной цилиндр можно заменять пластмассовым.

При изготовлении железобетонного сердечника бетонирование стального цилиндра можно осуществлять различными способами. Наиболее распространен центробежный способ бетонирования, который осуществляют во вращающейся разъемной или неразъемной форме. В нее загружают стальной цилиндр и бетонную смесь. Бетон уплотняют при частоте вращения 800–1000 об/мин. Формы изготавливают перфорированными для удаления воды во время бетонирования. Затем трубу-сердечник вместе с формой подают в камеру отверждения (пропаривание). После этого форму снимают и трубу-сердечник передают на склад, а затем – на вторую стадию изготовления.

Вибрационным способом бетонирование осуществляют в вертикальных металлических формах, состоящих из наружной (в виде разъемного цилиндра из двух или четырех частей) и внутренней (часто в виде сплошного стержня) частей. Бетон уплотняют с помощью вибраторов, прикрепляемых к наружной и внутренней частям вертикальной формы. Вибрационным способом уплотнение можно осуществлять и на горизонтальных виброплощадках.

Предварительно напряженные трубы без стального цилиндра с необязательным защитным слоем более экономичны, чем трубы со стальными цилиндрами. Производят их по трехступенчатой технологии со спиральным арматурным каркасом и продольной арматурой.

Сначала изготавливают сердечники труб в собранных из двух половин формах. В форме устанавливают стержни продольной арматуры с предварительным напряжением и форму передают в центрифугу на бетонирование. Бетонную смесь подают, например, ленточным конвейером от раструба к втулочному кольцу в несколько приемов в зависимости от диаметра трубы и толщины ее стенки. В раструбную часть формы смесь поступает за один прием.

После загрузки частота вращения формы составляет примерно $1/3$ от максимальной. При этом в течение нескольких минут бетонная смесь распределяется по внутренней поверхности формы слоем равномерной толщины. Затем частота вращения формы увеличивается до максимальной, при которой происходит уплотнение сформованного слоя стенки железобетонного сердечника трубы. Время центрифугирования зависит от диаметра трубы. По окончании уплотнения первого слоя бетона в форму подают смесь для формирования второго, потом третьего слоев стенки сердечника трубы (первая ступень). Сформованный железобетонный сердечник поступает вместе с формой на пропаривание.

Форму устанавливают вертикально раструбом вниз. Втулочный торец формы прикрывают крышкой и выдерживают около 2 ч. Затем через колпак с перфорированной решеткой подают внутрь сердечника пар и пропаривают его в течение 4 ч. Далее железобетонный сердечник освобождают от формы и укладывают в водяную ванну для окончательного твердения в воде комнатной температуры в течение 3 сут, а потом в горячей воде в течение 1 сут. Затем его подают на промежуточный склад, откуда он поступает на арматурно-навивочный станок для намотки спиральной проволочной арматуры (вторая ступень). В проволоке создают напряженное состояние натяжением ее грузовым устройством станка или электротермическим воздействием, возникающим при остывании проволоки, в результате ее нагрева электрическим током до температуры 350°C .

После навивки спиральной арматуры железобетонный сердечник устанавливают на станок для нанесения (в процессе вращения сердечника) защитного слоя стенки трубы из цементного раствора (третья ступень). Цементный раствор, например, подают на станок из бункера в зазор между поверхностью сердечника и профилирующим ножом, прикатывая слой цемента уплотняющим роликом. Профилирующий нож устанавливают с учетом получения слоя нужной толщины. Для уплотнения цементного раствора служит вибратор. Время нанесения защитного слоя 12–15 мин. Защитный слой часто наносят на железобетонный сердечник методом торкретирования (набрызга), особенно для труб большого диаметра.

Готовые трубы передают в камеру твердения, затем подвергают гидравлическому испытанию.

Более высокого качества получают железобетонные трубы при осуществлении бетонирования сердечника железобетонной трубы методом центрифугирования с прессованием.

Предварительно напряженные трубы без стального цилиндра с обжатый защитным слоем изготавливают по трехступенчатой технологии.

Сначала делают железобетонный сердечник методом центрифугирования из бетона и арматурного каркаса с продольной и спиральной

проволочной арматурой. Применяют спиральную арматурную проволоку диаметром 4–5 мм. Продольная арматура – проволочная прядь П-3, свитая из трех проволок. На стержень-катушку, установленный в станок, навивают механизированным путем продольную арматуру и натягивают (натягивают) ее с помощью гидродомкратов. Затем стержень-катушку укладывают в нижнюю полуформу, закрывают ее и скрепляют с верхней полуформой. Из собранной формы извлекают стержень-катушку так, что продольная арматура остается внутри формы в напряженном состоянии и форму подают в центрифугу на бетонирование сердечника трубы (первая ступень).

Сразу после формования сердечник с формой устанавливают на станок для вырезания раструба. Далее сердечник подают на пропаривание (5–6 ч), затем на распалубку и снова пропаривают его. После этого на него навивают спиральную арматуру (вторая ступень). Затем в сердечник устанавливают стальной напорный цилиндр с заглушками для торцов и в зазор между внутренней поверхностью сердечника и напорным цилиндром нагнетают воду под давлением, равным $3/4$ от рабочего. При этом стенки сердечника растягивают. В таком деформированном состоянии под давлением воды на поверхность сердечника методом торкретирования наносят защитный слой цементно-песочного раствора (третья ступень) и трубу снова пропаривают для твердения, не снимая давления воды. По окончании пропаривания давление уменьшают и стенки трубы обжимаются, получая предварительное напряжение. Стержни продольной арматуры обрезают и трубу подают на стенд для гидравлических испытаний. Этот способ не получил широкого применения, так как стойкость труб против трещин заметно не повышается, как показали исследования Научно-исследовательского института бетона и железобетона (НИИЖБ).

Виброгидропрессованные трубы

Формование труб посредством виброгидропрессования состоит из следующих операций: загрузка и уплотнение с помощью пневмовибраторов бетонной смеси в форме, обжатие смеси, во время которого происходит предварительная ее опрессовка, собственно прессование, выдержка под давлением и его снятие.

У виброгидропрессованных труб применяют предварительно напряженную продольную арматуру и арматурный каркас. Спиральный арматурный каркас изготавливают на навивочных станках. Для скрепления витков спирального каркаса применяют разделительные полосы с выштампованными язычками. Стержни продольной арматуры нарезают необходимой длины на механизированной установке, а затем на концах стержней проводят холодную высадку анкерных головок.

Для сокращения трудоемкости арматурных работ, особенно по ус-

тановке и напряжению продольной арматуры, рекомендуется применять спирально-перекрестный арматурный каркас вместо продольной арматуры в сочетании со спиральным арматурным каркасом. Спирально-перекрестный арматурный каркас состоит из ряда спиралей, навиваемых непрерывно в обоих направлениях с большим шагом.

Технологический процесс изготовления виброгидропрессованных труб включает следующие операции: подготовка стержней продольной арматуры и спирального арматурного каркаса, подготовка формы к бетонированию, приготовление бетонной смеси, укладка бетонной смеси с помощью вибраторов, уплотнение бетонной стенки трубы гидропрессованием и тепловая обработка, испытание труб внутренним гидравлическим давлением, отделка и вывозка труб на склад готовой продукции.

Форма для производства железобетонных труб состоит из наружной обечайки и внутреннего сердечника. Наружные обечайки диаметром 500–800 мм изготавливают из двух секций, а обечайки диаметром 1000–1600 мм – из четырех секций. Внутренний сердечник состоит из металлического цилиндра, на который надеты резиновый чехол и раструбообразователь. В комплект формы входят также: нижнее и верхнее анкерные кольца для монтажа стержней продольной предварительно напряженной арматуры; калибрующее кольцо для образования втулочной части трубы, уплотняющее кольцо (или крестовина) для обеспечения герметичности формы во время гидропрессования бетона трубы; конус для равномерного распределения бетонной смеси по периметру формы; пружинные болты для соединения секций наружной обечайки; центрирующее кольцо для обеспечения соосности сердечника (или в ряде случаев центрирующие бобышки). Раструбообразователь (резино-металлические опоры) изготавливают в виде резинового кольца, верхняя часть которого армирована в процессе его вулканизации концентрично расположенными внутренними кольцевыми слоями резинокордной ленты и пружины, а нижняя часть – в процессе вулканизации пружинным кольцом с кордовой постелью и металлическим фланцем с резьбовыми гнездами для жесткого соединения с основанием формы. Существуют и другие более совершенные конструкции раструбообразователей.

В настоящее время форму изготавливают без раструбообразователя. Такая форма (рис. 89) с продольной 5 и спиральной 7 арматурой состоит из металлического сердечника 4, на который надет эластичный чехол 3, закрепленный с торцов фланцами 12 и 1. Для образования заходной фаски в раструбной части железобетонной трубы в фигурный паз фланца 1 закладывают эластичное кольцо 2, защищающее чехол от износа. Чтобы предотвратить попадание мельчайших частиц бетонной смеси между эластичным кольцом 2 и чехлом 3, стык заклеивают клейкой лентой, которая одновременно защищает эластичное кольцо 2 от износа. Фла-

нец 1 – одновременно посадочное гнездо для наружной формы 6. Втулочный конец формы состоит из калибрующего кольца 8, верхнего анкерного кольца 9 и крестовины 11 с уплотняющим кольцом 10, имеющим скошенную фаску для образования профиля втулочного торца. Эластичный чехол для гидропрессования цилиндрической и раструбной частей трубы составляет единое целое. Формы такой конструкции можно использовать для изготовления труб диаметром до 2000 мм.

При формировании виброгидропрессованных труб бетонную смесь, уложенную в форму, прессуют с помощью гидростатического давления после ее уплотнения вибрацией пневматическими высокочастотными вибраторами, навешенными на форму.

Гидропрессование стенки трубы осуществляют через сердечник формы резиновым чехлом.

Процесс гидропрессования осуществляют с помощью установки высокого давления и регулятора давления, позволяющего осуществлять подъем давления в подчехольном пространстве, а затем автоматически поддерживать заданный режим. По достижении необходимого опрессовочного давления регулятор переводят на автоматический режим и железобетонную трубу подвергают двух- или односторонней тепловой обработке паром при температуре 90–95 °С. На форму надевают

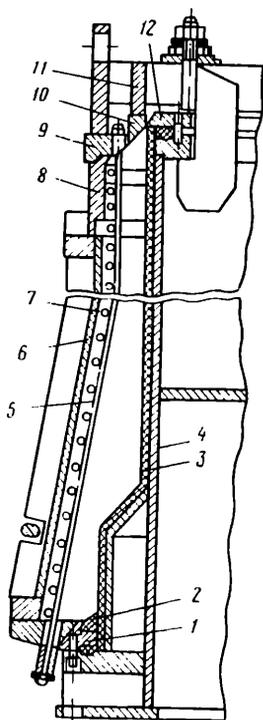


Рис. 89. Конструкция формы для изготовления железобетонных труб виброгидропрессованием

чехол и под него и во внутреннюю полость сердечника подают пар (двухсторонняя тепловая обработка в течение 5–16 ч) или только во внутреннюю полость сердечника (односторонняя тепловая обработка в течение 7–20 ч). Длительность обработки зависит от размера труб. Для двухсторонней тепловой обработки применяют различные устройства, например складывающийся пропарочный чехол. Известны и другие способы тепловой обработки железобетонных труб (например, с помощью трубчатых электронагревателей (ТЭН), индукционным нагревом, в электромагнитном поле тока промышленной частоты и др.) с целью получения более равномерного распределения температуры по толщине и высоте трубы. Двухсторонняя тепловая обработка труб позволяет получать более качественные трубы.

Для уменьшения уровня шума, сокращения времени формирования труб (в 2–3 раза), трудоемкости на 5–8 % рекомендуется установка-

вать форму на специальную виброплощадку с применением бетоно-смесителей принудительного действия.

Одно из направлений совершенствования конструкции и технологии виброгидропрессованных труб – применение (вместо традиционного защитного цементного слоя) спиральной арматуры с антикоррозионным покрытием, навиваемой на поверхность трубы. В качестве антикоррозионного покрытия спиральной арматуры наиболее пригодны полиэтилен и поливинилбутираль, наносимые вихревым или электростатическим способом.

Самонапряженные трубы

Такие трубы изготовляют с предварительно напряженной арматурой по одноступенчатой технологии.

Советским ученым В.В. Михайловым предложен цемент, названный напрягающим. Бетон, изготовленный на таком цементе, при твердении расширяется и натягивает (самонапрягает) установленную в нем арматуру. Напрягающий цемент получают путем механического перемешивания готового портландцемента (60–65 %), глиноземистого цемента (15–20 %), гипса (12–13 %) и извести (3–4 %). Формование труб проводят обычно методом центрифугирования по рассмотренной выше схеме.

Сформованные трубы требуют прогрева, для чего их подвергают гидротермообработке. Трубы прогревают после их твердения в нормальных условиях через 16–18 ч после затворения цемента водой. Гидротермообработку труб проводят в течение 2–6 ч при выдержке в воде с температурой до 80–100°С. Цемент, расширяясь в процессе прогрева, напрягает арматуру трубы. Затем трубы выдерживают в холодной воде в течение 3–7 сут. При этом происходит дальнейшее расширение бетона и предварительное напряжение арматуры.

Самонапряженные железобетонные трубы предназначены на давление до 1 МПа, но они могут иметь полную водонепроницаемость и при давлении более 2 МПа в зависимости от состава бетона.

Стеклопластикобетонные трубы

Разновидности неметаллической арматуры, которую можно использовать для изготовления бетонных труб, – стеклянные нити, жгуты и ленты, пропитанные синтетическими смолами (связующим). Отсутствие в этих трубах спиральной стальной арматуры позволяет их рекомендовать для сооружения трубопроводов в коррозионно-активных грунтах или в грунтах с наличием блуждающих токов, когда стальная арматура железобетонных труб выходит из строя вследствие сильной ее коррозии.

Бетонные трубы со стеклопластиковой арматурой имеют практически такую же высокую прочность, как и обычные трубы, но меньшую массу, большую гибкость, повышенную стойкость в грунтах с сульфатной агрессивностью к воздействию бактерий и блуждающих токов, а также другие особенности.

Такие трубы изготавливают по двухступенчатой технологии: на первом этапе получают бетонный сердечник трубы с продольной предварительно напряженной стальной арматурой из проволоки периодического профиля или арматурной пряжи; на втором проводят армирование (намотку) стеклопластиковой арматурой с одновременной ее пропиткой и нанесением защитного слоя из синтетических смол.

Сердечник из бетона марки не ниже В50 изготавливают обычно с применением центрифугирования, а также вибрационного и других способов бетонирования. Стеклопластиковая спиральная арматура представляет собой ленту плоскую или периодического профиля, состоящую из крученых или некрученых стеклянных нитей, склеенных полимерным связующим. Стеклонити, в свою очередь, состоят из 16, 32, 64 и более стеклянных элементарных волокон прочностью на разрыв 1200–1300 МПа, соответствующей примерно прочности стальной проволоки (1800–2000 МПа), и плотностью, в 3,5 раза меньшей плотности проволоки. Известны стеклопластиковые ленты шириной 15–20 мм, толщиной 0,22–0,24 мм из однонаправленных волокон; ленты шириной 16–20 мм, толщиной 0,31–0,35 мм из крученых нитей прочностью на разрыв не менее 1000 МПа и др.

В качестве защитного слоя спиральной стеклопластиковой арматуры используют эпоксидные смолы или их модификации (ЭДФ, БФ-4 и др.), разводимые растворителями.

Стеклопластикобетонные раструбные трубы можно изготавливать диаметром 300–2000 мм, длиной 5–7 м на давления до 1 МПа и выше.

Стеклопластиковую арматуру навивают на специальном станке с приводом вращения сердечника трубы и кареткой, имеющей возвратно-поступательное движение по рельсовому пути при спиральной намотке стеклоленты на бетонный сердечник трубы и натяжную установку для предварительно напряженного армирования.

Изготовленные трубы направляют на участок отверждения полимерного защитного слоя (в течение 5–7 сут), а затем на гидравлическое испытание.

Полимержелезобетонные трубы

Один из видов этих труб – железобетонные трубы, футерованные изнутри тонкостенным цилиндром – чехлом из термопластичных полимеров – полиэтилена, полипропилена, поливинилхлорида, получаемым на машинах методом шнековой экструзии.

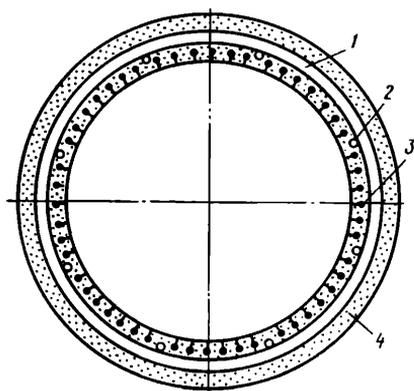


Рис. 90. Полимержелезобетонная труба:

1 — спиральная арматура; 2 — продольная арматура; 3 — профилированная полимерная оболочка; 4 — бетонная стенка

Полимержелезобетонные трубы (рис. 90) сочетают в себе работу трех материалов: бетон воспринимает напряжения сжатия, арматура — растягивающие напряжения, а полимер придает трубе водонепроницаемость, химическую стойкость, износостойкость и другие свойства. Изготавливают их в горизонтальных или вертикальных формах, состоящих из раздвижных сердечников и наружной опалубки. Полимерный чехол надевают на сердечник, устанавливают арматурный каркас, все это помещают в форму (опалубку) и проводят бетонирование с применением вибраторов для уплотнения бетона.

Покрyтия железобетонных труб

Для герметизации и уплотнения стенок железобетонных труб применяют полимерные материалы. Известны следующие способы их нанесения: добавка полимеров в бетонную массу; нанесение пленок и покрытий на стенки труб толщиной не менее 0,5 мм. В НИИЖБ разработан способ уменьшения газопроницаемости труб за счет введения в бетонную массу добавок в виде таких порошкообразных веществ, как пек (с добавками хлористого кальция и хлорного железа), поливинилбутираль, полипропилен, поливинилхлорид, полиэтилен и другие, или водные эмульсии (например, ацетатная). Добавки сначала смешивают с цементом, а затем с заполнителем и, наконец, с водой. Количество добавок составляет 10 % от массы цемента. Метод пропитки труб полимерными веществами основан на использовании эффекта самовакуумирования и искусственного вакуумирования бетона при охлаждении.

Советскими учеными доказано, что при охлаждении горячего бетонного изделия в ванне с полимерным веществом в течение 7 ч при температуре от 80 до 20°С развивается вакуум в пределах 0,0066 — 0,0133 МПа, благодаря чему облегчается пропитка изделия. После пропитки, например, лаком этиноль газопроницаемость бетона уменьшается в 2,1 раза при давлении 1,5 МПа.

В качестве пленочных покрытий применяют термопластичные и терморезактивные полимерные вещества. Например, на поверхности труб укрепляют листовые термопластичные полимерные материалы – полиэтилен, поливинилхлорид, полиизобутилен и др. Наиболее широко для защиты используют различные терморезактивные смолы. Наносят их механическим способом (набрызгиванием, центрифугированием с обогревом) и распылением – пневматическим с помощью сжатого воздуха (с подогревом или без подогрева) или безвоздушным под высоким давлением 4–6 МПа (вихревым, газопламенным). Известны покрытия на основе терморезактивных эпоксидных, полиэфирных и фенольных смол. Исследованы покрытия труб на основе полиэфирной и эпоксидной смол, модифицированных тиоколом, полиамидной смолой и битуминозными веществами. Наилучшие результаты получены с покрытиями из эпоксидно-дегтевых композиций. В качестве наполнителя применяют фарфор, смесь фарфора с трепелом, диабаз, корунд и др.

Более дешевое покрытие – покрытие на основе полиэфирных, фенольных и фенолфурфуролформальдегидных смол.

Технические требования к трубам

Железобетонные трубы поставляют в соответствии со стандартами, инструкциями, техническими условиями. В них устанавливают требования к форме и размерам труб, гладкости внутренней поверхности, водонепроницаемости стенок, трещиностойкости и прочности труб, к основным исходным и вспомогательным материалам, которые необходимы для изготовления труб.

Допускаемые отклонения по длине виброгидропрессованных труб составляют ± 5 мм для $D_y = 500, 600, 800, 1000$ и 1200 мм и ± 6 мм для $D_y = 1400$ и 1600 мм. Толщина защитного слоя бетона с учетом допускаемых отклонений должна быть не менее 15 мм.

Каждую трубу подвергают визуальному контролю и определению нормируемых геометрических размеров и состояния защитного слоя, испытывают на водонепроницаемость и трещиностойкость.

На поверхности труб не допускаются раковины, наплывы и отколы на внутренней поверхности втулочного конца трубы; заусенцы и отколы бетона на заходной фаске раструба; обнажения с торцов трубы спиральной и продольной арматуры, а также разделительной полосы. Не допускается затирка цементным раствором пор, раковин, продольных рисок и выступов в местах расположения уплотнительных резиновых колец. На внутренней поверхности труб могут быть наплывы и отколы глубиной (высотой) не более 5 мм и длиной не более 30 мм.

Испытание на водонепроницаемость проводят с помощью внутрен-

него гидравлического давления до 1,8 МПа для труб класса I, до 1,2 МПа для класса II и до 0,6 МПа для класса III. Трубы класса I, аттестуемые по высшей категории качества, испытывают на водонепроницаемость гидравлическим давлением не менее 2,1 МПа. Считают, что труба выдержала испытание, если на ее поверхности не наблюдается фильтрация воды в виде влажных пятен, капель или течи.

Испытания на трещиностойкость проводят одновременно с испытанием на водонепроницаемость с помощью ультразвукового прибора с цифровой индикацией результатов измерения. При этом на наружную поверхность трубы устанавливают комплект датчиков и создают внутреннее гидравлическое давление, равное 40–50 % от давления, вызывающего трещинообразование. Показания датчиков регистрируют автоматически. Погрешность оценки трещинообразования труб составляет 7–8 %.

23. АСБОЦЕМЕНТНЫЕ ТРУБЫ

Асбоцементные трубы по сравнению со стальными обладают некоторыми преимуществами: они не подвержены почвенной коррозии (т.е. не требуют защитных покрытий) и не разрушаются под воздействием блуждающих токов. Малая водопоглощаемость обеспечивает прочность асбоцементных труб при низких температурах. Стоимость их почти в 2 раза ниже стоимости стальных труб. К недостаткам труб относятся их газопроницаемость, а также хрупкость и небольшая сопротивляемость ударам. Газопроницаемость может быть намного уменьшена за счет совершенствования технологии изготовления асбоцементных труб, а также вследствие применения специальных способов закупорки микропор их стенок.

Асбоцементные трубы диаметром до 1500 мм на давление до 1,5 МПа широко применяют на строительстве водопроводов и канализационных сетей. При определенных условиях изготовления эти трубы могут быть использованы для сооружения газопроводов на давление 0,5 МПа и более.

На основании исследований и опыта эксплуатации асбоцементные трубы рекомендуется использовать для строительства трубопроводов на газовых промыслах, для отводов магистральных газопроводов к промышленным предприятиям и населенным пунктам, а также для городских газовых сетей.

Материал для труб

Асбоцемент — искусственный каменный материал из затвердевшей смеси асбеста и цемента. При изготовлении труб для газопроводов применяют портландцемент. Асбест обладает свойством адсорбиро-

вать цемент на поверхности своих волокон. При перемешивании и уплотнении массы, волокна асбеста переплетаются между собой и образуют в асбоцементном изделии армирующую сетку, что значительно повышает прочность изделия при растяжении и изгибе.

Асбест — минерал, залегающий в виде жил среди некоторых горных пород. Наиболее распространена разновидность асбеста — хризотил-асбест ($3 \text{ MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), представляющий собой гидросиликат магния, состоящий из смеси волокон различной длины и частиц минерала с недеформированными волокнами.

Частицы минерала размером свыше 2 мм условно называют кусковым асбестом, а меньшего размера — иголками. Распушенным называют асбест, в котором волокна под механическим воздействием деформированы и перепутаны между собой.

Тонко распушенные волокна асбеста можно скручивать и ткать. При распушивании их диаметр доходит до 0,5 мкм (0,0005 мм) и практически составляет 30–40 мкм. Прочность асбеста после распушивания доходит до 2,7 МПа. Прочность недеформированного хризотил-асбеста составляет 2850–3650 МПа, т.е. примерно в 1000–1500 раз больше, чем распушенного. Длина волокна может составлять доли

Таблица 25. Марки асбеста

Сорт	Группа по степени распушивания			
	жесткая	промежуточная	полужесткая	мягкая
0	АК, ДВ-0-80, ДВ-0-55	—	—	—
1	Ж-1-50, Ж-1-38	ПРЖ-1-75, ПРЖ-1-50	—	—
2	Ж-2-20	ПРЖ-2-30, ПРЖ-2-15	П.2-30, П.2-15	—
3	Ж-3-40	—	П.3-70, П.3-60, П.3-50	М3-70, М3-60
4	—	—	П.4-40, П.4-30, П.4-20, П.4-5	М4-40, М4-30, М4-20, М4-5
5	—	—	П.5-67, П.5-65, П.5-52, П.5-50	М5-65, М5-50
6	—	—	П.6-45, П.6-30	М6-40, М6-30, К6-30, К6-20, К6-5
7	—	—	—	7-300, 7-370, 7-450, 7-520

Примечание. В марке асбеста цифры означают: первая — сорт, вторая — гарантированный минимальный осадок волокна (в %) на основном просеивающем сите, а для сорта 7 — объемную массу.

миллиметров и доходить до 40 мм. Чем длиннее волокно, тем выше сорт асбеста.

В зависимости от длины волокна и содержания мелких частиц и пыли асбест подразделяется на восемь сортов: 0,1 и 2 — высшие, более дефицитные с волокнами наибольшей длины, применяемые в текстильной промышленности; 3–6, используемые для производства асбоцементных изделий; 7 — более низкий с очень короткими волокнами (в основном короче 1 мм), имеющий более низкие армирующие свойства, поэтому его в производстве асбоцементных изделий не применяют.

Асбест в зависимости от текстуры, характеризующейся степенью сохранности частиц минерала после распушивания, подразделяется на три группы: жесткую (Ж), в которой преобладают иголки; промежуточную (ПРЖ); полужесткую (П), примерно с равным количеством иголок и распушенного волокна; мягкую (М) — с преобладающим количеством распушенного волокна и мягкую (К), представляющую собой осадок пылеочистительных сооружений; буквами АК обозначают кусковой асбест, а ДВ — длиноволокнистый (табл. 25).

Для асбоцементных труб применяют асбест полужесткой текстуры марок П.3, П.4 и П.5.

Изготовление труб

Асбоцементные трубы изготовляют на специальных машинах с формовочным валом, наружный диаметр которого примерно равен внутреннему диаметру трубы, в следующей технологической последовательности. Сначала распушивают асбест на бегунах. Распушенный асбест тщательно смешивают с водой, а затем с цементирующим веществом до получения гомогенной массы, в которую вводят дополнительное количество воды для получения асбоцементной суспензии. Соотношение массы сухого вещества и воды составляют 1 : 4,5. Иногда в смесь добавляют небольшие количества окрашивающих асбоцементную массу пигментов, уплотняющих, пластифицирующих, гидрофобизирующих и других добавок.

Формование труб проводят навивкой тонких слоев асбоцементной массы на формовочный вал с удалением большей части содержащейся в ней воды. Асбоцементная суспензия подается через мешалку в ванную трубоформовочной машины (рис. 91), в которой расположен сетчатый цилиндр 15, погруженный в суспензию примерно на 0,7 его диаметра. Цилиндр приводится во вращение от сукна 9, прижимаемого к нему с помощью прижимного вала 10, натягивающего сукно через систему различных валков. Вращая сетчатый цилиндр, сукно снимает с его поверхности первичный слой асбоцемента. При этом волокна асбеста вместе с покрывающими их зернами цемента ориентируются в первичном слое

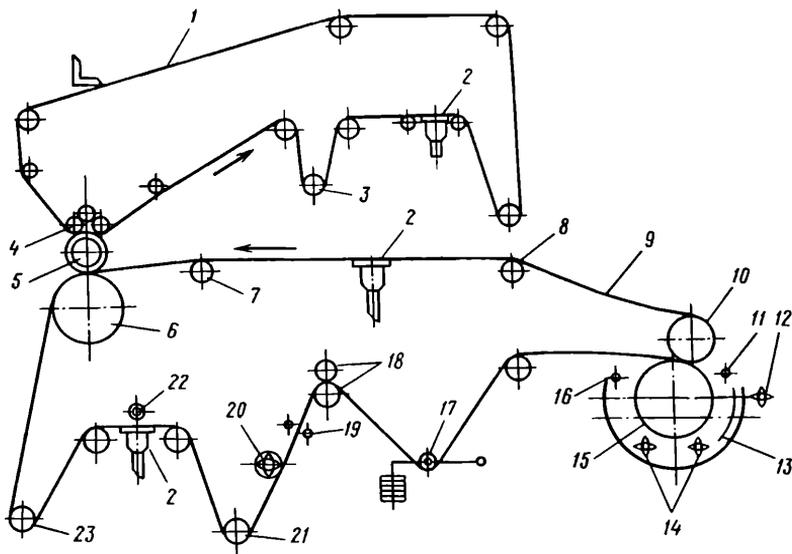


Рис. 91. Схема машины для формирования асбоцементных труб:

1 – верхнее сукно; 2 – вакуумная коробка; 3 и 23 – натяжные валки; 4 – прес-сушащие валки; 5 – формующий вал (форматная скалка); 6 – опорный вал; 7 – валки, выравнивающие отклонение хода сукна; 8 – поддерживающий валки; 9 – рабочее сукно; 10 – вал; 11 и 16 – промывочные трубки, промывающие сетчатый цилиндр соответственно во время работы и при остановке машины; 12 – мешалка, подающая асбосуспезию в ванну; 13 – перегородка, предотвращающая смывание слоя асбоцемента с сетчатого цилиндра при подаче мешалкой асбосуспезии в ванну; 14 – лопастные мешалки для перемешивания асбосуспезии в ванне; 15 – сетчатый цилиндр; 17 – натяжной качающийся валки; 18 – отжимные валки; 19 и 22 – промывочные трубки; 20 – сукноочиститель (сукнобойки); 21 – установочный валки

преимущественно линейно, по направлению движения сетчатого цилиндра, что обеспечивает достаточно высокий коэффициент использования волокна, а следовательно, и достаточную прочность трубы. На прочность трубы влияют также однородность распределения отфильтрованных на поверхности сетчатого цилиндра первичных слоев асбоцемента по плотности и качество вяжущего цемента, толщина первичного слоя асбоцемента, а также скорость движения сукна.

Первичный слой асбоцемента, снятый сукном с поверхности сетчатого цилиндра, представляет собой рыхлую водонасыщенную массу. Давлением вала 10, прижимающего сукно к сетчатому цилиндру, понижают влагосодержание слоя асбоцемента. Для этой цели установлена также вакуумная коробка 2, отсасывающая воду из асбоцемента по пути движения сукна.

Первичный слой асбоцемента передается далее на формующий вал (форматную скалку) 5, длина которого равна длине формируемой трубы. Формующий вал подхватывает первичный слой асбоцемента и навивает его постепенно при вращении на свою поверхность. При этом слой асбоцемента уплотняется давлением ведущего (опорного) вала 6 снизу и прессующими валиками (экипажем) 4 сверху, так что вода и воздух уходят из асбоцемента в поры перемещающегося сукна. В результате этого влагосодержание асбоцемента уменьшается до 25–30 %. Скорость движения сукна составляет в среднем 15–20 м/мин, а толщина первичных слоев – около 0,16–0,2 мм. После отдачи слоя асбоцемента форматной скалке рабочее сукно, обогнув опорный вал, направляется вниз через натяжной валик 23 к промывочному устройству для очистки от остатков асбоцемента. Промывочное устройство состоит из промывочных трубок 19 и 22, вакуумной коробки 2, сукноочистителя 20 и отжимных валиков 18 для отжатия излишней воды. Промытое сукно, обогнув установочный валик 21 и пройдя натяжной качающийся валик 17, вновь направляется к сетчатому цилиндру 15. Верхнее сукно, служащее для предотвращения перехода слоя асбоцемента на прессующий валик, делает петлю, начиная от них и охватывая натяжной валик 3, через направляющие валики и вакуумную коробку 2 попадает на регулировочный валик, устраняющий боковые отклонения сукна, и снова подходит к формующему узлу машины.

Когда толщина стенок трубы достигнет проектного размера, формование заканчивают и асбоцементную трубу подают вместе со скалкой на развальцовку в специальную машину-каландр. Затем трубу освобождают от скалки и подают на конвейер твердения при нормальной температуре. В трубы диаметром свыше 300 мм на период твердения вводят деревянный сердечник. На конвейере твердения асбоцементные трубы находятся в течение 6–8 ч, где им придают вращательное движение, что обеспечивает трубам цилиндрическую форму.

Следующий этап твердения труб осуществляют в течение 2–3 сут в теплой ванне при температуре 40–50°С, что исключает усадку асбоцемента. Далее трубы идут на механическую обработку для обрезки и обточки их концов на токарных станках. Окончательное твердение труб происходит на утепленном складе готовой продукции в течение 14 сут. Гидравлическое испытание труб проводят на стендах.

Отечественная промышленность выпускает водопроводные асбоцементные трубы диаметром 100–500 мм следующих классов: ВТ-6; ВТ-9; ВТ-12; ВТ-15 и давления соответственно 0,6; 0,9; 1,2; 1,5 МПа, длиной до 6 м. Эти трубы, предназначенные для водопроводных сетей, имеют главный недостаток – высокую газопроницаемость, поэтому для магистральных трубопроводов их не применяют (за исключением отдельных случаев). Трубы поставляют в комплекте со специальными соединительными асбоцементными муфтами.

Трубы для газопроводов

Для сооружения газопроводов асбоцементные трубы изготавливают по усовершенствованной технологии в соответствии с требованиями, предъявляемыми к газопроводным трубам. Основное из них – газонепроницаемость.

Наиболее простой способ понижения газопроницаемости труб (почти до нуля) – пропитка их водой, которая закупоривает микропоры, препятствуя диффузии газа через стенки асбоцементных труб при эксплуатации, т.е. внутреннему давлению газа противодействует сила поверхностного натяжения воды в капиллярах асбоцемента. Для пропитки асбоцементные трубы при положительной температуре заполняют обычной водопроводной водой без вредных примесей на 2 сут под давлением, равным испытательному давлению трубопроводов на прочность.

Уменьшения газопроницаемости асбоцементных труб достигают также пропиткой их парафинистой массой, являющейся отходом при добыче нефти. Парафинистая масса имеет различный состав в зависимости от месторождения нефти. Так, на Гуймазинских нефтепромыслах она содержит 50 % парафина, 30 % нефтяных смолистых остатков, 15 % нефтяных кислот и воды, 5 % механических примесей. Недостаток способа пропитки парафинистыми остатками заключается в необходимости очистки концов труб от парафинистой массы при монтаже стыков труб на муфтах, что приводит к локальной утечке газов (кроме того, наблюдается также незначительная утечка газа через стенки труб).

Уменьшить газопроницаемость асбоцементных труб можно обработкой углекислым газом. При этом стенки труб уплотняются за счет образования пленок карбонатов кальция и магния вокруг частиц $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и $\text{Mg}(\text{OH})_2$ или CaO и MgO , содержащихся в асбоцементе, по реакции



Углекислый газ подают вовнутрь трубы при давлении 0,2–0,6 МПа в течение длительного времени. Газопроницаемость труб этим способом полностью не устраняется.

Наиболее эффективны пленочные покрытия, которые наносят только на наружную поверхность асбоцементных труб или на обе поверхности. В качестве пленок используют лакокрасочные покрытия и покрытия на основе синтетических смол без растворителей: фенолформальдегидных, эпоксидных, полиэфирных и др. Известные лакокрасочные покрытия практически газонепроницаемы. Недостаток лакокрасочных покрытий – многослойность (3–6 слоев) и использование летучих растворителей, являющихся огнеопасными, токсичными и дорогостоящими.

Во Всесоюзном научно-исследовательском и проектном институте по разработке газопромыслового оборудования (ВНИПИгаздобыча) получены покрытия на основе синтетических смол. Асбоцементные трубы с защитным покрытием из резольной фенолформальдегидной смолы практически газонепроницаемы при давлениях 0,7 МПа и выше. Причем для увеличения толщины защитной пленки, повышения ее механических свойств в смолу рекомендуется вводить наполнитель в виде тонкомолотого порошка глины, песка, древесной муки, талька или их сочетания. При этом достигается высокая газонепроницаемость и снижается стоимость покрытия.

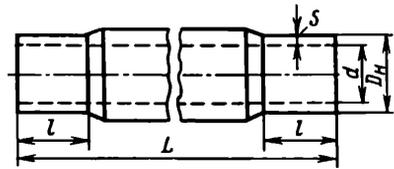
Последовательность технологических операций при нанесении покрытия на трубы следующая: механическая очистка труб щеткой, обдувание струей воздуха под давлением 0,3–0,5 МПа, химическая очистка труб в ванне (с разбавленной водой соляной кислотой 1 : 10) с протиркой щетками, промывание проточной водой, сушка на стеллажах, нанесение покрытия на основе синтетической смолы в смеси с наполнителем, сушка обработанных труб, термическая обработка труб для отверждения смолы. Далее проводят испытание на газонепроницаемость и через сутки после испытания трубы отправляют на склад.

Более высокую газонепроницаемость обеспечивают асбоцементным трубам покрытия на основе термореактивных смол холодного отверждения: эпоксидные, полиэфирные и др. Во ВНИПИгаздобыче разработано и исследовано покрытие для внутренней поверхности труб, получаемое на основе ненасыщенной полиэфирной смолы марки ПН-1 с наполнителем из песка или смеси песка с графитом.

Благодаря однослойному полиэфирному покрытию, нанесенному толщиной 1,25–1,5 мм на водопроводные асбоцементные трубы, обеспечивается их газонепроницаемость при давлении до 0,5 МПа, а при двухслойном покрытии – при давлении до 0,7–1 МПа. Оно имеет высокую механическую прочность, истираемость, стойкость к агрессивным средам, бензину, природным и сжиженным газам, но обладает недостаточной стойкостью к длительному воздействию слабоминерализованной воды. Поэтому в состав покрытия вводят специальные добавки, повышающие его водостойкость.

Наиболее эффективный метод нанесения полиэфирного покрытия на сухую внутреннюю поверхность труб – центробежный метод, при котором полимерный состав, заливаемый вовнутрь трубы, распределяется равномерным слоем на поверхности в процессе вращения трубы со скоростью 450–500 об/мин в течение 1–2 мин и при этом уплотняется. Создана заводская установка для нанесения полиэфирного покрытия труб этим методом. Перед нанесением покрытия трубы очищают металлическими щетками, а затем продувают сжатым воздухом при давлении 0,6 МПа. Отверждение покрытия после нанесения осуществляется на стеллажах при комнатной температуре.

Рис. 92. Асбоцементная труба с обточенными концами



Известны покрытия и на основе других синтетических смол.

Газонепроницаемые асбоцементные трубы ГАЗ-НД и ГАЗ-СД разработаны на внутреннее давление 0,005 и 0,3 МПа диаметром условных проходов 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 мм. Предназначаются они для подземных газовых сетей, транспортирующих природные, нефтяные и другие углеводородные газы. По соглашению допускается применять асбоцементные трубы ГАЗ-СД для газопроводов, работающих на давлении до 0,5 МПа.

Асбоцементные трубы изготовляют длиной $L = 2950, 3950$ и 6000 мм с обточенными концами на длине $l = 200$ мм с плавным переходом к необточенной части (рис. 92). Трубы ГАЗ-НД имеют следующие размеры на концах согласно временным межреспубликанским техническим условиям: внутренний диаметр трубы $d = 96 \div 456$ мм; наружный диаметр трубы $D_{\text{н}} = 122 \div 528$ мм; толщина стенки $s = 13 \div 43,5$ мм. Отклонения по толщине стенки составляют: $\pm 1,5$ и $-2,0$ мм для труб условным проходом 100 и 150 мм; $+1,5$ и $-2,5$ мм для труб условным проходом 200–350 мм; $+3$ и -4 мм для труб условным проходом 400 и 450 мм. Отклонения по наружному диаметру обточенных концов $D_{\text{н}}$ составляют $-1,6$ мм для труб условным проходом 100 и 150 мм, -2 мм для труб условным проходом 200–350 мм и $-2,5$ мм для труб условным проходом 400 и 450 мм; отклонения по длине труб $-+5$ и -50 мм.

Изготавливают асбоцементные трубы из цемента марок не ниже 400 (88 %) и асбеста марок П.3 и П.4 (12 %).

Для повышения плотности стенок намотку асбоцементных газопроводных труб осуществляют более тонкими слоями, чем при обычной технологии производства; разностенность и овальность их незначительны.

Асбоцементные трубы в газопроводах соединяют чугунными муфтами типа "Жибо" Газопроницаемость труб зависит от вида стыковых соединений, а также от их размеров и внутреннего давления. Усовершенствование технологии изготовления труб и конструкций соединительных муфт, использование различных методов снижения их газопроницаемости в сочетании с низкой стоимостью и простотой их производства создают реальные перспективы сооружения газопроводов из асбоцементных труб на давления до 1 МПа.

Технические требования, предъявляемые к трубам

Форма, размеры и допускаемые отклонения на размеры асбоцементных труб должны соответствовать техническим условиям. Отклонения от размеров наружного диаметра обточенных концов в сторону увеличения не допускаются. Асбоцементные трубы соединяют при помощи чугунных фланцевых и асбоцементных муфт. Концы труб должны быть чисто обрезаны перпендикулярно к оси и не должны иметь обломов и расслоений. На наружной поверхности обточенных концов труб не допускаются царапины и каверны. На наружной необработанной поверхности труб могут быть царапины и каверны глубиной не более 1 мм.

Каждую асбоцементную трубу проверяют пробным гидравлическим давлением на специальной установке. Давление воды поднимают до испытательного в течение 1 мин и поддерживают в течение 3 мин. Если в течение этого времени под давлением воды труба не разрушается и на ее поверхности не образуются потемнения, пятна или капельки воды (росы), то труба считается выдержавшей испытание на прочность и водопроницаемость. Испытательное гидравлическое давление равно 1,8 МПа для труб марки ГАЗ-НД и 2,4 МПа для труб марки ГАЗ-СД.

Газонепроницаемость стенок труб косвенно характеризуется их плотностью, которая для труб длиной 3 и 4 м должна равняться $1,7 \text{ г/см}^3$, а для труб длиной 6 м – не менее $1,8 \text{ г/см}^3$. Чем выше плотность труб, тем меньше их пористость и газопроницаемость.

Давление при гидравлическом испытании принимают в 2–2,5 раза выше рабочего давления. Прочностные характеристики асбоцементных труб контролируют внутренним гидростатическим давлением на разрыв их стенок. При этом трубы должны выдерживать давление, превышающее рабочее в 3–4 раза в зависимости от класса, их диаметра и категории качества.

Разрывное напряжение σ_p определяют по формуле

$$\sigma_p = [p(d + s)] / 2s, \quad (12)$$

где p – внутреннее давление воды; d – внутренний диаметр трубы; s – толщина стенки трубы.

Кроме того, асбоцементные трубы проверяют на раздавливание и поперечный изгиб. На раздавливание испытывают на прессе трубный образец длиной 200 мм. Напряжение при раздавливании

$$\sigma_{\text{разд}} = 0,955 [p_{\text{п}}(d + s)] / ls^2, \quad (13)$$

где $p_{\text{п}}$ – усилие, развиваемое прессом; l – длина образца.

На поперечный изгиб испытывают целые трубы или отрезки длиной 2200 мм, пролетом 1000 мм на испытательной машине сосредоточенной нагрузкой p_c , расположенной посередине пролета.

Предел прочности при изгибе

$$\sigma_{\text{изг}} = 2,547 [p_c l (d + 2s)] / [(d + 2s)^4 - d^4] \quad (14)$$

Образцы труб испытывают в водонасыщенном состоянии. Число испытываемых образцов, отбираемых от партии в зависимости от диаметра, колеблется от 3 до 10.

В стенках труб по расчетам $\sigma_p = 15 \div 25$ МПа, $\sigma_{\text{разд}} = 50 \div 55$ МПа, $\sigma_{\text{изг}} = 30 \div 50$ МПа. Особенно высокий предел прочности труб наблюдается при испытании на продольное сжатие $60 \div 65$ МПа и продольное растяжение $15 \div 16$ МПа. Модуль упругости при испытании на раздавливание равен $(2,8 - 3,0) \cdot 10^4$ МПа.

Асбоцементные трубы для строительства газонефтепроводов подвергают контролю по показателям прочности и плотности (20–25 % от общего числа труб, предназначенных для прокладки) не ранее чем на 14-й день после их формования. Проводят также выборочное пневматическое испытание.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. На какие виды делятся стальные трубы по способу изготовления?
2. По каким группам поставляют стальные трубы в зависимости от назначения и гарантируемых характеристик?
3. Какие основные технические требования предъявляют к стальным трубам для газонефтепроводов?
4. По какой характеристике стальные трубы для газонефтепроводов подразделяют на классы прочности?
5. Какие виды и марки стали применяют для газонефтепроводов?
6. Какого способа изготовления и из какого вида чугуна трубы являются перспективными для газонефтепроводов? На какие давления?
7. Назовите основные достоинства и недостатки чугунных труб
8. Охарактеризуйте перспективы применения алюминиевых труб, исходя из особенностей их свойств.
9. Какими достоинствами и недостатками обладают пластмассовые трубы?
10. По каким признакам и на какие виды классифицируются пластмассовые трубы?
11. Охарактеризуйте наиболее перспективные для газонефтепроводов виды пластмассовых труб.
12. Какими достоинствами и недостатками обладают железобетонные трубы? Перспективы их применения для газонефтепроводов? На какие давления?
13. Какими достоинствами и недостатками обладают асбоцементные трубы? Перспективы их применения для газонефтепроводов? На какие давления?

Глава 5. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЗАПОРНОЙ И РЕГУЛИРУЮЩЕЙ АРМАТУРЫ

На газонефтепроводах, резервуарах и других конструкциях устанавливают арматуру различного назначения: задвижки и вентили, служащие в качестве герметичного запорного устройства; краны, являющиеся герметичными затворами и переключающими органами; предохранительные клапаны для предотвращения аварийных условий в случае чрезмерного повышения давления; клапаны обратные поворотные для предотвращения обратного потока среды в трубопроводах; дыхательные клапаны для поддержания в резервуарах определенного давления и т.д. По конструкции, размерам и рабочим условиям эксплуатации эта арматура очень разнообразна.

Наиболее важные параметры рабочих условий эксплуатации арматуры — давление, температура и коррозионная активность продуктов, хранимых в резервуарах, сред, транспортируемых по трубопроводам, и других конструкций, на которых ее устанавливают.

По условным давлениям p_y арматуру подразделяют на шесть групп: 1 — высокого и сверхвысокого вакуума для абсолютных давлений ниже 0,1 Па; 2 — низкого и среднего вакуума для абсолютных давлений от 0,1 до 0,1 МПа; 3 — малых давлений до 1,6 МПа; 4 — средних давлений от 2,5 до 10 МПа; 5 — высоких давлений от 16 до 80 МПа; 6 — сверхвысоких давлений от 100 МПа и выше.

Под условным давлением p_y понимают наибольшее избыточное рабочее давление при температуре 20 °С, при котором обеспечивается длительная и безопасная работа арматуры и соединительных частей трубопроводов (тройников, переходов, фланцев и др.), резервуаров и других конструкций.

Под рабочим давлением p_p понимают наибольшее избыточное давление, при котором обеспечивается длительная работа арматуры и соединительных деталей трубопроводов, резервуаров и других конструкций при рабочей температуре транспортируемой или хранимой среды. Причем рабочие давления равны условным для арматуры из углеродистой стали при температуре рабочей среды $T_p = 0 \div 200$ °С; для арматуры из чугуна, бронзы или латуни при $T_p = 0 \div 120$ °С.

По температурному режиму арматуру подразделяют на пять категорий:

1 — обычная арматура из низкоуглеродистой стали для температур до 425 °С, из ковкого чугуна — до 300 °С, из серого чугуна — до 225 °С, для деталей арматуры малого размера и неответственного назначения

допускается применение углеродистых сталей для температуры до 450 °С, ковкого чугуна – до 400 °С, серого чугуна – до 300 °С. Для ответственных объектов (магистральных газопроводов) для температур ниже –30 °С применяют арматуру из легированной стали, специальных сплавов или латуни и бронзы с ударной вязкостью не менее 20 Дж/см²;

2 – арматура для высоких температур 450–600 °С из специальных сталей;

3 – жаропрочная арматура для температур свыше 600 °С;

4 – арматура для холодильной техники до температур –153 °С;

5 – криогенная арматура для глубокого холода до температур ниже –153 °С.

Поэтому к материалу для арматуры предъявляют комплекс требований, основные из которых – высокая прочность, выносливость, пластичность и полная герметичность, обеспечивающие способность выдерживать давления среды при эксплуатации и гидравлических испытаниях. Материал для арматуры также не должен обладать склонностью к хрупкому разрушению, старению, должен быть коррозионно-устойчивым, технологичным в изготовлении и иметь минимальную стоимость.

Материалы для деталей арматуры выбирают по рабочим условиям эксплуатации с учетом этих и дополнительных требований, зависящих от их назначения, конструктивных особенностей и размеров. Основным материалом для изготовления корпусов, крышек, стоек, маховиков и других деталей служат стальное и чугунное литье, поковки из углеродистой и легированной стали, а также горячекатаная сталь углеродистая обыкновенного качества, углеродистая конструкционная качественная и ряд марок низколегированной и легированной сталей. Кроме этих материалов для изготовления золотников, седел, клапанов, вкладышей и втулок сальников и других деталей применяют латунь и бронзу, а также прокладочные и уплотнительные материалы (набивки сальников). Уплотнительные поверхности арматуры в ряде случаев наплавляют твердыми сплавами для повышения их износостойкости. Для изготовления отдельных деталей арматуры в последние годы стали широко применять полимерные материалы.

24. СТАЛЬНЫЕ ОТЛИВКИ

Отливки деталей арматуры различного вида (корпус, крышки, стойки и др.) изготавливают из стали углеродистой конструкционной качественной марок: 15Л, 20Л, 25Л, 30Л, 35Л, 45Л (Л – литая сталь, двузначные цифры – среднее содержание углерода в сотых долях процента) (табл. 26), а также из легированной конструкционной стали.

В зависимости от качества стальные отливки подразделяют на три группы:

I – отливки общего назначения, у которых контролируют хими-

Т а б л и ц а 26. Механические свойства отливок из углеродистой стали в термообработанном состоянии

Марка стали	Предел текучести σ_T , МПа, не менее	Временное сопротивление σ_B , МПа, не менее	Относительное удлинение δ , %, не менее	Относительное поперечное сужение ψ , %, не менее	Ударная вязкость КСЧ, Дж/см ² , не менее
15Л	200	400	24	35	50
20Л	220	420	22	35	50
25Л	240	450	19	30	40
30Л	260	480	17	30	35
35Л	280	500	15	25	35
45Л	320	550	12	20	30

Т а б л и ц а 27. Механические свойства отливок из легированной стали

Марка стали	Предел текучести σ_T , МПа	Временное сопротивление σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное поперечное сужение ψ , %	Ударная вязкость КСЧ, Дж/см ²
20ХЛ	250	450	18	30	60
20ХМЛ	250	450	18	30	30
20Х5ТЛ	400	600	16	30	40
20Х5МЛ	400	600	16	30	40
08ГДНФЛ	350	450	18	30	50

ческий состав материала, размеры и внешний вид; они предназначены для деталей, не несущих нагрузки; их размеры определяют по конструктивным или технологическим соображениям;

II — отливки ответственного назначения, у которых контролируют те же показатели, что и у отливок группы I, и, кроме того, механические свойства стали (σ_B или σ_T и δ); они предназначены для деталей, работающих при статических нагрузках, рассчитываемых на прочность;

III — отливки особо ответственные, предназначенные для деталей, работающих при циклических динамических и ударных нагрузках, рассчитываемых на прочность. Кроме испытаний, обязательных для групп I и II, отливки группы III должны иметь гарантированную ударную вязкость.

Отливки, как правило, подвергают термической обработке, за исключением отливок группы I. Необходимые механические свойства отливки приобретают после окончательной термической обработки, состоящей из нормализации и отпуска или закалки и отпуска. Широкое приме-

нение имеют отливки из стали марки 25Л-II для ответственных деталей арматуры. В случаях необходимости гарантирования ударной вязкости применяют отливки из стали марки 25Л-III.

Отливки из углеродистой стали группы I марок 15Л, 20Л, 25Л применяют при температуре от -15 до 400 °С и групп II и III марок 20Л, 25Л, 30Л, 35Л - от -40 до 450 °С и любых давлениях. При температуре от -50 до 450 °С используют отливки из легированной стали марок 20ХЛ, от -40 до 500 °С - 20ХМЛ; от -40 до 550 °С - 20Х5ТЛ и 20Х5МЛ, от -60 до 350 °С - 08ГДНФЛ и др. (табл. 27).

25. СТАЛЬНЫЕ ПОКОВКИ

Поковки деталей арматуры изготовляют из углеродистой, низколегированной и легированной сталей по пяти группам в зависимости от условий работы и предъявляемых требований (табл. 28). Поставляют их диаметром (толщиной) до 800 мм, производят свободной ковкой или штамповкой.

По механическим свойствам поковки после окончательной термической обработки подразделяют на категории прочности КП 18, КП 20, КП 22, КП 25, КП 28, КП 32, КП 35, КП 40, КП 45, КП 55, КП 60, КП 65, КП 70, КП 75, КП 80. Буквы КП означают: "категория прочности",

Т а б л и ц а 28. Группы стальных поковок в зависимости от вида и объема испытаний

Группа поковок	Вид испытаний	Условия поставки партии поковок	Объем испытаний при сдаче поковок
I	Без испытания	Одной марки стали	
II	На твердость	То же, прошедших термическую обработку	Твердость у 5 % от партии, но не менее 5 поковок
III	То же	То же, прошедших термическую обработку по одному режиму	Твердость у 100 %
IV	На твердость, растяжение и ударную вязкость	Одной плавки стали, совместно прошедших термическую обработку	Предел текучести, относительное сужение у 2 поковок от партии (партия 100 поковок); ударная вязкость у 100 %
V	То же	Индивидуально принимать каждую поковку	Предел текучести, относительное сужение и ударная вязкость у 100 %

Таблица 29. Механические свойства поковок из углеродистых и легированных сталей диаметром (толщиной) до 300 мм

Категория прочности	Предел текучести σ_T , МПа, не более	Временное сопротивление σ_B , МПа, не более	в зависимости от диаметра (толщины) поковки сплошного сечения, мм						Твердость НВ (на поверхности поковки)
			Относительное удлинение δ , %		Поперечное сужение ψ , %		Ударная вязкость КСЧ, Дж/см ²		
			до 100	100—300	до 100	100—300	до 100	100—300	
КП 18	180	360	28	24	55	50	65	60	101—143
КП 20	200	400	26	23	55	50	60	55	111—156
КП 22	220	440	24	20	53	48	55	50	123—167
КП 25	250	480	22	19	48	42	50	40	143—179
КП 28	280	540	20	17	40	38	45	35	156—197
КП 32	320	580	17	14	38	35	40	35	167—207
КП 35	350	600	18	17	45	40	60	55	174—217
КП 40	400	630	17	15	45	40	60	55	187—229
КП 45	450	650	16	14	45	40	60	55	197—235
КП 50	500	670	16	13	45	40	60	55	212—248
КП 55	550	700	15	13	45	40	60	50	223—262
КП 60	600	750	14	13	45	40	60	50	235—277
КП 65	650	800	13	12	42	38	60	50	248—293
КП 70	700	850	13	12	42	38	60	50	262—311
КП 75	750	900	13	12	40	35	60	50	277—321
КП 80	800	950	12	11	40	35	60	50	293—331

двухзначные цифры — предел текучести (180, 200 и т.д. в МПа) (табл. 29).

Рекомендуемые для поковок по категориям прочности марки углеродистых и легированных сталей приведены в табл. 30.

Рабочие условия эксплуатации арматуры из наиболее распространенных марок стали следующие:

Марка стали... ВСт5сп2 15; 20 10Г2 20Х 15ХМ 15Х5М, 15Х5ВФ

Допускаемая температура стенки арматуры, °С... -20-400 -30-450 -70-450 -40-450 -40-540 -40-600

Т а б л и ц а 30. Марка стали для поковок диаметром (толщиной) до 100 мм в зависимости от требуемой категории прочности

Категория прочности	Марка стали
КП 18	Ст3 [*] ; 15 [*] ; 20 [*] ; 25 [*]
КП 20	Ст3 [*] ; Ст3Гсп [*] ; 15 [*] ; 20 [*] ; 25 [*] ; 15Х; 20Х; 15ХМ [*]
КП 22	20 [*] ; 25 [*] ; 10Г2 [*] ; 20Х [*] ; 15ХМ [*] ; 12Х1МФ [*]
КП 25	20 [*] ; 30 [*] ; 35 [*] ; 20ГС [*] ; 20Х [*] ; Ст5 [*] ; 12ХМ [*] ; 15ХМ [*]
КП 28	35 [*] ; 40 [*] ; 45 [*] ; 25ГС [*] ; 50 [*]
КП 32	35 [*] ; 45 [*] ; 50 [*] ; 40Х [*] ; 45Х [*] ; 15ХМ [*] ; 50Г2 [*] ; 35ХМ [*]
КП 35	40; 45; 15Х; 40Х [*] ; 50Г2 [*] ; 45Х [*] ; 50Х [*] ; 15ХМ [*] ; 35ХМ [*] ; 38ХГН [*]
КП 40	45; 30Х; 40Х; 50Г2 [*] ; 15ХМ; 30ХМА; 40ХН; 30ХГС [*] ; 34ХН1М [*]
КП 45	40Х; 35ХМ; 40ХН; 38ХГН; 25Х1МФ [*] ; 34ХН1М; 30ХМА; 15ХМ
КП 50	55; 55Х; 35Х; 40Х; 45Х; 15ХМ; 35ХМ; 30ХГСА; 30ХМА; 38ХМ; 38ХГН; 40ХН; 25Х1МФ
КП 55	40ХН; 38ХС; 40ХФА; 38ХГН; 34ХН1М; 25Х1МФ; 30ХГСА
КП 60	45Х; 35ХС; 38ХГ; 35ХГСА; 36ХМ; 40ХН; 45ХН; 38ХГН; 20ХН3А; 25Х1МФ; 30ХГСА
КП 65	45Х; 50Х; 45ХН; 30ХГСА; 35ХГСА; 34ХН1М
КП 70	30ХГТ; 30ХГСА; 20ХН3А; 30Х1М1Ф1ТР; 25Х2МФ [*] ; 34ХН1М; 34ХН3М [*]
КП 75	34ХН1М; 34ХН3М [*] ; 40ХН2МА; 40Х2Н2МА; 38Х2Н2МА
КП 80	18Х2Н4НА; 34ХН3МА; 38Х2Н2МА; 38ХН3МФА [*] ; 40ХН2МА
Примечание.	Все поковки проходят закалку и отпуск.

* Поковки проходят нормализацию.

Давление среды в арматуре из стали марки ВСт5сп2 допускается до 5 МПа, для остальных марок стали — не ограничивается.

26. СТАЛЬ ДЛЯ АРМАТУРЫ

Для деталей арматуры применяют углеродистые стали обыкновенного качества (см. табл. 5) и углеродистые качественные конструкционные (см. табл. 7). Для ответственной и особо ответственной арматуры используют низколегированную и легированную конструкционные (табл. 31).

27. ЧУГУННОЕ ЛИТЬЕ

Чугун широко применяют для изготовления различных деталей трубопроводной арматуры и резервуарного оборудования: корпуса и пробки кранов трубопроводов, корпуса и крышки конденсационных горш-

Т а б л и ц а 31. Механические свойства низколегированной и легированной конструкционных сталей

Марка стали	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²
20Х	650	800	11	40	60
40Х	800	1000	10	45	60
10Г2*	250	430	22	50	—
09Г2С**	280	450	21	—	60
10ХСНД**	400	520	19	—	—
08ГДНФ	450	550	20	45	40
15ХМ*	280	450	21	55	120
30ХМА	750	950	12	50	90
35ХМ	850	950	12	45	80
40ХФА	750	900	10	50	90
38Х2МЮА	850	1000	14	50	90
12Х1МФ	260	480	21	55	100
25Х1МФ	750	900	14	50	60
20Х2МА*	450	600	16	45	70
40ХН2МА	850	1000	12	55	100
20ХН3А	750	950	12	55	110
38ХН3МФА	1100	1200	12	50	80
18Х2Н4МА	850	1150	12	55	100
18Х3МВ	450	650	18	—	120
20Х3МВФ	750	900	12	40	60

Примечание. Механические свойства сталей приведены для образцов в термически обработанном виде (закалка + отпуск).

* Нормализация + отпуск.

** В состоянии поставки.

ков, корпуса огневых предохранителей резервуаров и т.д. Он обладает способностью поглощать вибрации и выравнять напряжения. Его работоспособность практически не зависит от степени чистоты поверхности отливок, наличия надрезов на ней и т.п. Кроме того, чугуны отливки имеют невысокую стоимость, хорошие технологические и высокие механические свойства.

Чугуны классифицируются главным образом по химическому составу и микроструктуре.

По химическому составу чугуны делятся на нелегированные и легированные. Нелегированным называется чугун, в котором кроме углерода содержится (в %) до 4 Si, до 2 Mn, до 1–1,2 P, до 0,18–0,2 S. Легированным называется чугун, в котором содержатся кремний или марганец выше указанных пределов или специально введенные легирующие примеси — хром, никель, медь, молибден и др.

По структуре чугуны делятся на белые, серые, ковкие высокопрочные

Таблица 32. Механические свойства отливок из серого чугуна

Марка чугуна	Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	Предел прочности при изгибе, МПа, не менее	Твердость HB
СЧ10	98	274	143–229
СЧ15	147	314	163–229
СЧ20	196	392	170–241
СЧ25	245	451	180–250
СЧ30	294	490	181–255
СЧ35	343	539	197–269
СЧ40	392	588	207–285
СЧ45	441	637	229–289

с шаровидным графитом. Свойства чугуна определяются структурой его металлической основы и характером включений углерода (в виде цемента или графита). Одновременным изменением структуры металлической основы и формы графитных включений, а также введением легирующих элементов получены чугуны, по свойствам почти равноценные стальному литью, поковкам.

Белый чугун содержит углерод в виде цемента и имеет белый лущистый вид излома. Такой чугун отличается высокой твердостью, прочностью, высокими износостойкостью и хрупкостью. Он плохо поддается обработке резанием, поэтому его почти не используют. Применяют обычно серый чугун с включениями графита и отбеленной поверхностью, т.е. чугун, поверхностные слои которого имеют структуру белого чугуна для увеличения износостойкости, а сердцевина – структуру серого чугуна.

Серый чугун обладает наилучшими технологическими и хорошими физико-механическими свойствами и является основным материалом для различных отливок. Он содержит (в %): 3–3,6 С, 0,4–1 Mn, 1,3–3,5 Si, 0,12–1 Р, 0,1–0,15 S. Структура металлической основы такого чугуна может быть ферритной, перлитной или перлитно-ферритной, а форма графита – пластинчатая. Излом чугуна серый, обусловленный выделением графита в металлической основе.

В зависимости от предела прочности при растяжении серый чугун подразделяется на различные марки (табл. 32). В обозначении марок серых чугунов двузначное число показывает предел прочности при растяжении. Чугун имеет в 1,5–2 раза меньший модуль упругости по сравнению с модулем упругости стали, причем значение его уменьшается с увеличением растягивающих напряжений, что связано с наличием графитных включений в чугуне.

Для арматуры низкого давления при температуре от -15 до 250°C применяют серый чугун марок СЧ10, СЧ15, СЧ20, СЧ25 и др. Из серого чугуна этих марок изготавливают различные детали арматуры (корпусы редукторов, шестерни, маховики, стойки, кронштейны и т.д.).

Чугун марок СЧ25, СЧ30 — модифицированный серый чугун, процесс получения которого с пластинчатым графитом обычно состоит из двух стадий. Сначала выплавляют сравнительно малоуглеродистый и малокремнистый чугун, который в нормальных условиях охлаждения дает белый или половинчатый излом. Затем путем присадки перед заливкой в формы графитизирующих элементов (ферросилиций, силикокальций и др.) в небольших количествах (примерно 0,5–0,8 % от массы жидкого металла) он превращается в процессе охлаждения в чугун с серым изломом. Сущность модифицирования заключается в активном воздействии на ход процесса кристаллизации небольших количеств специальных добавок (модификаторов), вводимых в жидкий металл. Добавки изменяют температуру кристаллизации и условия роста отдельных фаз. Структура становится более однородной и мелкозернистой, что обеспечивает повышение статической и динамической прочности чугуна.

Примерный химический состав (в %) серого (нелегированного) модифицированного чугуна следующий: 2,8–3 С; 0,8–1,2 Мп; 1,2–2 Si; до 0,2 Р; до 0,14 S.

Из чугуна марок СЧ30, СЧ35 изготавливают ответственную арматуру с большими диаметрами условных проходов, к которой по прочности, плотности и однородности предъявляют высокие требования.

В зависимости от степени легирования серые чугуны подразделяются на низколегированные с содержанием легирующих элементов 3–10 % и высоколегированные с содержанием легирующих элементов свыше 10 %. В зависимости от преобладания того или другого элемента по количеству или влиянию чугун, так же как и сталь, называется никелевым, хромоникелевым, медистым, кремнистым и т.п. Легированный чугун имеет более высокие показатели механических свойств по сравнению с обычными серыми и модифицированными чугунами (σ_B при растяжении до 450 МПа и выше), а также износостойкость, антифрикционность, теплоустойчивость и т.п.

Низко- и среднелегированные серые чугуны — хорошие конструкционные материалы, обладающие более высокими эксплуатационными свойствами, чем простые серые и модифицированные нелегированные чугуны, а именно — имеют повышенную износостойчивость и т.п. Низко- и среднелегированные чугуны содержат (в %) до 1 Сг, до Ni, иногда до 2 Cu, до 0,2 Ti, до 0,6 Mo, до 0,2 V. Из низколегированных чугунов наибольшее применение получил хромоникелевый чугун состава (%): 2,9–3,3 С; 1,4–2,3 Si, 0,5–1 Мп, 0,1–0,33; 0,1–0,12 S; 0,2–1,5 Ni; 0,2–0,7 Cr; иногда 0,5–1 Cu и до 0,2 Ti. По механическим свойствам указанный чугун соответствует маркам СЧ25, СЧ30, СЧ35. Среднелегированный хромоникелевый чугун применяют как износостойчивый материал с химическим составом (в %): 2,8–3,2 С; 1–1,8 Si; 2–4 Ni; 0,3–1 Cr; 0,6–1 Мп; до 0,12 S; до 0,2 Р.

Применение легирования в сочетании с модифицированием позволяет

Т а б л и ц а 33. Механические свойства ковкого чугуна, полученного графитизирующим отжигом

Марка чугуна	Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	Относительно удлинение на литом образце $d=16$ мм, %, не менее	Твердость НВ, не более
КЧ30	300	6	163
КЧ33	330	8	149
КЧ35	350	10	149
КЧ37	370	12	149
КЧ45	450	6	241
КЧ50	500	4	241
КЧ56	560	6	269
КЧ60	600	3	269
КЧ63	630	2	269

получать высокопрочные марки чугуна. Низколегированные и среднелегированные чугуны можно применять в сочетании с модифицированием или без него.

Высоколегированный серый чугун применяют для изготовления деталей, которые при эксплуатации должны обладать какими-либо специальными свойствами – стойкостью в агрессивных средах (кислотах, щелочах и т.п.), жаростойкостью, немагнитностью и др. Представители высоколегированных чугунов – чугуны марок ЧН17ДЗХ2, ЧН5Г8, ЧН15Д7Х2 и др.

По сравнению со стальным литьем *ковкий чугун* отличается более высокой чистотой механически необработанных каналов. По механическим свойствам он занимает промежуточное положение между серым чугуном и сталью и дает плотные отливки (табл. 33). Износоустойчивость ковкого чугуна несколько ниже, чем стального литья. В обозначении марки ковкого чугуна двузначное число показывает предел прочности при растяжении образца.

Отливки из ковкого чугуна получают в результате термической обработки (отжига) отливок из белого чугуна. Микроструктура ковкого чугуна – зернистый перлит и углерод отжига в форме хлопьев. Трубопроводную арматуру из ковкого чугуна марок КЧ30 и КЧ33 применяют для температур от -30 до 400 °С и давлении до 4 МПа при условном диаметре прохода $D_y \leq 80$ мм. Возможно применение ковкого чугуна для изготовления арматуры $D_y = 100$ мм при рабочем давлении до 2 МПа и температуре менее 300 °С.

Способ выплавки *высокопрочного чугуна со сферическим (шаровидным) графитом* заключается в обработке жидкого чугуна с повышенным содержанием углерода и кремния, присадками, содержащими магний, церий или другие элементы, а также графитизирующие модификаторы

Т а б л и ц а 34. Химический состав высокопрочного чугуна разных марок, %

Марка чугуна	Углерод			Кремний		
	Толщина стенки отливки, мм					
	<50	50-100	>100	<50	50-100	>100
ВЧ35	3,3-3,8	3-3,5	2,7-3,2	1,9-2,9	1,3-1,7	0,8-1,5
ВЧ40	3,3-3,8	3-3,5	2,7-3,2	1,9-2,9	1,2-1,7	0,5-1,5
ВЧ45	3,3-3,8	3-3,5	2,7-3,2	1,9-2,9	1,3-1,7	0,5-1,5
ВЧ50	3,2-3,7	3-3,3	2,7-3,2	1,9-2,9	2,2-2,6	0,8-1,5
ВЧ60	3,2-3,6	3-3,3	-	2,4-2,6	2,4-2,8	-
ВЧ70	3,2-3,6	3-3,3	-	2,6-2,9	2,6-2,9	-
ВЧ80	3,2-3,6	-	-	2,6-2,9	-	-
ВЧ100	3,2-3,6	-	-	3-3,8	-	-

ры. Присадки, содержащие магний, являются наиболее эффективными и обеспечивают получение шаровидного графита, а присадки графитизирующих модификаторов, способствуя графитизации, не допускают получения в отливках структурно свободного цементита. Шаровидная форма графита в отличие от пластинчатой вызывает меньшие концентрации напряжений и позволяет повысить прочность основной (металлической) массы чугуна на 70-90 % при наличии пластичности. В зависимости от химического состава (табл. 34) и условий технологического процесса чугуны с шаровидным графитом получают на перлитной, ферритной или ферритно-перлитной основе. В обозначении марки чугуна двузначное число показывает предел прочности при растяжении (табл. 35).

Т а б л и ц а 35. Механические свойства высокопрочного чугуна разных марок

Марка чугуна	Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	Условный предел текучести при растяжении, МПа, не менее	Относительное удлинение, %, не менее	Твердость НВ, не менее
ВЧ35	350	220	22	140-170
ВЧ40	400	250	15	140-202
ВЧ45	450	310	10	140-225
ВЧ50	500	320	7	153-245
ВЧ60	600	370	3	192-277
ВЧ70	700	420	2	228-302
ВЧ80	800	480	2	248-351
ВЧ100	1000	700	2	270-360

Марганец	Фосфор (не более)	Сера (не более)	Хром (не более)	Медь (не более)	Никель (не более)
0,2–0,6	0,1	0,02	0,05	–	–
0,2–0,6	0,1	0,02	0,1	–	–
0,3–0,7	0,1	0,02	0,1	–	–
0,3–0,7	0,1	0,02	0,15	–	–
0,4–0,7	0,1	0,02	0,15	0,3	0,4
0,4–0,7	0,1	0,015	0,15	0,4	0,6
0,4–0,7	0,1	0,01	0,15	0,6	0,6
0,4–0,7	0,1	0,01	0,15	0,6	0,8

Чугуны марок ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70 и другие относятся к чугунам перлитного типа благодаря преобладанию перлита в структуре основной (металлической) массы и характеризуются высокими показателями прочности при сравнительно невысоких показателях пластичности. Чугуны марок ВЧ45-5, ВЧ50-7 относятся к чугунам ферритно-перлитного типа благодаря преобладанию феррита в структуре основной (металлической) массы и характеризуются пониженной прочностью при сравнительно высоких показателях пластичности.

Важнейшие особенности механических свойств чугуна с шаровидным графитом – высокий предел прочности; высокое отношение предела текучести к пределу прочности ($\sigma_T/\sigma_B=0,8$); повышенные значения пластичности (удлинение и ударная вязкость); высокий предел усталости; большая, чем у стали, циклическая вязкость. По прочности высокопрочный чугун с шаровидным графитом близок к качественным углеродистым сталям. Он является полноценным заменителем в ряде случаев стального литья, поковок из стали и ковкого чугуна. Высокопрочные чугуны марок ВЧ35, ВЧ45, ВЧ40 используют для отливок корпусов и крышек арматуры, работающих под давлением до 2,5 МПа и температуре 300 °С, а также для других деталей арматуры при более широких пределах давлений и температур.

28. ТЯЖЕЛЫЕ ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

Из числа цветных металлов и сплавов для изготовления деталей трубопроводной и резервуарной арматуры применяют латунь (седла клапанов и т.п.) и бронзу (пробки и втулки сальников вентиляей, вкладыши и грундбуксы сальников, золотники предохранительных клапанов и т.д.).

Сплавы меди с цинком (до 45 % Zn) называют *латунями*. Строение

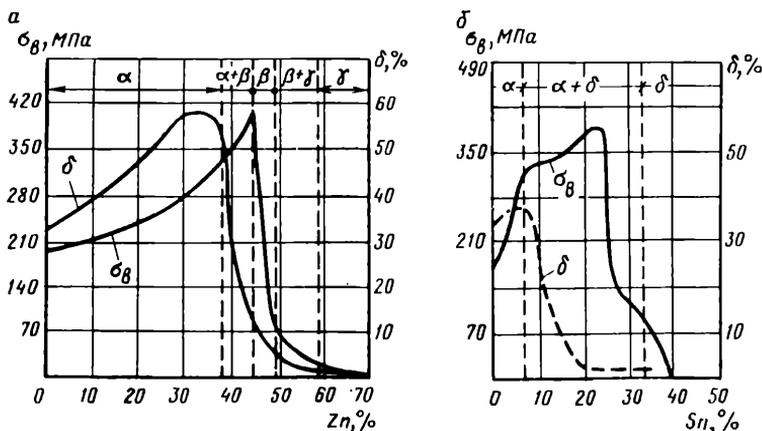


Рис. 93. Механические свойства латуни (а) и бронзы (б) в зависимости от химического состава и структуры

и свойства латуней зависят от содержания цинка. По структуре латуни делятся на α -латуни (до 39 % Zn) – структура однородного твердого раствора цинка и меди, $\alpha+\beta$ -латуни, β -латуни и другие, по мере увеличения содержания цинка. С увеличением содержания цинка от 0 до 35 % (рис. 93,а) прочность латуни σ_b возрастает от 200 до 300 МПа при повышении пластичности δ до максимального значения (до 58 %). $\alpha+\beta$ -латунь с содержанием цинка до 45 % состоит из механической смеси зерен α и β – твердого раствора; β -фаза является более прочной и хрупкой структурной составляющей, поэтому при повышении содержания цинка до 45 % прочность становится максимальной, а пластичность резко падает до 7 %. При содержании цинка свыше 45 % резко падает и прочность латуни, что объясняется появлением в структуре хрупких и малопрочных β - и γ -фаз. В связи с этим латуни с содержанием цинка более 45 % не применяют.

Латуни маркируют буквой Л и последующей двузначной цифрой, обозначающей содержание меди в процентах (например, Л63 – 63 % Cu и 37 % Zn). Применяемые латуни имеют при комнатной температуре α -структуру (Л63) или $\alpha+\beta$ -структуру (Л59).

Латуни обладают хорошими литейными качествами (малой склонностью к ликвации, хорошей жидкотекучестью и др.), способностью к пластической деформации, поэтому их выпускают преимущественно в катаном состоянии (листы, ленты, профили и т.д.) – деформируемые сплавы. Причем α -латуни подвергают холодной пластической деформации при комнатной температуре, так как в интервале температур 300–700 °С они становятся менее пластичными. Способность α -латуней к горячей пластической деформации уменьшается из-за примесей висмута и свин-

ца, образующих легкоплавкие эвтектики по границам зерен. $\alpha+\beta$ -латуни, наоборот, подвергают горячей пластической деформации, так как при нагреве выше температуры 500 °С они становятся более пластичными. На $\alpha+\beta$ -латуни примесь свинца не оказывает влияния при горячей обработке давлением, так как свинец, располагающийся по границам зерен, при нагреве в результате перекристаллизации $\alpha\rightarrow\beta$ оказывается внутри зерен. Поэтому в $\alpha+\beta$ -латуни вводят до 1–2 % свинца для улучшения обрабатываемости резанием. Например, выпускают автоматную латунь ЛС59.

Наличие 1–1,5 % олова в латуни повышает ее коррозионную стойкость в морской воде. В латуни можно вводить также алюминий и никель для повышения механических свойств и коррозионной стойкости (ЛАН59-3-2, где буква А и цифра 3 обозначают наличие алюминия в количестве 3 %, а буква Н и цифра 2 – наличие никеля 2 %). Наличие марганца в латуни указывают буквы Мц в обозначении ее марки, кремния – буква К, железа – буква Ж и т.д. с указанием процентного содержания их соответственно расположению букв в марке. Например, в прутке латуни марки ЛЖМц59-1-1 содержится (в %) меди в среднем 59, железа 1 и марганца 1. При использовании латуни как литейного сплава в обозначение марки вводят дополнительно букву Л после цифр, указывающих количественное содержание элементов (ЛС59-1Л).

Содержание случайных примесей в латунях составляет 0,4–0,9 %. Латуни применяют при температуре 225–250 °С. Они являются пластичным материалом, имеют хорошую коррозионную стойкость (особенно после отжига). С понижением температуры механические свойства (табл. 36) латуней повышаются, поэтому их можно применять при низких температурах.

Кремнистую и свинцовистую латуни марок ЛК80-3Л и ЛС59-1Л используют для неотчетственных литых деталей арматуры, работающих при низких давлениях. Из латуни марки ЛЖМц59-1-1 изготавливают поковки шпинделей, ходовых гаек и др. Ходовые гайки также выпускают из латуней марок ЛМцС58-2-2 и ЛС59-1, уплотнительные кольца задвижек и вентилях – из латуней марок Лб3 (прокат), ЛМц58-2-2Л и ЛК80-3Л (отливки). Латунь марок Лб3, ЛЖМц59-1-1 можно использовать для деталей арматуры, работающей в условиях низких температур до –263 °С.

Бронзами называют сплавы меди с оловом, алюминием, бериллием, кремнием или свинцом. Бронзы дополнительно легируют железом, марганцем, иногда титаном. В зависимости от основного легирующего элемента бронзы подразделяют соответственно на оловянистые, алюминиевые, бериллиевые и т.д. Бронза имеет более высокую прочность и более низкую пластичность, чем латунь. Применяют бронзу для изготовления деталей арматуры: шпинделей, ходовых гаек, подшипников, втулок, венцов червячных колес, а также пружин, работающих в коррозионной среде.

О л о в я н и с т ы е бронзы представляют собой сплавы меди с оло-

Т а б л и ц а 36. Химический состав и механические свойства латуней

Марка латуни	Характеристика	Среднее содержание основных элементов, %		σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %, не менее
		Cu	Zn			
Л63	Прутки тянутые и катаные	63	37	—	380	15
	Поковки и штамповки	—	—	440	520	10
	Термически обработанная, мягкая	—	—	110	360	49
ЛС59-1Л	Отливки	59	41	150	200	20
ЛС59-1	Прутки тянутые и катаные	59	41	—	400	12
ЛС59-1ЛД	Отливки под давлением	59	41	—	200	6
ЛК80-3Л	Отливки в землю	80	20	240	300	15
	Отливки в кокиль	—	—	150	300	15
ЛМцС8-2-2Л	Отливки в кокиль	58	42	130	350	8
	Отливки в землю	—	—	160	250	10
ЛЖМц59-1-1	Прутки тянутые и катаные	59	41	180	500	18

вом при содержании олова до 14 %. Строение и свойства бронзы зависят от содержания олова. Бронзы с содержанием олова (рис. 93,б) до 14 % по структуре должны представлять собой однородный α -твердый раствор олова и меди. Но так как оловянистые бронзы обладают большой склонностью к ликвидации, то уже в бронзах с содержанием олова 5 % наблюдается значительное отклонение структуры от равновесной. В литых бронзах с содержанием олова более 5 % по границам зерен обнаруживают эвтектоид (механическую смесь) из α - и δ -кристаллов. Так как δ -фаза очень хрупка, то пластичность бронз с увеличением содержания олова сильно снижается (например, при увеличении олова от 8 до 20 % пластичность снижается с 35 до 2 %). Отжиг улучшает структуру бронз с содержанием олова 5–6 %. Поэтому для изготовления деталей обработкой давлением (ковкой, прокаткой и т.д.) с последующим отжигом применяют оловянистые бронзы с содержанием не более 6–7 % олова. С большим содержанием олова детали из оловянистой бронзы изготовляют литьем.

Для улучшения обрабатываемости бронзы резанием в них добавляют свинец, для удешевления — цинк, а для устранения хрупких включений

SnO и повышения твердости — фосфор. Бронзу маркируют буквами Бр, затем буквами, обозначающими наличие легирующих элементов (О — олово, А — алюминий, Б — бериллий, К — кремний, Ц — цинк, Мц — марганец, Т — титан, Ф — фосфор, С — свинец, Ж — железо, Н — никель), и цифрами после перечисленных букв, обозначающими процентное содержание легирующих элементов, например, БрОФ6,5-0,15, в которой олова содержится в среднем 6,5 %, фосфора — 0,15 %. Деформируемые оловянистые бронзы, легированные фосфором или цинком (БрОФ6,5-0,15; БрОФ4-0,25; БрОЦ4-3 и БрОЦ4-2,5), выпускают в виде лент, полос, прутков, пружинной проволоки, трубок. Литейные оловянистые бронзы, легированные свинцом, цинком и фосфором, применяют для арматуры (БрОЦС3-12-5). Они обладают малой усадкой. Из-за дефицитности олова оловянистые бронзы применяют в особых случаях.

Т а б л и ц а 37. Механические свойства бронз

Марка бронзы	Характеристика	σ_T , МПа	σ_B , МПа, не менее	δ , %, не менее
БрОЦС3-12-5	Фасонное литье: в землю	—	180	8
	в кокиль	—	210	5
БрАМЦ9-2	Прутки тянутые диаметром 30 мм	—	550	12
	Прутки прессованные диаметром 15–120 мм	300	480	20
БрАМЦ9-2Л	Отливки в землю и кокиль	250	500	32
БрКМц3-1	Прутки тянутые диаметром 14–30 мм	370	480	15
	Прутки катаные диаметром 30–100 мм	—	400	15
БрКМц3-1Л	Отливки в кокиль	—	350	25
БрАЖМц10-3-1,5	Прутки прессованные	190	600	12
БрОЦ4-3	Прутки тянутые	—	350	15
БрОЦ4-3Л	Отливки	150	300	56
БрАЖН10-4-4	Прутки прессованные	—	650	5
БрАЖН10-4-4Л	Отливки	270	650	10
БрБ2	Прутки и полосы мягкие	250	400	30
	Полосы твердые толщиной до 6 мм	—	660	2
	Термообработанная (закалка с температуры 800°С в воде, отжиг при температуре 300°С в течение 2 ч)	1280	1300	1,5
БрОФ6,5-0,15	Прутки тянутые	—	420	15
	Прутки прессованные	—	350	55

Наиболее распространены безоловянистые бронзы, обладающие за счет легирования высокими механическими, антикоррозионными и технологическими свойствами.

Алюминиевые бронзы содержат 5–11 % Al. Их легируют дополнительно Mn 1–2,5 %, Fe 2–6,5 %, Ni 3,5–6,5 %, Pb 1–1,5 %. Деформируемыми алюминиевыми бронзами являются БрАМц9-2; БрАЖН10-4-4 (прутки, полосы); деформируемыми и литейными – БрАЖН10-4Л и БрАЖМц10-3-1,5 (поковки, фасонное литье) и литейными – БрАМц9-2Л; БрАЖС7-1,5-1,5Л; БрАЖН11-6-6Л (фасонное литье) (табл. 37).

Бериллиевые бронзы с содержанием бериллия до 2 % обладают высокими упругими свойствами, хорошей коррозионной стойкостью, хорошо свариваются, обрабатываются резанием, подвергаются закалке и старению. Их применяют для изготовления мембран, ответственных пружин и других изделий обычно после легирования никелем 0,2–0,5 %. Например, бронза марки БрН2 предназначена для работы при температурах от –269 до 250 °С.

Кремнистые бронзы обладают высокой коррозионной стойкостью и механическими свойствами, но большей усадкой, чем оловянистые (БрКМц3-1; БрКЦ4-4; БрКН1-3 и др.).

29. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Полимерные материалы для деталей арматуры

Для изготовления деталей арматуры (кранов, вентилях и т.п.) и фасонных частей трубопроводов (тройников, крестовин, угольников и т.п.) применяют полимерные материалы—полиэтилен низкой и высокой плотности, винилпласт, фаолит (высокого и низкого давлений) и др. Фасонные изделия из полимерных материалов изготавливают литьем под давлением. Гранулированный материал проталкивается плунжером в обогреваемый цилиндр, внутри которого для улучшения и ускорения прогрева материала имеется обогреваемый сердечник. Разогретый материал в вязкотекучем состоянии под давлением плунжера поступает через литник в пресс-форму, где принимает форму изделия и охлаждается. Для извлечения изделий пресс-форма сделана разъемной.

Полимерные материалы применяют также для облицовки (футерование) труб, корпусов, крышек, тарелок, клапанов и других деталей арматуры, соприкасающихся с коррозионно-активными средами.

Полиэтиленовые изделия изготавливают из литейной композиции на основе ПЭВП и ПЭНП. Для стабилизации свойств полиэтилена добавляют газовую (канальную) сажу. Из полиэтилена делают мембраны, защитные покрытия, прокладки, а также некоторые фасонные части. Предназначены они для работы при температуре от –60 до 60 °С.

Винилпластовые изделия (корпусные детали арматуры) применяют

для эксплуатации при положительных температурах до 40–60 °С. Они обладают высокой химической стойкостью против действия многих агрессивных сред: кислот, щелочей и их растворов.

Фторопластовые изделия (уплотнительные кольца, мембраны, прокладки) применяют при температуре от –250 до 200 °С. Фторопласт химически стоек в среде минеральных кислот, щелочей, органических растворителей, окислителей и т.д. Детали арматуры изготавливают из него методом прессования с последующей термической обработкой (нагрев до температуры 375 °С и охлаждение).

Полипропиленовые изделия (корпусные и уплотнительные детали) применяют при температуре от –5 до 110 °С.

Прокладочные материалы

К прокладочному материалу предъявляют требования, исходя из рабочих условий эксплуатации арматуры. Он должен быть дешевым и недефицитным, так как в процессе эксплуатации прокладки часто заменяют. Для создания надежной плотности материал прокладки должен заполнять неровности уплотняемых поверхностей – чаще всего поверхностей фланцевых соединений. Плотность создают при затяжке прокладок между ними с помощью болтов, шпилек и т.п. Материал прокладки должен быть упругим (эластичным), но и достаточно прочным, чтобы при затяжке соединения не произошло раздавливания прокладки или выжимания ее в сторону между уплотняемыми поверхностями под действием давления среды. Благодаря упругости прокладки обеспечивается плотность соединения при возможном искривлении поверхности фланца, например, в сварной арматуре больших размеров для малых давлений. Упругость прокладки позволяет также компенсировать влияние колебаний, возникающих от усилия затяжки, при изменении температуры или под влиянием релаксации напряжений в материале шпилек, болтов, фланцев. Коэффициент линейного расширения материала прокладки должен быть близким к коэффициенту линейного расширения материала арматуры и болтов или шпилек.

Материал прокладки должен обладать стабильностью физических свойств при рабочей температуре среды, быть коррозионно-устойчивым. Если прокладку изготавливают из металла, то он должен иметь твердость и предел текучести ниже, чем металл уплотняемых поверхностей фланцев или патрубков, чтобы пластически не деформировать уплотняющие поверхности, а также не должен образовывать с металлом арматуры при данной среде гальваническую пару. Для изготовления прокладок применяют различные материалы: резину, картон, асбест, паронит, пластмассы и металлы, обеспечивающие плотность неподвижных соединений при различных условиях работы арматуры в различных жидких и газовых средах.

Для уплотнения неподвижных соединений наиболее часто применяют *резину*, которая практически непроницаема для жидкостей и газов, имеет достаточную химическую стойкость, обладает высокой эластичностью (относительное удлинение при разрыве составляет до 150 %). Для прокладок применяют листовую техническую резину на основе синтетического каучука, без тканевых прослоек, так как прослойки иногда приводят к нарушению герметичности соединения (утечки через волокна ткани). По твердости резина подразделяется на мягкую, средней и повышенной твердости. По коррозионной стойкости резина делится на пять типов: маслостойкую для температур от -30 до 50 °С; кислотощелочностойкую для температур от -30 до 50 °С; теплостойкую для температур до 140 °С; морозостойкую для температур от -45 до 50 °С и пищевую для температур от -30 до 50 °С. Под действием температуры в резине значительно ускоряются процессы "старения" (при более 50 °С), имеющие место и при нормальной температуре. При этом снижается эластичность резины, увеличивается ее твердость.

Для прокладок используют *картон целлюлозный* класса II промышленно-технический. Его применяют в арматуре для пара низкого давления, воды при температуре до 120 °С и при рабочем давлении до $0,6$ МПа; для масла при температуре не более 80 °С и давлении менее 4 МПа и в других случаях. Картон подразделяется на водонепроницаемый и прокладочный, пропитанный, используемый для нефтепродуктов при температуре менее 85 °С и давлении менее $0,6$ МПа. Допускается давление на картон не более 55 МПа. Для высоких температур целлюлозный картон непригоден, так как он обугливается.

Фибра листовая (ФЛАК) представляет собой бумагу или целлюлозу, обработанную хлористым цинком и затем каландрованием. Применяют ее для прокладок, работающих при температуре до 100 °С и в средах керосина, бензина, смазочного масла, кислорода и углекислоты.

Асбест используют при повышенных и высоких температурах в виде листового картона или шнура. Широкое распространение имеет белый хризотилковый асбест, обладающий высокой прочностью. При температуре 500 °С его прочность снижается на 33 %, а при температуре 600 °С – на 77 %. Температура плавления волокна 1500 °С. Для арматуры, работающей с газовыми средами при температуре до 600 °С, применяют непропитанный асбестовый картон. Он имеет рыхлое строение, низкую прочность, но высокую жаростойкость. Асбестовый картон, пропитанный натуральной олифой, используют для прокладок в среде нефтепродуктов при давлениях до $0,6$ МПа и температуре менее 180 °С. Для уплотнений больших задвижек в газовых средах используют также асбестовый шнур. Поверхность фланца в этом случае предварительно смазывают техническим вазелином. Для изготовления прокладок используют специальные ткани с пряжей из мягкой латунной или никелевой проволоки. Кроме этого, применяют комбинированные прокладки в виде колец

различной формы и сечений, сердцевину которых изготавливают из асбеста, а облицовку — из тонкого металлического или пластмассового листа.

Паронит получают из асбеста и каучука путем вулканизации и вальцевания под большим давлением. Состоит он из 60–70 % асбестового волокна, 12–15 % каучука, 15–18 % минеральных наполнителей и 1,5–2 % серы. Паронит — универсальный прокладочный материал — используют в арматуре для насыщенного и перегретого пара, горячих газов и воздуха, растворов щелочей и слабых растворов кислот, аммиака, масел и нефтепродуктов при температуре до 450 °С. Допускаемое давление на паронит достигает 130 МПа. Паронит изготавливают следующих марок: ПОН (паронит общего назначения), ПМБ (паронит маслобензостойкий), ПА (паронит армированный) и ПЭ (паронит электролизерный).

Полимерные материалы применяют для прокладок при невысоких температурах среды. В качестве прокладочного материала применяют пластикат полихлорвиниловый, по эластичности близкий к резине. Он легко деформируется и уплотняет фланцевые соединения при относительно небольших усилиях натяга. Используют его для арматуры химических производств при температуре от –15 до 40 °С. Полиэтилен, обладающий высокой химической стойкостью, применяют для прокладок при температурах среды от –60 до +50 °С.

Фторопласт-4 служит для сложных прокладок, у которых сердцевину изготавливают из асбеста, резины или гофрированной стали, а облицовку — из фторопласта. В таких прокладках сердцевина обеспечивает упругость, а облицовка — высокую химическую стойкость. Фторопластовые прокладки используют при температуре среды от –250 до 200 °С. Выпускают также фторопластовый уплотнительный материал (ФУМ) марок В, Ф, К для температуры от –60 до 150 °С в виде шнуров различных профилей и размеров. Он обладает высокими антикоррозионными свойствами, как и фторопласт-4, более удобен для использования. Допускаемое давление на прокладку из ФУМ до 30 МПа. Винипласт листовой применяют как прокладочный материал в агрессивных условиях кислот и щелочей при температуре не выше 65 и не ниже –15 °С.

Для изготовления прокладок применяют *металлы*: алюминий марок АО, А, АД1; свинец марки С2; никель марок НП1, НВК; медь марок М1, М2; малоуглеродистую сталь марок 05, 08 и легированную сталь марок ОХ18Н10 и 12Х18Н10Т. Для нефтяных и газовых сред обычно используют прокладки из алюминия, малоуглеродистой и легированной стали. Металлические прокладки изготавливают в виде плоских колец прямоугольного сечения из листового материала, колец фасонного сечения из труб и поковок чечевичного, овального и гребенчатого сечения. Гребенчатые прокладки имеют сечение плоского прямоугольника с треугольными выступами в виде гребенки. Применяют также комбинированные прокладки с мягкой сердцевиной из асбеста или паронита и облицовкой из листового алюминия, малоуглеродистой или кислотостойкой стали

OX18N10, 12X18N10T. Металлические прокладки обеспечивают достаточную плотность при высоких давлениях и высоких температурах среды. Недостатки таких прокладок – необходимость создания больших усилий для обеспечения прочности соединения, относительно низкие упругие свойства, значительная релаксация напряжений и относительно высокая их стоимость.

Набивочные материалы

Большая часть конструкций арматуры имеет сальниковое устройство для уплотнения подвижного соединения крышка – шпindel с применением сальниковых набивок. Материалы сальниковых набивок должны обладать высокой упругостью, термостойкостью и химической стойкостью против действия рабочей среды и возможно малым коэффициентом трения. В качестве набивочных в основном применяют хлопчатобумажные и пеньковые материалы, асбестовый шнур, графит, тальк и полимерные материалы (стекловолокно, фторопласт). Наиболее часто используют асбестовые шетевые шнуры квадратного или круглого сечения, а также скатанные шнуры без плетения или чесаные волокна (пенька и др.). Наиболее целесообразно применение набивки из заранее приготовленных и отформованных колец.

Хлопчатобумажную набивку, сухую или пропитанную, применяют в среде воды, воздуха, нефтепродуктов при давлении до 20 МПа и температуре от -40 до 100 °С. *Пеньковую набивку* в сухом или пропитанном виде используют при давлении до 16 МПа и температуре от -40 до 100 °С. Под действием кислот и щелочей, а также при высокой температуре хлопчатобумажная и пеньковая набивки теряют прочность и разрушаются, но они дешевы и доступны. Кольцевые манжеты из хлопчатобумажной ткани в виде прорезиненного материала (вулканизированного и графитизированного) марок МХБ, МЛ, МА используют для пара, воды, воздуха и нефтепродуктов при давлении до 40 МПа и температуре до 100 °С.

Асбестовую набивку применяют в виде плетеных или специально отформованных шнуров. Асбестовые кольца укладывают последовательно в коробку сальника. Асбестовый шнур, пропитанный смазкой ЦИАТИМ-221, пригоден для температур от -50 до 70 °С и давлении до 20 МПа; асбестовый шнур, пропитанный графитопарафиновой смазкой, – для температур от -200 до 50 °С и давлении до 4 МПа. Применяют также разрезные асбестоалюминиевые кольца марки КРАА для нефтепродуктов. Для температур до 510 °С используют набивку типа "пушенка", состоящую из хлопьев асбеста, перемешанных с чешуйчатым графитом. Верхнее и нижнее кольца сальниковой набивки изготавливают из асбеста, а пространство между ними заполняют "пушенкой".

Резиновые кольца и манжеты в зависимости от марки применяют для воды, масел, нефтепродуктов, кислот, щелочей и при температуре от -50 до 140 °С.

Графитовая набивка. Графит обладает высокой жаростойкостью (свыше 550 °С), химической стойкостью, хорошими антифрикционными свойствами, высокой теплопроводностью. Он не впитывает влагу. При наличии влаги графит образует с некоторыми сталями гальваническую пару и оказывает на них коррозирующее действие, поэтому графитовую набивку устанавливают в сальники арматуры непосредственно перед эксплуатацией, а шпиндель обычно азотируют во избежание износа.

Применяют чешуйчатый графит в виде пасты, очищенной от минеральных и органических примесей. Во избежание утечки через зазор между крышкой и шпинделем, сверху и снизу набивки ставят асбестовые кольца или прослаивают графит кольцами из паронита. Применяют также кольца и полукольца из прессованного графита. Графит используют для набивки и в виде различных мастик: графитоцерезиновая для температур до 80 °С при давлении до 1,6 МПа, асбестографитоцинковая для температур от -70 до 150 °С при давлении до 4 МПа.

Полимерная набивка. В качестве набивочных материалов в коррозионных средах используют фторопласт-4 в виде стружки, колец или манжет. Набивки из фторопластовых колец, манжет или стружки, смазанные смесями из графита, парафина и масла, применяют при температуре от -250 до 200 °С и давлении до 5 МПа. Фторопласт может выдерживать давления до 30–40 МПа при отдельных конструкциях манжет, исключаящих ползучесть материала. При малых давлениях вместе с фторопластом применяют дополнительные упругие элементы – резину, пружину, так как фторопласт обладает небольшой упругостью. Для сальниковых набивок используют фторопластовый уплотнительный материал в виде шнура при температуре от -60 до 150 °С и давлении до 6,4 МПа.

Фторлон и стекловолокно для набивок применяют в средах кислот при температуре до 100 °С.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие виды материалов применяют для запорной и регулирующей арматуры?
2. По каким признакам классифицируют стальные отливки на группы? Их применение?
3. По каким признакам классифицируют поковки по пяти группам? Их применение?
4. В зависимости от каких свойств и по какой характеристике поковки подразделяют на категории прочности?
5. Какие виды чугунов применяют для отливок деталей арматуры?
6. Какие сплавы называют латуной? Особенности ее применения для отливок деталей арматуры?
7. Какие сплавы называют бронзой? Особенности ее применения для отливок деталей арматуры?
8. Какие виды неметаллических материалов применяют для деталей арматуры?
9. Какие прокладочные материалы имеют наибольшее применение для арматуры?

Глава 6

ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Основное условие борьбы с грунтовой коррозией подземных трубопроводов, а также с воздушной коррозией надземных трубопроводов — предотвращение непосредственного контакта металла труб с агрессивной средой, что достигается созданием на поверхности трубопровода специальной оболочки, называемой изоляционным покрытием. Хорошее изоляционное покрытие исключает также попадание блуждающих токов на трубопровод, а следовательно, защищает его от электрохимической коррозии. Изоляционное покрытие имеет определенную конструкцию в зависимости от коррозионной активности грунтов. Магистральные трубопроводы имеют комплексную защиту, состоящую из изоляционного покрытия в сочетании с электрозащитой. Эффективность электрозащиты и ее стоимость во многом зависят от правильности выбора типа изоляционного покрытия, от свойств материала покрытия и качества его нанесения. Чем хуже свойства и качество покрытия, тем больше стоимость обслуживания трубопровода. В связи с этим ко всем материалам, применяемым для изоляции трубопроводов, предъявляют жесткие требования по соблюдению определенных физико-механических свойств, композиционного состава, геометрических размеров, состоянию поверхности, загрязненности примесями и т.п. Комплекс таких требований входит в технические условия, по которым и поставляют изоляционные материалы.

Изоляционные материалы для защиты газонефтепроводов можно подразделить на следующие: полимерные, битумные, лакокрасочные, стеклоэмалевые, цинковые, алюминиевые и др. Покрытия на основе этих материалов называются соответственно полимерными, битумными и т.д.

Изоляционное покрытие, как правило, многослойное и может состоять из слоев различных материалов (например, битумно-резиновые) или слоев одного материала (например, покрытие из полимерных лент, порошков или стеклоэмали, не считая грунтовок). Тип и общая толщина изоляционного покрытия зависят от коррозионной активности грунта, характеризующегося определенным значением его электросопротивления, а также от назначения трубопроводов, наличия блуждающих токов и других местных условий.

Применяют нормальный и усиленный тип изоляционных покрытий. Усиленный тип изоляционного покрытия используют всегда при прокладке трубопроводов диаметром 1020 мм и более в солончаковых и поливных почвах, на подводных переходах и поймах рек, на переходах через железные и автомобильные дороги и в других осложненных условиях прокладки.

Выбор материала для изоляционного покрытия определяется комплексом предъявляемых к нему требований. Изоляционное покрытие не

должно разрушаться в процессе укладки и засыпки трубопровода и должно надежно защищать его от коррозии в процессе эксплуатации. Поэтому оно должно быть плотным, прочным, обладать хорошей сцепляемостью с материалом трубопровода (адгезией), высокой теплоустойчивостью и морозостойкостью, высоким электросопротивлением, не содержать водорастворимых примесей, быть стойким против насыщения влагой (набухания).

3С. ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Полимерные материалы – основные и перспективные для изоляции трубопроводов. По сравнению с другими материалами они обладают рядом преимуществ: лучшей водостойкостью, большим электросопротивлением и сроком службы, удобством и экономичностью использования. Полимерные материалы применяют в виде полимерных лент в базовых или трассовых условиях или в виде полимерных композиций, наносимых на поверхность труб в порошкообразном или жидком виде в заводских или базовых условиях. Наиболее перспективны заводские покрытия, обеспечивающие высокие эксплуатационные свойства.

Полимерные ленты предназначены для изоляции наземных и подземных трубопроводов диаметром не выше 1420 мм. Они подразделяются на две группы: основные функции защитного покрытия выполняет полимерная пленка, а клей служит для приклеивания этой пленки к трубе; защитной изоляцией является клей, а пленка играет роль подложки и обертки. Имеются также ленты, в которых изоляционными свойствами обладают оба элемента – и полимерная пленка, и клей. Поверх полимерных лент применяют защитные от механических повреждений обертки. Использование полимерных лент упрощает технологию изоляционных работ на базе или трассе, повышает производительность труда по сравнению с использованием битумного покрытия.

Покрyтия из полимерных лент

Грунтовки. Отечественные полимерные ленты применяют с битумно-полимерными, полимерными и даже простыми битумными грунтовками. Битумно-полимерные грунтовки ГТ-752, ГТП-820, ГТ-754ИН, ГТ-760ИН и другие состоят из синтетического каучука, нефтяного битума марки БНИ-IV, термореактивной фенолоформальдегидной смолы и растворителя. Их изготовляют методом смещения растворов компонентов. Они токсичны из-за наличия бензина и фенолоформальдегидной смолы. В последние годы широко применяют битумно-полимерные грунтовки ГТ-754ИН, ГТ-760ИН с ингибиторами. Их используют при температуре не ниже –60 и не выше 70–80 °С. На поверхность труб грунтовку нано-

Т а б л и ц а 38. Физико-механические свойства изоляционных липких лент

Показатель	Поливинилхлоридные липкие ленты			Теплостойкие на основе кремнеорганических смесей ЛЭСАР-ЛПТ
	Летние ПИЛ	Морозостойкие со сланцевыми пластификаторами		
		ПВХ-БК	ПВХ-Л	
Предел прочности на разрыв, МПа, не менее	13	10	10	10
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	190	80	80	100
Липкость клея, с, не менее	20	20	20	—
Морозостойкость пластика, °С, не выше	-33	-20	-50	-40
Удельное электрическое сопротивление пластика при температуре 20 °С, Ом·см, не менее	$1 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{11}$
Толщина пластика, мм	0,3	0,35	0,3	0,7
Температурный режим эксплуатации покрытий, °С	-30-40	-45-40	-40-30	-40-120

сят распылением или специальными самоходными очистными или комбинированными с изоляционными машинами. При температуре ниже 3 °С поверхность трубопровода подогревают до температуры не ниже 15 °С. Полимерные грунтовки изготовляют на основе бутилкаучука и смолы (например, ГТ-831ИН) с ингибиторами.

Импортные полимерные ленты применяют только с импортной полимерной грунтовкой.

Поливинилхлоридные ленты. Для изоляции трубопроводов изготовляют липкие ленты из поливинилхлорида, пластифицированного специальными добавками, сообщаящими ему необходимую эластичность и пластичность. Кроме того, к поливинилхлориду добавляют стабилизаторы, повышающие его стабильность в атмосферных условиях, а также пигменты для его окраски в коричневый или голубой цвет. Такие ленты бывают различных типов: ПИЛ, ПВХ-БК, ПВХ-Л толщиной 0,4 мм (табл. 38). Они предназначены для нанесения на трубопровод при определенных температурах воздуха.

Полимерные ленты ПВХ-БК изготовляют с клеевым слоем из бутилкаучуковой композиции. Их наносят на трубопровод при температуре воз-

Т а б л и ц а 39. Основные свойства полимерных липких лент ПЭЛ и ЛДП на основе полиэтилена

Показатель	ПЭЛ	ЛДП
Толщина ленты, мм, не менее	0,4	0,6
Толщина основы ленты, мм, не менее	0,3	0,3
Толщина слоя клея, мм, не менее	0,1	0,3
Сопротивление разрыву, Н/см, не менее	30	50
Относительное удлинение при разрыве, % %, не менее	100	100
Удельное электрическое сопротивление, Ом·см, не менее	$1 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{12}$
Адгезия (в нахлесте), Н/см, не менее	3	3
Морозостойкость, °С, не менее	-40	-60

духа $-35 - 50$ °С. Полимерные ленты ПВХ-Л и ПИЛ выпускают с клеевым слоем на основе перхлорвиниловой смолы. Их наносят на трубопровод при температуре воздуха $5 - 50$ °С, а с подогревом — до -35 °С. Ленты влагоустойчивы, обладают высокими диэлектрическими и защитными свойствами, хорошо противостоят различным растворителям.

Теплостойкие ленты. Для изоляции горячих участков трубопроводов, например на компрессорных станциях, применяют полимерные ленты ЛЭТСАР-ЛПТ (см. табл. 38) с защитным клеевым слоем из силиконовой резины на основе кремнийорганических каучуков. Изготавливают из двух марок: А и Б. Лента марки А толщиной 1,2 мм имеет основу (подложку для защитного клея) в виде полимерной пленки; лента Б толщиной 0,6 мм в качестве основы имеет стеклоткань. Их наносят на трубопровод по специальной двухкомпонентной грунтовке ВИКСИНТ-У-4-21. Температура воздуха при нанесении этих лент должна быть $-40 - 60$ °С.

Полиэтиленовые ленты. Для получения изоляционных липких лент (табл. 39) применяют два вида полиэтилена: высокой плотности (ПЭВП) и низкой плотности (ПЭНП). Широко известны липкие изоляционные ленты из ПЭНП (ПЭЛ) толщиной 0,4 мм. Лента ПЭЛ обладает высоким электрическим сопротивлением, лучшей прилипаемостью, меньшим водопоглощением, высокой химической стойкостью, особенно к минеральным кислотам и щелочам, и сохраняет механическую прочность в более широком интервале температур, чем поливинилхлоридные ленты ПИЛ и др. Полиэтиленовую ленту можно наносить на трубопроводы при отрицательных температурах до -40 °С.

Значительно более высокой прочностью и морозостойкостью (до -60 °С) обладают ленты полиэтиленовые дублированные (ЛДП). Их изготавливают валково-каландровым способом. Они отличаются стабильностью характеристик в интервале температур эксплуатации от -60 до 50 °С. Выпускают их толщиной не менее 0,6 мм.

Более высокими защитными свойствами обладают дублированные термоусаживающиеся ленты на основе полиэтиленов низкой и высокой плотности — ленты термосветостабилизированные изоляционные (ЛТСИ). Их разработали — МИНГ им. И.М. Губкина и ВНИИСТ. Созданы ЛТСИ-1 для температур от 60 до 80 °С, ЛТИ-823 для температур от -60 до 50 °С (для изоляции стыков трубопроводов, строящихся из труб с заводской изоляцией) и др. Изготавливают ЛТСИ-1 и ЛТИ-823 на линиях соэкструзии (совместной экструзии), при этом удается совместить в одной ленте свойства обертки и защитной пленки. Общая толщина ЛТСИ-1 и ЛТИ-823 составляет 1 мм: толщина основы — 0,7–0,8 мм и клеящего слоя — 0,3–0,2 мм.

Защитные обертки. Для защиты покрытий из полимерных лент от механических повреждений применяют рулонные обертки ПЭКОМ, ЛПП-2, ПВХ, ПДБ-БК и др. Наиболее широко применяют ПЭКОМ, который представляет собой липкую оберточную пленку толщиной 0,6 и 0,3 мм. Ее изготавливают из высоконаполненной смеси полиэтилена, синтетического каучука (не более 5 %), наполнителя, стабилизатора, битума (не более 10 %), модификатора. ПЭКОМ используют при температуре эксплуатации трубопроводов от 50 до -30 °С. Поставляют ее длиной в рулоне 125 и 180 м. Она имеет прочность при растяжении не менее 10,5 МПа; относительное удлинение не менее 80 и 50 % соответственно в поперечном и продольном направлениях; водопоглощение за 24 ч (по массе) не более 0,1 %; температуру хрупкости не выше -30 °С. Применяют также липкую обертку на основе полиэтилена общей толщиной не менее 0,6 мм со слоем клея 0,1 мм на одной стороне (ЛПП-2). Сопротивление разрыву обертки составляет не менее 80 Н/см, относительное удлинение при разрыве не менее 100 %, адгезия к изоляционной ленте — не менее 3 Н/см.

Поливинилхлоридный оберточный материал ПВХ представляет собой пленку из утильных отходов производства изоляционной поливинилхлоридной ленты с добавлением различных наполнителей. Обертки ПВХ изготавливают толщиной 0,7 мм, шириной 500 мм, длиной в рулоне 125 м. Прочность обертки ПВХ на разрыв составляет не менее 8 МПа, относительное удлинение не менее 80 %, морозостойкость не выше -10 °С и температура нанесения и эксплуатации — от -10 до 40 °С. Кроме того, для защиты изоляционных покрытий от повреждений применяют ленту полимерную на основе поливинилхлорида толщиной 0,5 мм при температуре воздуха не ниже -20 °С и не выше 40 °С без слоя клея.

Оберточный материал ПДБ-БК — рулонный материал. Его изготавливают из ПЭНП или ПЭВП (или их смеси), бутилкаучука, битума, газогенераторной смолы или продукта окисления ЛСБ (битума или нефтяного дистиллата "черный соляр"). Обертки ПДБ-БК поставляют толщиной 0,5 мм, шириной 450 и 500 мм, длиной в рулоне 250 м. Прочность на разрыв обертки в продольном направлении составляет не менее 10 МПа, в поперечном направлении — не менее 1 МПа, относительное удлинение в

Т а б л и ц а 40. Конструкции изоляционных покрытий разных типов из полиэтиленовых лент

Тип покрытия	Конструкция покрытия	Толщина, мм, не менее
Нормальный	Грунтовка битумно-полимерная типа ГТ-75ИН с расходом $\geq 0,1$ кг/м ²	—
	Лента полиэтиленовая изоляционная, один слой	0,4
Усиленный	Защитная обертка ПЭКОМ, один слой	0,6
	Грунтовка битумно-полимерная типа ГТ-754 ИН с расходом $\geq 0,1$ кг/м ²	—
	Лента полиэтиленовая изоляционная, два слоя	0,8
Усиленный ГТ-75ИН	Защитная обертка ПЭКОМ, два слоя	1,2
	Грунтовка битумно-полимерная типа ГТ-754 ИН с расходом $\geq 0,1$ кг/м ²	—
	Лента дублированная полиэтиленовая ЛДП, один слой	0,6
	Полимерная липкая обертка на основе полиэтилена, один слой	0,6

продольном направлении не менее 40 %, водопоглощение за 24 ч не более 0,5 %, температура нанесения и эксплуатации — от -40 до 50 °С.

Типы покрытий из полимерных лент. Полимерные покрытия газонефтепроводов из липких изоляционных лент на основе полиэтилена (табл. 40) и поливинилхлорида (табл. 41) применяют нормального и усиленного типов. Наносят их в трассовых или базовых условиях. Полимерные покрытия из поливинилхлоридных лент ПИЛ, ПВХ-БК, ПВХ-Л нормального или усиленного типа включают два слоя этих лент. В покрытиях усиленного типа применяют также два слоя защитных оберткок.

Т а б л и ц а 41. Конструкции изоляционных покрытий разных типов из поливинилхлоридных лент

Тип покрытия	Конструкция покрытия	Толщина, мм, не менее
Нормальный	Грунтовка битумно-полимерная типа ГТ-754ИН с расходом $\geq 0,1$ кг / м ²	—
	Лента ПВХ-Л, два слоя	0,8
	Защитная обертка типа ленты полимерной на основе ПВХ, один слой	0,5
Усиленный	Грунтовка битумно-полимерная типа ГТ-754ИН с расходом $\geq 0,1$ кг / м ²	—
	Лента ПВХ-БК, два слоя	0,8
	Защитная обертка типа ленты полимерной на основе ПВХ, два слоя	1

Таблица 42. Размеры и свойства импортных изоляционных лент, липких оберток и клеевых грунтовок

Марка материала	общая	Толщина, мм		Сопротив- ление разрыву, Н/см	Удлине- ние при раз- рыве, %	Клеевая грун- товка (прай- мер)	Расход грунтовок при темпе- ратуре 20 °С, кг / м ²	Температурный ин- тервал эксплуатации покрытий (праймер+ +1 слой обертки)	
		основы	слоя					не ниже	не выше
<i>Изоляционные ленты</i>									
"Поликен 980-25"	0,635	0,33	0,305	62	235	"Поликен 9196"	0,08	-60	+60
"Плайкофлекс 450-25"	0,635	0,33	0,305	62,5	400	"Плайкофлекс 125"	0,104	-60	+60
"Тек-Рап 240-25"	0,635	0,33	0,305	53,6	400	"Тек-Рап 200"	0,104	-60	+60
"Нитто 53-635"	0,635	0,38	0,255	76	570	"Нитто В-300"	0,85	-60	+60
"Фурукава Рапко НМ-2"	0,64	0,34	0,3	40	500	"Рапко Коат №6"	0,07	-60	+60
"Альтене 100-25"	0,635	0,33	0,305	62	235	"Альтене Р-19"	0,08	-60	+60
"Пластизол"	0,63	0,33	0,33	76	500	"Примол-40"	0,14	-60	+60
"Кыл"	0,63	0,33	0,3	60	230	Г-1025	0,11	-40	+50
<i>Обертки</i>									
"Поликен 955-25"	0,635	0,508	0,127	45	100	-	-	-	-
	0,635	0,5	0,135	44,7	200	-	-	-	-
"Тек-Рап 260-25"	0,635	0,5	0,135	44,7	200	-	-	-	-
"Нитто 56 РА-4"	0,635	0,535	0,1	100	400	-	-	-	-
"Фурукава "Рапко РВ-22"	0,64	0,5	0,14	110	580	-	-	-	-
"Альтене 205-25"	0,635	0,508	0,127	45	100	-	-	-	-
"Пластизол"	0,635	0,5	0,135	50	380	-	-	-	-
Примечание. Для всех лент адгезия к трубе составляет не менее 15 Н/см.									

На переходах через водные, автомобильные и железные дороги добавляют в усиленном типе покрытия еще один слой полимерной ленты и защитной обертки, доводя общую толщину каждой из них до 1,2 мм.

На трубопроводах компрессорных станций применяют изоляционные покрытия усиленного типа из теплостойких полимерных лент ЛЭТСАР-ЛПТ. В покрытие входят ленты марки А и Б с промежуточным слоем грунтовки между ними, толщина (в мм) которых следующая:

Грунтовка ВИКСИНТ-У-4-21 с расходом 0,4 кг/м ²	—
Лента ЛЭТСАР-ЛПТ марки А, один слой	1,2
Грунтовка ВИКСИНТ-У-4-21 с расходом 0,4 кг/м ²	—
Лента ЛЭТСАР-ЛПТ марки В, один слой	0,7
Защитная обертка типа ленты полимерной на основе ПВХ . . .	0,6

На подводные переходы и переходы через автомобильные и железные дороги наносят по два слоя каждой ленты и защитной обертки.

Импортные ленты. В нашей стране используют полимерные поливинилхлоридные ленты и полиэтиленовые ленты, поставляемые из США ("Поликен", "Плайкофлекс", "Тек-Рап"), Японии ("Нитто", "Фурукава Рапко"), Италии ("Альтене"), Югославии ("Пластизол"), Болгарии ("Кил"), эксплуатируемые при температуре трубопровода не ниже -60 и не выше 60°С (табл. 42). Применяют их в комплекте с грунтовками и с защитными обертками. Защитные обертки и грунтовки имеют такие же наименования, как и пленки.

Изоляционное покрытие, состоящее из грунтовки, одного слоя полимерной ленты и одного слоя защитной обертки, соответствует покрытию усиленного типа. На участках подводных переходов, на переходах под железными и автомобильными дорогами покрытие наносят из двух слоев изоляционной полимерной ленты и двух слоев защитной обертки.

Температура окружающего воздуха при нанесении полимерных лент должна быть не ниже -40°С. При температуре воздуха ниже 10°С рулоны лент и оберток отечественных и импортных перед нанесением выдерживают не менее 48 ч в теплом помещении с температурой не ниже 15°С, но не выше 45°С. При температуре воздуха ниже 3°С изолируемую поверхность трубопровода подогревают до 15°С, но не выше 50°С.

Заводские полимерные покрытия

Заводские полимерные покрытия труб обладают лучшими эксплуатационными характеристиками по сравнению с покрытиями, наносимыми на трассе, что обеспечивается более тщательным проведением технологических операций по изоляции труб в стационарных условиях, а также прогрессивным применением новых технологических процессов и материалов. При этом увеличивается срок службы магистральных трубопроводов, устраняется сезонность выполнения изоляционных работ, повы-

шаются темпы строительства за счет сокращения операций очистки и изоляции трубы, значительно уменьшается загрязнение окружающей среды при строительстве трубопроводов.

Трубы с заводским покрытием не разрушаются при гнутье, обладают высокой химической стойкостью. Заизолированные трубы могут долгое время находиться под открытым небом без заметного изменения свойств. В условиях трассы изолируют только стыки труб. Композиционные составы заводской изоляции и технология ее нанесения постоянно совершенствуются. Улучшается также технология изоляции труб и ремонтных изоляционных работ в трассовых условиях.

Технология нанесения изоляции. В заводских условиях (непосредственно на трубных заводах) или на изоляционных базах в качестве изоляционного покрытия на поверхность труб наносят полиэтилен или эпоксидный порошок соответственно методом экструзии расплавленного гранулированного полиэтилена (или напылением и оплавлением порошка полиэтилена) и напылением эпоксидной порошковой краски. ВНИИСТом в содружестве с другими институтами разработан способ напыления покрытия на трубу с подачей полимерного порошка в псевдооживленном состоянии с помощью вращающихся роторов. Известны и другие способы.

Перед нанесением изоляции трубы сушат для удаления влаги, снега, инея и подают в трубоочистительную дробеметную машину. При этом с поверхности металла удаляют пыль, ржавчину, окалину и др. Затем труба поступает по рольгангу в газопламенную печь для нагрева до температуры 240–260 °С. С помощью специального захватного устройства трубу подают на установку для напыления порошка полиэтилена в псевдооживленном состоянии (рис. 94) без подклеивающего слоя. Трубе сообщают электрический заряд одного знака (+), а материалу в "кипящем" слое – другого знака (–). Заряженный поток частиц напыляемого порошка при вращении роторов равномерно устремляется под напряжением электрического поля 60 кВ к поверхности трубы и прилипает к ней. При этом труба вращается и покрывается оплавленной монолитной пленкой полимерного материала. Покрытие уплотняют с помощью прикатывающих валиков, покрытых специальной резиной.

Из термопластических материалов наибольшее применение для напыления нашел порошкообразный полиэтилен высокой плотности (ПЭВП). В качестве стабилизатора используют 0,5 % сажи. На основе ПЭВП разработаны двухслойные покрытия с содержанием сажи в верхнем слое 2–3 %. Нижний слой ПЭВП – основная противокоррозионная защита металла труб. Верхний слой ПЭВП с добавкой сажи до 3 % защищает нижний слой от ультрафиолетовых лучей солнечной атмосферы, вызывающих в присутствии кислорода быстрое старение полиэтилена.

Двухслойные покрытия наносят напылением в электрическом поле на трубных заводах или изоляционных базах. Напыление первого слоя ПЭВП с 0,5 % сажи осуществляют в течение 1 мин на предварительно очи-

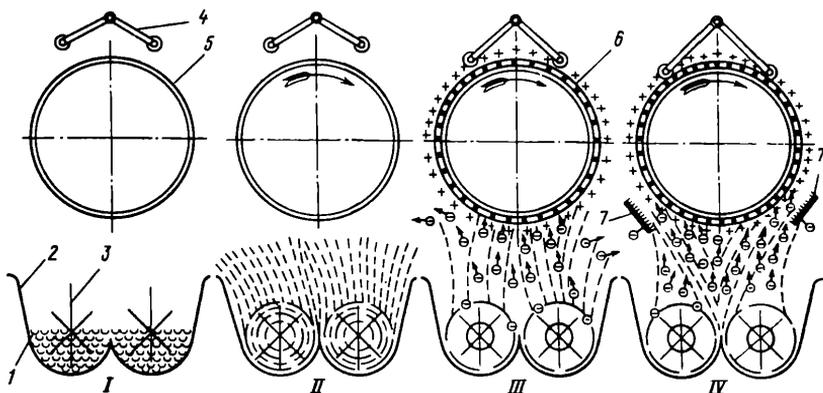


Рис. 94. Схема процесса нанесения полимерного порошка на нагретую трубу:

I – заполнение емкости порошком и размещение нагретой трубы над емкостью с порошком; *II* – включение вращения трубы и роторов в емкости с порошком; *III* – подача тока высокого напряжения на трубу и роторы (начало образования слоя покрытия); *IV* – включение прикатывающего устройства и коронирующих сеток (процесс формирования покрытия); 1 – порошок; 2 – емкость для порошка; 3 – устройство для образования кипящего слоя (роторы); 4 – прикатывающее (уплотняющее) устройство из валиков; 5 – труба; 6 – слой оплавленного покрытия; 7 – коронирующие сетки

щенную и нагретую трубу. Затем трубу подают для нанесения (в течение 1 мин) слоя второй полиэтиленовой композиции с 2 % сажи. При этом покрытие уплотняют с помощью прикатывающих валиков. Происходит быстрое проплавление напыляемого порошка и образование монолитного покрытия. После чего трубу перемещают на операцию охлаждения водой и подвергают контролю покрытия на сплошность, толщину, адгезионную и ударную прочность и т.д.

Для нанесения полимерных композиций на основе гранулированного термостойкого стабилизированного полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) применяют экструзионно-намоточный способ для труб диаметром более 600 мм и способ непрерывной экструзии "чулком" для труб диаметром менее 600 мм. Покрытие наносят по подклеивающему слою (адгезиву), представляющему собой сополимер этилена с эфирами акриловой кислоты, сополимер этилена с винилацетатом (сэвилен) при композиции на основе бутилкаучука. Перед нанесением покрытия трубы поступают в сушильную печь, а затем в камеру дробебетной очистки, как и при нанесении порошкообразного полиэтилена.

Трубы диаметром более 600 мм нагревают в печи, трубы меньшего размера нагревают с помощью высокочастотных индукторов. При нанесении покрытия экструзионно-намоточным способом трубе придают равномерное вращательно-поступательное движение. На нее из одного экстру-

дерева поступает лента клеевого слоя толщиной 0,15–0,2 мм через шелевую головку, а из другого экструдера – лента основного слоя толщиной 0,3–0,5 мм, формирующая защитное свето- и термостабилизированное полиэтиленовое покрытие.

Покрытие толщиной 2,5–3 мм формируют из 4–5 слоев ленты, наматываемой на трубу внатяг по спирали. Покрытие уплотняют с помощью прижимного ролика с фторопластовым покрытием.

Способом непрерывной экструзии "чулком" покрытие наносят через наклонную кольцевую головку, питаемую двумя или тремя экструдерами в зависимости от размера труб и производительности изоляционной установки. Для улучшения прилипаемости клеевого слоя к трубе применяют вакуумирование головки. Полученное полиэтиленовое покрытие охлаждают до температуры 60–70 °С, обливая холодной водой.

Широко применяемые эпоксидные порошковые краски состоят из эпоксидной термореактивной смолы, отвердителя, ускорителя, пигмента, наполнителя, поверхностно-активных и других добавок. Эпоксидные смолы используют с температурой плавления 95–110 °С. Отвердителями могут служить дициандиамид, гидразин и другие вещества. В качестве наполнителя используют, например, синтетический сульфат бария, а в качестве пигментов – оксиды титана, хрома, железа.

Эпоксидные покрытия отверждаются при определенной температуре и в течение определенного времени в отличие от полиэтиленовых, которые относятся к термопластичным материалам (их затвердевание происходит в процессе охлаждения).

Распространение получили эпоксидные краски П-ЭП-177 и П-ЭП-971. Наносят их методом пневматического напыления слоем 0,25–0,5 мм с применением электростатического поля или без него на нагретую до температуры 220–230 °С трубу после тщательной ее очистки. Трубе придают вращательное и поступательное движение. После напыления труба с покрытием поступает в камеру полимеризации для отверждения покрытия при температуре 200 °С в течение 30 (краске П-ЭП-177) или 20 мин (краска П-ЭП-971). Затем трубы обдувают воздухом после выхода из камеры и охлаждают до комнатной температуры.

Осваивают изоляцию труб большого диаметра комбинированным методом: напылением полиэтилена и последующим нанесением термостабилизированной полиэтиленовой ленты. МИНГ им. И.М. Губкина совместно с ВНИИСТом разработали покрытия такого типа толщиной 1,5–2 мм: "Подулент-1" и "Подулент-2" для температур эксплуатации –60–60 и –60–80 °С соответственно.

В условиях трассы изолируют только стыки труб. Заводские полимерные покрытия, экструдированные из расплава, и порошковые, оплаваемые на трубах, применяют для газонефтепроводов любых диаметров с максимальной температурой эксплуатации 60–80 °С. Эти полимерные покрытия труб соответствуют изоляции усиленного типа.

Усиленный тип покрытия из экструдированного или напыленного полиэтилена имеет толщину не менее 2,5 мм для труб диаметром до 1020 и 3,5 мм для труб 1020 мм и выше, соответственно. Усиленный тип покрытия на основе эпоксидной порошковой краски ПЭП-534 имеет толщину 0,35 мм (но не более 0,5 мм).

Изоляция сварных стыков труб. Трубопроводы прокладывают как из одиночных труб с заводской изоляцией, так и из двух- или трехтрубных секций, поэтому большое значение приобретает изоляция сварных стыков труб и ремонт поврежденных участков изоляции в условиях сварочной базы и трассы после сварки секций или отдельных труб в нитку.

Материалы, применяемые при изоляции сварных стыков труб, должны выдерживать механические воздействия, которым подвергается изоляционное покрытие в условиях строительно-монтажных работ при температуре окружающей среды от -40 до 60°C .

Перед нанесением покрытия поверхность околошовной зоны очищают механизированным способом от продуктов коррозии, легко отделяющейся окалины, грязи, маслянистых пятен, копоти, пыли и т.д. Поверхность околошовной зоны не должна иметь острых выступов, заусенцев, задиров, прилипших капель металла, шлака, которые срубают, спливают, зачищают. Окошовная зона и прилегающие к ней участки заводского покрытия при нанесении грунтовки и ленты должны быть сухими, без наличия влаги в виде пленки, капель, наледи и инея. Сушку и подогрев околошовной зоны проводят с помощью нагревательных устройств, обеспечивающих сохранность заводского изоляционного покрытия. Для этой цели используют, например, газовые горелки. Края заводского покрытия при подогреве изолируемого сварного стыка укрывают асбестовой тканью шириной не менее 20 см.

Изолируемую поверхность сварного стыка подогревают до температуры не ниже 15°C (но не выше 50°C для лент) при температуре окружающего воздуха ниже 5°C .

Для изоляции сварных стыков труб с заводским покрытием применяют в основном материалы двух видов: полиэтиленовые термоусадочные изделия (муфты, манжеты — разъемные муфты и ленты) и полимерные липкие ленты. Первые наиболее перспективны.

Термоусадочная муфта (рукав) представляет собой полимерную трубу с толщиной стенки 2–3 мм со слоем клея на внутренней поверхности. Она имеет диаметр примерно на 10 % больше диаметра изолированных труб. Изготавливают такую муфту из ориентированного (растянутого) и облученного (γ - или β -лучами) полиэтилена. Муфта сохраняется в растянутом состоянии до нагрева, при котором происходит "размораживание напряжений", и материал возвращается к начальным размерам. Термоусадочная муфта после нагрева уменьшается по диаметру на 15–30 % и плотно охватывает изолируемый сварной стык. Для защиты сварного стыка шва термоусадочную муфту надевают перед сваркой сты-

ка на трубу. После сварки, очистки, сушки и подогрева стыка муфту надвигают с нахлестом на заводское покрытие не менее чем на 7,5 см, муфта термоусаживается и плотно облегает трубу. При нагреве муфты подклеивающий слой расплавляется, что обеспечивает хорошую ее адгезию с трубой.

Термоусадочные манжеты и ленты изготавливают из полиэтилена, обработанного таким же способом, как и муфты.

Манжеты (разъемные муфты) на сварной стык устанавливают также непосредственно после очистки и подогрева изолируемой поверхности.

Затем проводят усадку муфты (с ее середины), нагревая трубу пламенем ручных газовых горелок или разъемными газовыми кольцевыми подогревателями. Нагрев ведут сразу сверху и снизу муфты. Пламенем горелки подогревают сначала среднюю часть муфты, держа горелку на расстоянии не ближе 15 см от муфты. При этом горелку перемещают возвратно-поступательными движениями по периметру муфты до тех пор, пока муфта не прижмется своей серединой к поверхности сварного шва. На трубе диаметром 1020 мм и более для усадки муфты применяют одновременно четыре горелки или кольцевой разъемный нагреватель. После усадки средней части муфты процесс нагрева продолжают от середины к краям. Для более ровной (без гофр) усадки муфт используют прикапывающие ролики из фторопласта.

Термоусадочную ленту наносят последовательной намоткой на предварительно подготовленную подогретую до температуры 60–80 °С поверхность сварного стыка. При этом из-за нагрева происходит усадка ленты. Поверх термоусадочной ленты наносят спиральной намоткой по грунтовке липкую ленту с полным перекрытием первой. Нахлест термоусадочного покрытия на примыкающие края заводской изоляции должен быть не менее 7,5 см. Полимерную липкую ленту при изоляции сварных стыков наматывают в два слоя, поверх нее — один слой защитной полимерной обертки. Допускается вместо защитной обертки применять дополнительно один слой липкой ленты. Полимерные липкие ленты наносят на сварной стык также после очистки, сушки, подогрева изолируемой поверхности и по грунтовке. Изоляцию сварных стыков полимерными лентами следует проводить механизированным путем. Липкие полимерные ленты и обертки наносят при температуре окружающего воздуха не ниже –40 °С. При температуре ниже 10 °С рулоны ленты, обертки и грунтовку перед нанесением следует выдержать не менее 48 ч в теплом помещении при температуре не ниже 15 °С.

Нахлест витков полимерной ленты при нанесении на сварной стык составляет: при послойной намотке 3–5 см, при намотке сразу двух слоев 50 % ширины плюс 2–3 см.

Ремонт заводской изоляции труб. Изоляционное покрытие труб повреждается при их транспортировке от предприятий-изготовителей к потребителям, а также при перевозке двух- или трехтрубных плетей от

сварочной базы к месту производства работ. Поэтому покрытие ремонтируют на трубосварочной базе после сварки труб или секций в нитку. Отслоившееся от металла покрытие в зоне дефекта необходимо удалить, а края оставляемого покрытия зачистить. Поверхность металла на участке дефекта очищают от ржавчины, пыли и влаги. Очистку выполняют вручную стальными проволочными щетками или шлифовальной машинкой.

При температуре окружающего воздуха не ниже 5 °С очищенную поверхность оголенного металла и края неповрежденной изоляции высушивают и равномерно нагревают газовой горелкой, направляя пламя горелки ближе к центру повреждения и избегая перегрева заводского покрытия. При этом нагрев проводят до температуры 35–40 °С.

На подготовленный участок наносят заплату таким образом, чтобы края заплаты перекрывали неповрежденную заводскую изоляцию на 5–10 см. Материал и конструкцию заплаты выбирают в зависимости от материала основного покрытия. При большом числе повреждений на участке трубы (более 15 % от общей площади) и при размерах повреждений, превышающих 250 см², при ремонте изоляции можно применять вместо заплат обмотку трубы полимерной лентой в три слоя или термоусадочную манжету (муфты, ленты).

После ремонта покрытие по основным защитным свойствам не должно уступать основному заводскому покрытию. При ремонте полимерные ленты наносят только по соответствующей грунтовке.

При несквозных повреждениях полиэтиленового покрытия дефекты устраняют разглаживанием покрытия горячим шпателем после размягчения пропановой горелкой. При этом покрытие не должно перегреваться выше температуры 110 °С. При сквозных повреждениях на очищенную поверхность оголенного металла наносят клеевую грунтовку с нахлестом на основное покрытие не менее 10 см. После высыхания грунтовки на огрунтованную поверхность вровень с краями основного заводского покрытия укладывают полимерную замазку, например типа 51ГЗ, или твердеющий термостойкий тиоколовый герметик.

Когда температура транспортируемого продукта не выше 40 °С, очищенные и огрунтованные углубления в местах повреждения покрытия площадью до 250 см² допускается заполнять мастикой на битумной основе с температурой размягчения не ниже 75 °С.

Сквозные повреждения заводского полиэтиленового покрытия ремонтируют также шпатлевками на основе эпоксидных смол типа ЭД-16, ЭД-20, ЭД-22, ЭП-00-10, ЭП-00-20 и др. В жидкие эпоксидные шпатлевки добавляют минеральные наполнители крупностью зерен не более 0,4 мм (песок, тальк и др.), которые предварительно необходимо высушить до постоянной массы и нагревать до температуры 100–120 °С. Смешивание смолы с горячим наполнителем в отношении 1:3 или 1:4 проводят непосредственно перед нанесением шпатлевки. Затем в смесь небольшими пор-

циями вводят отвердитель (10 % от массы смолы) и все это тщательно перемешивают до образования однородной пастообразной массы и сразу же используют. Эпоксидную шпатлевку наносят на очищенную и подогретую до температуры 35–40 °С газовой горелкой поверхность металла. При этом края полиэтиленового покрытия рекомендуется слегка оплавливать. Шпатлевку вдавливают в подплавленные края покрытия и разглаживают по металлу вровень с краями дефекта.

По замазке и вторично по основному покрытию (с нахлестом ее менее 20 см) наносят слой грунтовки, по которому после его высыхания приклеивают вначале одну заплату с нахлестом на основное покрытие не менее 15 см, а на нее (тоже по грунтовочному слою) – вторую. Заплатки нарезают из термоусадочной или липкой полимерной ленты. Необходимо обеспечить полное сплошное приклеивание заплат одна к другой и заводскому покрытию. Заплатки рекомендуется прикатывать эластичным катком.

Эпоксидное изоляционное покрытие ремонтируют нанесением на места повреждения по грунтовке заплатки в два слоя из липких полимерных лент. Применяют также липкие полимерные замазки и эпоксидные шпатлевки.

Битумные изоляционные покрытия ремонтируют битумными мастиками. Поврежденное покрытие восстанавливают, заполняя битумной мастикой углубления и заравнивая мастику горячими металлическими шпателями. Затем на это место наносят заплату из полимерной ленты. При большом количестве повреждений вместо заплат рекомендуется применять обмотку полимерной лентой в один слой.

Полимерные покрытия из липких лент ремонтируют нанесением заплат по грунтовке из двух слоев аналогичных полимерных липких лент с нахлестом на заводское покрытие не менее 15 см.

31. БИТУМНЫЕ И ДРУГИЕ МАТЕРИАЛЫ

Для изоляции магистральных трубопроводов применяют специальные изоляционные или строительные твердые нефтяные битумы. Их получают окислением или обработкой паром остаточных продуктов после прямой перегонки или после крекинга нефти или нефтепродуктов.

Битум нефтяной изоляционный имеет марки: БНИ-IV, БНИ-IV-3 и БНИ-V. Битум нефтяной строительный применяют марок БН-90/10 и БН-70/30 в случае отсутствия изоляционных битумов. Плотность нефтяных битумов составляет 1,01–1,07 г / см³ (табл. 43).

Битум представляет собой твердую, плавкую или вязкожидкую смесь углеводородов и их неметаллических производных, хорошо растворимых в сероуглероде, хлороформе и других органических растворителях. Компонентами группового состава (в %) битума служат: вяз-

Таблица 43. Основные свойства нефтяных изоляционных и строительных битумов

Показатель	Изоляционный битум			Строительный битум	
	БНИ-IV	БНИ-IV-З	БНИ-V	БН-70/30	БН-90/10
Глубина (в мм) проникания иглы в 0,1 мм при температуре 25 °С, не менее	25-40	30-50	20	21-40	5-20
Растяжимость при температуре 25 °С, см, не менее	3	4	2	3	1
Температура размягчения, °С, не менее	75	65	90	70	90
Температура вспышки, °С, не менее	230	230	230	230	230
Водонасыщаемость за 24 ч, %, не более	0,2	0,2	0,2	-	-
Изменение массы после прогрева, %, не более	0,5	0,5	0,5	1	1
Содержание парафина, %, не более	-	4	-	-	-
Содержание водорастворимых соединений, %, не более	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3

кие минеральные масла 28-52, смолы 18-30, асфальтены, карбены, карбониды 18-52, асфальтогеновые кислоты и их ангидриды - свыше 1,25. Асфальтогеновые кислоты и ангидриды стабилизируют коллоидные структуры битума. При увеличении содержания асфальтенов, карбенов и карбонидов битум становится тверже, глубина проникновения (пенетрация) иглы его понижается, а температура размягчения увеличивается. Увеличение количества смол и масел в битуме повышает его пластичность (растяжимость), уменьшает твердость - повышает пенетрацию.

В состав битума входят также парафин, сера и минеральные остатки. При содержании в битуме серы более 2 % увеличивается его хрупкость. Если в битуме имеется более 4 % парафина, то уменьшается сила сцепления его с защищаемым металлом и одновременно повышается его хрупкость при отрицательной температуре. Парафинистые углеводороды при минусовой температуре выкристаллизовываются на поверхность металла и этим ослабляют прилипаемость битума. Битум должен

быть не водонасыщаемым, так как водонасыщаемость влияет на срок службы покрытия трубопровода в грунтовых условиях. Водонасыщаемость, а также наличие вредных примесей парафина и серы зависят от месторождения нефти и соответственно от нефтеперерабатывающего завода — поставщика битума. Содержание в битуме для изоляции трубопроводов серы более 2 %, а парафина более 4 % не допускается.

Большое влияние на свойства изоляционного покрытия подземного трубопровода оказывает присутствие в битуме водорастворимых соединений, которые могут вымываться грунтовыми водами, нарушая сплошность покрытия. Присутствие их в битуме не допускается, а содержание водорастворимых кислот и щелочей должно быть не более 0,2—0,3 %.

По своей структуре битум — полимерное вещество, имеющее длинные цепи молекул. Этим объясняется его высокая пластичность и эластичность в твердом состоянии.

На основе нефтяного битума для изоляции газонефтепроводов изготовляют мастики, грунтовки, рулонные обертки.

Битумные мастики

Мастики изоляционные битумные представляют собой смесь битума с наполнителями и пластификаторами. Для приготовления битумных мастик обычно применяют битум нефтяной изоляционный марок БНИ-IV и БНИ-V. Битум марки БНИ-IV-3 используют в осенне-зимний период на негорячих участках трубопроводов.

Наполнители. Для улучшения физико-механических свойств изоляционных мастик к битумам добавляют различные наполнители в виде порошков. Введение наполнителей в определенных количествах придает мастике большую прочность и вязкость при сохранении достаточной эластичности, делает покрытие менее чувствительным к высоким температурам, повышает сопротивляемость механическим воздействиям и несколько удлиняет срок службы.

К минеральным наполнителям относятся известняк, доломит, молотый асбест и др.

Органический наполнитель — дробленую резину (резиновую крошку) применяют в виде порошка, получаемого дроблением старой амортизированной резины (изношенных покрышек). Содержание текстиля в резине не должно превышать 5 %. Резину дробят до крупности частиц не более 1 мм с последующим просеиванием и магнитной сепарацией металлических включений, так как примеси металлической пыли и загрязняющих включений ухудшают изоляционные свойства мастик. Содержание пыли металлических включений допускается не более 0,1 %. При перевозке и хранении необходимо предохранять резиновую крошку от увлажнения и загрязнения посторонними примесями. Содержание влаги в ней

допускается не более 1,5 %. Примерный состав (в %) резиновой крошки: каучук 50–52, мягчители 6–8, сажа 32–33, окись цинка 2,8–3,5, сера 1,6, текстильное волокно 1,4–4.

В расплавленном битуме резина девулканизируется и одновременно частично растворяется, образуя тончайшую сетку, армирующую покрытие и придающую ему упругоэластические свойства. Для приготовления изоляционной мастики в расплавленный битум добавляют резиновую крошку в количестве 5–10 % по массе смеси.

Температура размягчения при добавлении резиновой крошки, а также и другие свойства – сопротивление разрыву, относительное удлинение, эластичность – повышаются.

Пластификаторы. При проведении работ в зимнее время битумная мастика теряет пластические свойства и становится хрупкой. При этом снижается прочность сцепления покрытия с металлом трубопровода, а также прочность сцепления усиливающей обертки с битумной мастикой, в результате чего в последней могут возникнуть трещины. Во избежание этого для трубопроводов, прокладываемых в осенне-зимнее время, применяют изоляционные мастики с пластифицирующими добавками.

В качестве пластификаторов применяют нефтяные масла – осевое (зимнее северное), зеленое, трансформаторное (3–10 %), а также полимерные вещества (низкомолекулярный полиизобутилен П-20, полидиен, атактический полипропилен и др.). Осевое масло получают из продуктов перегонки нефти трех сортов: "Летнее Л", "Зимнее З" и "Северное С". Зеленое масло – смесь тяжелых продуктов ряда ароматических углеводородов с углеводородами предельного и непредельного рядов. Получают при пиролизе нефтяного сырья. Трансформаторное масло – продукт перегонки нефти сернокислотной очистки. Полиизобутилен П-20 сначала нагревают до температуры 200–220 °С, а затем вводят в количестве 5–7 % в расплавленный и обезвоженный битум или мастику при температуре 160–180 °С. Полидиен – побочный продукт производства синтетического дивинильного каучука. Атактический пропилен – промежуточный продукт полимеризации пропилена.

Битумную мастику изготовляют на трассе и заводах. В условиях трассы для этого применяют битумоплавильную установку, состоящую из битумоплавильного котла и котла-смесителя с передвижной электростанцией. В битумоплавильный котел загружают битум, тщательно очищенный и разбитый на куски (2–3 кг), где он расплавляется и обезвоживается при температуре 160–180 °С, а затем перекачивается в резервуар котла-смесителя. В котле-смесителе включают мешалку и добавляют наполнитель (резиновую крошку) в процессе перемешивания расплавленного битума при температуре 160–180 °С в течение 45–60 мин. Перемешивание продолжается до полного выпаривания влаги, т.е. до прекращения появления пузырьков на поверхности перемешиваемой мастики. Перемешанную и нагретую до температуры 180 °С мастику битум-

ным насосом перекачивают в битумовоз для доставки к месту выполнения изоляционных работ. Для зимних условий в мастику через 40–45 мин после засыпки резиновой крошки в котел и перемешивания мастики добавляют пластификатор (в конце варки). Нагрев битумно-резиновой мастики в котле до температуры свыше 200 °С в течение 1 ч, а свыше 160 °С более 3 ч не допускается, так как это ухудшает ее свойства.

Неблагоприятные условия приготовления мастик в условиях трассы, сложность организации необходимого контроля за ее качеством приводят к удорожанию и снижению свойств мастик. В связи с этим в нашей стране налажено централизованное заводское изготовление битумно-резиновой мастики с использованием горячих битумов, получаемых на заводе. Горячий битум (при температуре 270 °С), подводимый непосредственно из окислительного куба нефтеперерабатывающего завода, поступает в смеситель и, оставаясь жидким при температуре 200–230 °С, смешивается с резиновой крошкой. Масса перемешивается при помощи перегретого пара (300 °С), подаваемого в смеситель. Образующиеся дымовая и паровая завесы ограничивают доступ кислорода к массе, поэтому битум окисляется меньше и медленнее. При перемешивании паром битумно-резиновая масса может выдержать более высокую температуру нагрева. Пар подают через сеть трубок ("паучок"), расходящихся из отверстия на днище смесительного резервуара. При интенсивном перемешивании битумной смеси паром при температуре 200–230 °С обеспечивается более высокая девулканизация резиновой крошки. Деструкция протекает тем глубже, чем лучше контактирует каждая частица резиновой крошки с битумом и теплом. Поэтому мастика заводского изготовления имеет более высокие температуру размягчения и морозостойкость. Готовую мастику упаковывают в оберточную бумагу. Возможна доставка мастики в виде опудренных брикетов, которые в охлажденном виде помещают в крафт-мешки, что позволяет легко отделять мастику от бумаги.

На трассе мастику расплавляют в битумоплавильном котле в течение 2 ч и используют для изоляционных работ.

Битумно-резиновые мастики представляют собой сплав смеси: битума 86–93 %, порошка резины 5–10 % и пластификатора 3–10 %. Применяют главным образом битумно-резиновые мастики заводского изготовления типа МБР (табл. 44 и 45), мастику МБР-90 с температурой размягчения не ниже 90 °С, предназначенную для изоляционных работ в летнее время при температуре 35 – –10 °С; мастику МБР-100 с температурой размягчения не ниже 100 °С, предназначенную для проведения работ в летнее время в южных районах при температуре 40 – –15 °С, а также мастики МБР-75 и МБР-65 с температурой размягчения 75 и 65 °С, применяемые в зимнее время при температуре 15 – –15 °С и 5 – –35 °С соответственно. Таким образом, мастики типа МБР необходимы для нанесе-

Таблица 44. Состав битумно-резиновых мастик, % по массе

Составляющие мастики	МБР-65	МБР-75	МБР-90	МБР-100
Битумы нефтяные изоляционные:				
БНИ-IV	88	88	93	45
БНИ-V	—	—	—	45
Резиновая крошка	5	7	7	10
Пластификатор (зеленое масло)	7	5	—	—

Таблица 45. Основные свойства и условия применения битумно-резиновых мастик

Марка мастики	Температура размягчения по К и Ш, °С, не менее	Растяжимость, см, не менее	Пенетрация (в мм) иглы в 0,1 мм, не менее	Максимальная температура транспортируемого продукта, °С	Допустимая температура окружающего воздуха в момент нанесения мастики, °С, не менее
МБР-65	65	4	40	25	-30
МБР-75	75	4	30	25	-15
МБР-90	90	3	20	35	-10
МБР-100	100	2	15	40	-5

ния на защищаемые поверхности труб при определенных температурах воздуха.

Битумные изоляционные мастики служат в качестве основного защитного слоя в противокоррозионном покрытии трубопроводов, а также в качестве приклеивающего состава для усиливающих и защитных обертоток, применяемых в виде рулонных материалов.

Битумно-полимерные мастики

Улучшения физико-механических свойств битума можно достичь при введении в него полимеров, а также отходов и полупродуктов различных полимеров. Свойства битумно-полимерных мастик в значительной степени зависят также от эффекта контактирования составляющих компонентов и марки применяемого битума. Более активное взаимодействие битума с полимерами происходит при высокой дисперсности сырья (по сравнению с простым смешиванием битума с полимерами) и нагреве до определенной температуры. При высокой температуре смешения и

большой степени дисперсности среды составляющие битума и полимеров легче объединяются, в результате чего происходит улучшение свойств битумно-полимерных мастик.

Освоено промышленное производство новой битумно-полимерной мастики типа "Изобитэп". Битум марки БНИ-IV подают при температуре 220 °С по трубопроводам с нефтеперерабатывающего завода в емкости для хранения, из которых половина расчетного для мастики количества битума поступает в варочный котел-смеситель. Он представляет собой аппарат с рубашкой и двумя перемешивающими устройствами (шнековая и рамная мешалка). Полимерное вещество – термоэластопласт, приготовленный в виде крошки размером 10–15 мм, засыпают в определенном количестве в смеситель при перемешивании битума непосредственно после его загрузки. Через 2 ч варки при температуре 180 °С в смеситель добавляют остальное необходимое количество битума. Перемешивание продолжается еще 2 ч до получения гомогенной системы. Затем мастику сливают и упаковывают в крафт-мешки.

Разработаны составы мастик "Изобитэп-Н" из битума марки БНИ-IV с добавкой термоэластопласта и "Изобитэп-30" из битума марки БНД-60/90 с добавкой термоэластопласта.

Битумная грунтовка (праймер)

Для улучшения прилипаемости изоляционной мастики к металлу сначала на трубопровод наносят битумную грунтовку (праймер), которая представляет собой раствор битума в бензине. Она заполняет неровности металла на поверхности труб и способствует лучшему прилипанию наносимой затем изоляционной мастики. Для приготовления зимней грунтовки применяют битум нефтяной изоляционный марки БНИ-IV или строительный битум марки БН-70/30; для летней грунтовки – БНИ-V или БН-90/10. Для летней и зимней грунтовок используют авиационный неэтилированный бензин при соотношении битума и бензина по массе 1 : 2 или по объему 1 : 3. Для летней грунтовки применяют также автомобильный бензин А-72. Слой грунтовки должен быть равномерным без пузырей и подтеков. Расход грунтовки – 0,1 кг/м²

Более высокими свойствами обладает полимерно-битумная грунтовка типа ГТ-754ИН с ингибитором.

Усиливающие обертки

В качестве усиливающих оберток в битумном изоляционном покрытии газонефтепроводов широко используют стеклохолст, который обладает высокой прочностью и невысокой стоимостью.

Стеклохолст – нетканый стекловолокнистый рулонный материал, например марок ВВ-Г и ВВ-К, состоящий из хаотически расположенных

штапельных стеклянных волокон, скрепленных синтетическим связующим. В качестве связующего используют поливинилацетатную эмульсию, мочевиноформальдегидную или карбамидную смолу, каучуковые латексы, а также композиции из них и других веществ. Стеклохолст обладает хорошими диэлектрическими и механическими свойствами, малой гигроскопичностью и высокой химической стойкостью. Он предназначен для повышения механической прочности, морозостойкости и защитной эффективности битумного покрытия. Стеклохолст марки ВВ-Г изготавливают шириной 400 мм, длиной в рулоне 150–200 м, а стеклохолст марки ВВ-К – шириной 960 мм, длиной в рулоне не менее 170 м. Усилие разрыва продольной полоски шириной 50 мм из стеклохолста марки ВВ-К составляет не менее 100Н, а из стеклохолста марки ВВ-Г – не менее 80 Н. Применяют в качестве усиливающих оберток при температурах воздуха от 30 до –30 °С. Битумная изоляция, армированная рулонным стекловолоконистым материалом, устойчива против бактериальной коррозии и имеет большой срок службы.

Защитные обертки

Для битумных изоляционных покрытий в качестве защитных оберток рекомендуется применять бикарул. Защитные обертки предохраняют изоляционные покрытия от повреждения при укладке и засыпке грунтом трубопроводов.

Бикарул изготавливают толщиной 1 мм, шириной 450 и 500 мм, длиной ленты в рулоне 120 м. Прочность на разрыв бикарула составляет не менее 6 МПа, относительное удлинение не менее 30 %, водопоглощение за 24 ч не более 0,3 %, теплостойкость до 35 °С, морозостойкость не выше –20 °С, температура нанесения и эксплуатации – от –20 до 50 °С.

Типы битумных покрытий

Тип битумного покрытия зависит от удельного электрического сопротивления грунта, а послойный состав – от характера осложненности условий прокладки газонефтепроводов. Применяют нормальный и усиленный типы изоляционного битумного покрытия, выполненные в основном в трасовых условиях (табл. 46). Для городских трубопроводов используют изоляцию усиленного типа общей толщиной 7,5 и 9 мм для труб диаметром соответственно менее 150 мм и свыше 150 мм (мастику наносят в три слоя с промежуточной оберткой стеклохолстом).

Магистральные трубопроводы защищают на трассе битумными покрытиями механизированным способом специальными машинами. Покрытия рекомендуют применять для трубопроводов диаметром менее 820 мм при температуре воздуха в период строительства не более 25 °С.

Т а б л и ц а 46. Типы и послойный состав битумных изоляционных покрытий

Тип изоляционного покрытия	Условия нанесения изоляционного покрытия	Конструкция изоляционного покрытия	Толщина изоляционного покрытия, мм, не менее
Нормальный	Трассовые	Битумно-полимерная грунтовка типа ГТ-754ИН с расходом $\geq 0,1 \text{ кг/м}^2$	—
		Битумно-резиновая мастика или битумно-полимерная типа "Изобитэп" со слоем стеклохолста	4
Усиленный	Трассовые	Защитная обертка – бикарул	0,5
		Битумно-полимерная грунтовка типа ГТ-754ИН с расходом $\geq 0,1 \text{ кг/м}^2$	—
Усиленный	Базовые или трассовые	Битумно-резиновая мастика или битумно-полимерная типа "Изобитэп" со слоем стеклохолста	5,5
		Защитная обертка – бикарул	0,5
		Битумно-полимерная грунтовка типа ГТ-754ИН с расходом $\geq 0,1 \text{ кг/м}^2$	—
		Битумно-резиновая мастика или битумно-полимерная типа "Изобитэп" со слоем стеклохолста	3
		Битумно-резиновая или битумно-полимерная мастика типа "Изобитэп" со слоем стеклохолста	2,5
		Защитная обертка – бикарул	0,5

В отдельных случаях допускается их применение для трубопроводов диаметром 1020 мм. Для нефтепроводов диаметром не более 1020 мм используют также изоляционное покрытие усиленного типа "Пластобит-2М". Его наносят в трассовых условиях. Оно состоит из грунтовки, изоляционной мастики на основе пластифицированного битума (3 мм), усиливающей обертки в виде поливинилхлоридной ленты без слоя клея (0,35 мм) и защитной обертки (0,5 мм).

Цинковые и алюминиевые покрытия

Для повышения качества и долговечности защитных покрытий надземных участков и воздушных переходов магистральных и промысловых трубопроводов от атмосферной коррозии ВНИИСТом разработан газо-

термический метод нанесения цинковых и алюминиевых покрытий на трубы в базовых условиях, а на сварные стыки и дефектные места – в трассовых условиях толщиной не менее 0,25 мм.

Способ газотермического нанесения покрытия представляет собой процесс металлизации распылением, заключающийся в нагреве металла для покрытия до жидкого или пластичного состояния и распыления его на защищаемую поверхность с помощью газовой струи (сжатый воздух). Расплавление и распыление металла для покрытия трубопровода проводят газозлектрическими или газопламенными аппаратами.

Процесс нанесения газотермическим методом цинковых и алюминиевых покрытий на трубы включает в себя следующие операции: тщательную очистку наружной поверхности труб от ржавчины, окалины, жира и других загрязнений; газотермическую металлизацию очищенной поверхности труб цинком или алюминием до получения покрытия заданной толщины; контроль качества покрытия.

Защитные смазки

Для надземных трубопроводов допускается применение покрытий из консистентной (жировой) смазки преимущественно в северных районах страны с температурой воздуха не ниже -60°C . Температура эксплуатации этих участков должна быть не выше 40°C . Известна консистентная смазка "ВНИИСТ-2", состоящая из осевого масла марки З (пластификатор) 60 %, петролатума (ингибитор коррозии) 20 %, защитной ингибиторной смазки НГ-204У (или НГ-203 марки А) 20 %.

Перед употреблением смазку тщательно перемешивают при температуре $50-80^{\circ}\text{C}$ с алюминиевой пудрой ПАК-З, добавляемой в количестве до 20 % от массы смазки. Консистентную смазку применяют при температуре не выше 40°C . Толщина покрытия поверхности трубы жировой смазкой должна быть в пределах 0,2–0,5 мм.

32. ЛАКОКРАСОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Лакокрасочные материалы – поверхностные пленкообразующие покрытия, так как при нанесении их на какую-нибудь поверхность они способны высыхать с образованием твердой эластичной пленки. Их широко применяют для защиты от коррозии наружной и внутренней поверхности газонефтепроводов, резервуаров, различных подземных, надземных и подводных строительных конструкций и т.д.

Процесс полимерного пленкообразования на поверхности труб заключается в переходе растворов или расплавленных пленкообразователей в аморфное твердое (стеклообразное) состояние. Пленкообразующее покрытие – сравнительно тонкий защитный слой.

В состав лакокрасочных материалов входят пленкообразующее вещество, наполнитель, пигмент, растворитель. В качестве пленкообразующих веществ применяют: высыхающие масла (главным образом растительные); группу олиф, представляющих собой предварительно обработанные масла; синтетические и натуральные каучуки; синтетические искусственные и природные смолы; некоторые продукты переработки нефти, которые характеризуются высокой полимеризационной способностью при обычных условиях (при небольшом повышении температуры) и т. д. Другую группу пленкообразующих веществ составляют лаки, представляющие собой растворы природных высокомолекулярных и синтетических полимерных веществ в том или ином летучем растворителе.

Полимерные пленкообразователи могут быть превращаемыми, непревращаемыми и смешанными. Превращаемыми пленкообразователями считаются такие, при которых образование пленки происходит в процессе реакций полимеризации, поликонденсации или обеих реакций непосредственно в нанесенном слое покрытия. Непревращаемыми пленкообразователями считаются такие при которых пленкообразователь наносят в виде раствора не защищаемую поверхность и он образует пленку в процессе коагуляции или испарения растворителя. Смешанными называются пленкообразователи, действующие частично по принципу превращаемых и непревращаемых.

В качестве полимерных пленкообразователей используют фенольноформальдегидные, мочевино- и меламиноформальдегидные смолы, полистирол, прерхлорвинил, эфиры целлюлозы и другие полимерные материалы.

Защитные покрытия выполняют многослойными, так как покровный материал не может давать беспористого слоя по условиям полимерного пленкообразования. Процессы испарения растворителя (для непревращаемых пленкообразователей) или удаления летучих (для превращаемых пленкообразователей) протекают после образования в первый момент внешней гелеобразной полимерной корочки (пленки). При этом молекулы растворителя или паров вынуждены проходить сквозь пленку, образуя мелкие поры, или оставаться под пленкой, снижая адгезию пленки к покрываемой поверхности трубы.

Лакокрасочные материалы для наружной поверхности труб

Лакокрасочные материалы подразделяют на крунтовки и покровные эмали и лаки. Наносят их на поверхность трубопровода разбрызгиванием при помощи пневматических краскораспылителей КРУ-1, 0-45 под давлением 0,2–0,3 МПа. Необходимую вязкость лакокрасочным материалом придают, добавляя к ним соответствующие растворители. Растворитель уменьшает вязкость смол и увеличивает их смачивающую способность.

Для надземных трубопроводов применяют грунтовки вязкостью 20–22 с повискозиметру ВЗ-4 марок ФЛ-03 и ФЛ-013 на основе феноло-формальдегидной смолы, растворитель – сольвент каменноугольный; ХС-010 на основе сополимера хлорвинила и винилденхлорида (спола СХВ-40), растворитель Р-4; ВЛ-08 на основе поливинилбутиралево-й смолы, растворитель ОВЛ-08 (фосфатирующие грунтовки и др. Окрашивают надземные трубопроводы покровными эмалями и лаками вязкостью 17–19 по визкозиметру ВЗ-4, изготовленными на основе перхлорвинило-вой смолы (эмали ХВ-125 и ХВ-124, лак ХСЛ), пентафталево-й смолы (лак № 170) и др. Растворителем для перхлорвинило-вой смолы служит Р-4. Пентафталево-ый лак растворяют сольвентом каменноугольным.

Для газопроводов, прокладываемых в условиях Крайнего Севера, применяют указанные грунтовки, а в качестве покровных материалов – перхлорвинило-ый лак ХСЛ и пентафталево-ый лак № 170, обладающие высокой морозостойкостью. Лакокрасочные покрытия инертны к металлу и устойчивы в неорганических кислотах и щелочах, обладают хорошей вязкостью, гибкостью и адгезионными свойствами.

Лакокрасочные покрытия состоят из двух-трех слоев грунтовки и двух слоев эмали или лака с добавлением в последний (верхний) слой во всех случаях 10–15 % по массе алюминиево-й пудры ПАК-3 или ПАК-4. Общая толщина покрытия должна быть не менее 0,2 мм.

Лакокрасочные покрытия наносят непосредственно на трассе и на полустационарных установках. Для получения качественного и долговечного покрытия поверхность стальных труб тщательно очищают от окалины, ржавчины, масляных и других загрязнений, обезжиривают бензином и просушивают. В полустационарных условиях трубы очищают дробеструйным аппаратом или химическим способом в 10–20 %-ной соляно-й кислоте с последующей нейтрализацией щелочными растворами, промывкой водой и просушкой. После очистки наносят распылением грунтовку и покровные эмали с промежуточной сушкой каждого слоя.

Лакокрасочные материалы для внутренней поверхности труб

Защитный слой на внутренней поверхности труб повышает гладкость их стенок, уменьшая шероховатость и гидравлическое сопротивление, обеспечивает большую производительность транспортирования продуктов на 8–10 % и предохраняет металл труб от коррозионного воздействия рабочих сред. Технологический процесс нанесения покрытий включает множество операций по подготовке поверхности трубы, грунтовке, нанесению нескольких слоев (не менее пяти-шести) покрытия с сушкой или термообработкой каждого слоя.

Для защитных покрытий, наносимых на внутреннюю поверхность трубопроводов, применяют различные материалы: бакелитовый лак марки А в сочетании с алюминиево-й пудрой в количестве 7 % (на су-

хое вещество) и растворителем; лакокрасочные грунтовки и эмали на основе синтетических смол (перхлорвиниловой, эпоксидной, поливинилбутиралевоы и т.д.). Наиболее широко известны лакокрасочные покрытия на основе эпоксидных смол ЭД-16 и ЭД-20, эпоксидных лаков Э-4100, Э-4001, эпоксидных шпатлевок ЭП-00-10 и других, которые обладают очень высокой адгезией к металлу, термо- и химической стойкостью и другими ценными свойствами.

В композиционный состав лакокрасочного покрытия входят отвердитель, пластификатор, наполнитель и растворитель. Перед нанесением покрытия на 100 % эпоксидных веществ вводят отвердитель (гексометилендиамин, полиэтиленполиамин и др.) в количестве: в смесь шпатлевки ЭП-00-10 с лаком Э-4001 — 7 %, в лак Э-4001 — 7 %, в эмаль ОЭП-4171 — 3,5 % и в лак Э-4100 — 3 %. В качестве наполнителя добавляют, например, 0,5 частей (по массе) окиси хрома на 100 частей эпоксидных веществ. Растворитель (Р-40, Р-5, Р-4 и др.) вводят в количестве до 20–60 частей, пластификатор (трикрезилфосфат) — до 10 частей.

Общий слой эпоксидного покрытия имеет толщину 325–450 мкм. Состоит он из четырех последовательно наносимых слоев. После нанесения очередного слоя трубу поворачивают на 90°. Покрытие полностью твердеет при воздушной сушке в течение нескольких суток, а при нагреве до 120–130 °С — за 2–3 ч.

В СКБ "Газстроймашина" разработана базовая установка для внутренней изоляции труб бакелитовым лаком, во ВНИИСПНефти — методика нанесения эпоксидных лакокрасочных покрытий в трассовых условиях с помощью очистных пробок и покровных поршней, перемещаемых механическим или пневматическим способом (рис. 95).

На строительстве трубопроводов объединения "Татнефтьстрой" внутреннюю поверхность труб покрывали на стеллажах с применением разработанной ими каретки на роликах с переоборудованным пистолетом-распылителем (форсункой). Под действием реактивной силы пистолета-распылителя и за счет выборки из трубы шлангов каретка перемещается от одного конца плети труб длиной 60 м до другого, нанося лакокрасочное покрытие на внутреннюю поверхность. Перед нанесением покрытия внутреннюю поверхность труб очищают от грязи и загрязняющих предметов при помощи пробки с ершом, протаскиваемых через плеть. Затем плеть трубопровода моют раствором, состоящим, например, из ортофосфорной кислоты — 50 г/л, соляной кислоты — 50 г/л, поверхностно-

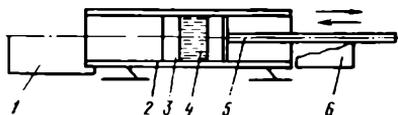


Рис. 95. Схема нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубы:

1 — ловушка; 2 — труба; 3 — поршень; 4 — защитный материал; 5 — штанга-толкатель; 6 — направляющее устройство

активных веществ ОП-7 или ОП-10 – 3 г/л, карбоксиметилцеллюлозы – 3 г/л и бензино-растворителя (или уайтспирита) – 300 г/л. Моющий раствор наносят на поверхность труб при помощи каретки с пистолетом-распылителем. Затем поверхность труб промывают водой с добавлением ингибитора коррозии (например, 0,1 % бихромата калия) во избежание ржавления металла, после чего снова протаскивают пробку со стальным ершом и далее сушат поверхность труб сжатым воздухом. На подготовленную таким образом поверхность труб наносят лакокрасочное покрытие.

Разработаны эпоксидные композиции для внутренней поверхности труб без применения растворителя.

К недостаткам противокоррозионной защиты лакокрасочными покрытиями относят то, что не всегда удается получить равномерный слой лака или краски на внутренней поверхности длинной трубы небольшого диаметра. Пленочные полимерные покрытия во многих случаях оказываются недостаточно стойкими и долговечными на трубопроводах, предназначенных для различных сред, содержащих твердую фазу, оказывающую эрозийное воздействие. Срок службы покрытий, например, на основе превращаемых смол даже в атмосферных условиях не превышает 2–4 лет, а покрытие на основе непревращаемых фенольных глифталевых смол – не более полугода.

Лакокрасочные материалы для металлических резервуаров

Для защиты от коррозии наружную поверхность корпуса и кровлю резервуаров, лестницы, ограждения и наружную часть понтона или плавающей крыши защищают сплошной пленкой лакокрасочного водостойкого и светоотражающего покрытия. Нижнюю поверхность днища предохраняют от агрессивного воздействия воздуха, почвы и почвенной воды изолирующим гидроизоляционным слоем, который создают в основании резервуара из компонентов специального состава.

Внутреннюю поверхность корпуса, понтона и плавающей крыши резервуара защищают от агрессивного воздействия паров нефти и нефтепродуктов различными лакокрасочными материалами и другими способами. В зависимости от коррозионной агрессивности среды применяют следующие виды защитных покрытий обычно холодного отверждения.

Покрытия на основе виниловых смол применяют в виде эмалей ХС-710, ВЛ-515, лаков ХВ-77, ХС-76 и др. Покрытие на основе виниловой эмали ХС-710 состоит из одного слоя грунтовки ХС-010, двух слоев эмали ХС-710 и двух слоев лака ХС-76. Эмаль ХС-710 представляет собой раствор виниловой смолы ВХВД-40, титановых белил и технического углерода (сажи) в органических растворителях. Грунтовка ХС-010 – раствор

виниловой смолы с тальком, железным суриком и свинцовым кроном в органических растворителях, а лак ХС-76 — раствор виниловой смолы в органических растворителях.

Грунтовку, эмаль и лак наносят пневматическим распылением, доводя напыляемый материал до рабочей вязкости добавлением растворителя Р-4. Толщина покрытия составляет 85–100 мкм.

Каждый слой грунтовки, эмали и лака сушат при температуре 15–20 °С в течение 24 ч, а затем выдерживают законченное покрытие в течение 5–7 сут.

Покрытие на основе эмали ВЛ-515 наносят без подогрева из четырех слоев или с подогревом до температуры 70–75 °С — из двух слоев.

Эмаль ВЛ-515 представляет собой раствор поливинилбутиральной и крезолоформальдегидной смол в смеси органических растворителей с добавкой талька и др. Покрытие эмалью ВЛ-515 наносят пневматическим распылением или обливом. Для получения необходимой вязкости эмаль ВЛ-515 разводят растворителем Р-60. Покрытия получают при холодной (15–20 °С) и горячей (120 °С) сушке. Каждый нанесенный слой при холодной сушке отверждается в течение 24 ч, при горячей — в течение 1 ч.

Покрытия на основе эмалей Х-710 и ВЛ-515 имеют высокую стойкость к нефтепродуктам при температуре от –50 до 50 °С.

Покрытия на основе перхлорвинилового лака ХВ-77 применяют для защиты внутренней поверхности резервуаров под светлые нефтепродукты после пескоструйной очистки.

Известны *полиуретановые покрытия* на основе лака УР-976 и красок ХС-717 и ХС-720. Покрытие на основе лака УР-976 состоит из двух слоев грунтовки УР-01 и трех слоев лака УР-976. Полиуретановую грунтовку УР-01 изготавливают из полуфабриката — дисперсии железного сурика, цинкового крона и талька в растворе полиэфирной смолы и отвердителя непосредственно перед применением. Полиуретановый лак УР-976 составляют также из двух компонентов: полуфабриката — раствора полиэфирной и фенолоформальдегидной смол в циклогексаноне и отвердителя непосредственно перед применением. Грунтовку и лак наносят распылением. Каждый слой грунтовки сушат при температуре 15–20 °С в течение 1 ч, а каждый слой лака — 3–4 ч. Затем покрытие выдерживают при температуре 18–23 °С в течение 7 сут. Общая толщина покрытия составляет 55–75 мкм. Покрытие стойко по отношению к нефтепродуктам при температуре от –50 до 50 °С, растворителям и другим химическим веществам.

Полиуретановое покрытие на основе краски ХС-717 наносят в три-четыре слоя без грунтовки или по одному слою грунтовки ВЛ-023. Краска ХС-717 представляет собой раствор частично омыленного сополимера хлористого винила с винилацетатом в смеси органических растворителей с добавкой алюминиевой пудры ПАК-3 (пигмент) и отвердителя ДГУ.

Краску ХС-717 готовят за 0,5–1 ч до ее нанесения пневматическим распылением или кистью. Для получения необходимой рабочей вязкости ее разводят растворителем Р-4.

Общая толщина покрытия составляет 100–120 мкм. При нанесении каждый слой краски сушат при температуре 15–20 °С в течение 2 ч, а при температуре 10––5 °С в течение 4 ч. После нанесения покрытие выдерживают при температуре 18–23 °С в течение 5–7 сут. Краска стойка к воздействию нефтепродуктов, бензола, этилового спирта, холодной и горячей воды, водяного пара.

Покрытие на основе краски ХС-720 состоит из одного слоя фосфатирующей (ВЛ-02, ВЛ-08 или ВЛ-023) или акриловой (АК-070) грунтовки и трех слоев краски 720. Краска ХС-720 – алюминиевая. Она представляет собой суспензию алюминиевой пудры ПА3-3 или ПАК-4 в лаке ХС-720. Лак и пудру смешивают перед нанесением.

После нанесения слой грунтовки ВЛ-02, ВЛ-08 или ВЛ-023 сушат при температуре 15–20 °С в течение 15–30 мин, а слой грунтовки АК-07 – в течение 1 ч. Сушку каждого слоя краски осуществляют при температуре 15–20 °С в течение 1 ч. Общая толщина покрытия составляет 80–120 мкм. После нанесения покрытие выдерживают в течение 5–7 сут при температуре 15–20 °С. Покрытие стойко к нефтепродуктам.

Покрытия на основе эпоксидных смол изготавливают из эмалей ЭП-56, лака ЭП-741, красок эмалевых ЭП-755, эмалей ФЛ-777, а также смол ЭД-20 и ЭД-16, шпатлевки ЭП-00-10 и эмали ЭП-140.

Покрытие на основе эмали ЭП-56 состоит из одного слоя фосфатирующей грунтовки ВЛ-08 и трех слоев эпоксидной эмали ЭП-56, которую готовят на основе лака ЭП-55, представляющего собой раствор смолы Э-41 в смеси бутилацетата, ацетона и ксилола. В эмаль вводят отвердитель перед нанесением. Грунтовку и эмаль наносят пневматическим распылителем. После нанесения грунтовку сушат при температуре 15–20 °С в течение 15–30 мин, а каждый слой эмали – в течение 24 ч. Затем покрытие выдерживают при температуре 15–20 °С в течение 5–7 сут. Общая толщина покрытия составляет 80–90 мкм. Покрытие стойко к воздействию нефтепродуктов при температуре –50–50 °С

Покрытие на основе шпатлевки ЭП-00-10 и лака ЭП-741 состоит из четырех слоев их смеси. Эти смеси (70 % шпатлевки и 30 % лака) по массе имеют три различных состава в зависимости от количества разбавителя Р-40 и красителя. Отвердитель и разбавитель вводят непосредственно перед нанесением. Сначала наносят краскораспылителем смесь одного состава. Затем последовательно наносят второй и третий составы. После сушки каждого слоя при температуре 18–23 °С в течение 3 сут наносят слой лака ЭП-741 и сушат его в течение 7 сут. Общая толщина четырехслойного покрытия составляет 150–200 мкм. Покрытие стойко

к воздействию различных нефтепродуктов при температуре от $-50-100^{\circ}\text{C}$.

Покрытие на основе эпоксидно-этинолевых красок состоит из одного слоя фосфатирующей грунтовки ВЛ-02, ВЛ-08 или ВЛ-023 и трех слоев краски ЭП-755. Краска имеет различные цвета. Она представляет собой суспензию пигментов и наполнителей в эмульсии эпоксидной смолы ЭД-20, ЭД-16 или Э-40 и этинолевого лака с добавкой эмульгатора, пластификатора и других веществ. Краски поставляют в комплекте с отвердителем, который вводят перед нанесением на защищаемую поверхность.

При нанесении каждый слой краски сушат при температуре $15-20^{\circ}\text{C}$ в течение 36 ч. Общая толщина покрытия составляет $80-120$ мкм. После нанесения покрытие выдерживают при температуре $15-20^{\circ}\text{C}$ в течение 5–7 сут.

Покрытие на основе эпоксидной эмали состоит из трех слоев эмали ФЛ-777, представляющей собой суспензию пигмента и наполнителя в эпоксидно-бакелитовой композиции смол и смеси растворителей. Поставляют ее в виде трех компонентов: полуфабрикат эмали ФБ-777, бакелитовый лак и алюминиевая пудра ПАП-2, которые смешивают перед употреблением. Третий слой эмали наносят без алюминиевой пудры. Каждый слой эмали сушат при температуре $15-20^{\circ}\text{C}$ в течение 24 ч или при температуре 60°C в течение 2 ч. После нанесения покрытие выдерживают при температуре $18-23^{\circ}\text{C}$ в течение 7–10 сут. Общая толщина покрытия составляет $100-120$ мкм.

На основе смол ЭД-20 и Э-16 известно большое количество композиций эпоксидных покрытий в зависимости от назначения. Например, применяют для внутренней поверхности вертикальных и горизонтальных резервуаров трехслойное покрытие на основе эпоксидных смол ЭД-20 и ЭД-16 с добавлением стирола, слюдяной муки, белой сажи и полиэтиленполиамиона. Общая толщина трехслойного покрытия равна $200-250$ мкм. Недостаток составов этого покрытия — токсичность из-за полиэтиленполиамиона.

Предложены составы композиций на основе эпоксидных смол ЭД-20 и ЭД-16 с добавлением трикрезилфосфата и гексаметилендиамиона или полиэтиленполиамиона, а также растворителей и алюминиевой пудры. Эти покрытия наносят толщиной $300-350$ мкм. Они предназначены для внутренней поверхности резервуаров, труб и трубопроводов.

Покрытие на основе эпоксидной шпатлевки ЭП-00-10 состоит из трех слоев. В состав шпатлевки входят два компонента: полуфабрикат в виде дисперсии талька и редоксаида в растворе эпоксидной смолы Э-40 с добавкой дибутилфталата и отвердитель № 1. При нанесении каждый слой шпатлевки сушат при температуре $15-20^{\circ}\text{C}$ в течение 24 ч. После нанесения покрытие выдерживают при температуре $18-23^{\circ}\text{C}$ в течение 7–10 сут. Общая толщина покрытия составляет $80-100$ мкм. Такое покрытие стойко к нефтепродуктам и нефти при температуре $-50-100^{\circ}\text{C}$.

Покрытие на основе эмали ЭП-140 наносят в три-четыре слоя без грунтовок или по двум слоям грунтовок ЭП-076 (ЭП-090) с тремя слоями эмали. Эмаль ЭП-140 — суспензия пигментов и наполнителей в растворе эпоксидной и низкомолекулярной полиамидной смолы. Ее поставляют в виде двух компонентов: окрашенной пасты ЭП-140Т и отвердителя № 2 или № 4 для алюминиевой эмали. Смешивают эти компоненты при применении.

Грунтовку также поставляют в виде двух компонентов, как и эмаль и смешивают их при нанесении. Каждый слой грунтовок и эмали сушат при температуре 15–20 °С в течение 6 ч, а затем выдерживают изделие при температуре 18–23 °С в течение 10–12 сут.

Общая толщина покрытия составляет 80–100 мкм. Оно стойко к нефтепродуктам и нефти.

Покрытия на основе эпоксифурановых смол. Смолы типа ФАЭД — термореактивные смолы горячего отверждения. Возможно их холодное отверждение при температуре 18–20 °С в присутствии щелочных катализаторов.

Композиции для покрытий приготавливают из смеси смол типа ФАЭД (ФАЭД-8 и ФАЭД-10) с ацетоном (при интенсивном перемешивании), с добавлением затем алюминиевой пудры (для окраски внутренней поверхности резервуара) или портландцемента (для окраски сварных швов резервуара). Перед применением вводят отвердитель (полиэтиленполиамин). Композиции наносят в два слоя, сушат при температуре 15–20 °С в течение 24–48 ч до "отлипа", а затем покрытие выдерживают при температуре 15–20 °С в течение 20–30 сут. Общая толщина покрытия внутренней поверхности крыши, перекрытий, корпуса и днища резервуара составляет 100–150 мкм и сварных швов — 200–300 мкм. Покрытие стойко к нефтепродуктам. Недостаток композиции — их малая жизнеспособность, неприятный запах и токсичность.

Этинолевые покрытия на основе лака этиноль и этинолевых эмалей ВН-780 и ВН-78 отверждаются даже при отрицательных температурах (до –20 °С) и обладают высокой стойкостью к действию нефтепродуктов, кислот, щелочей.

Лак этиноль — раствор полимера дивинилацетилена; этинолевая эмаль ВН-780 представляет собой дисперсию железного сурика в лаке этиноль, а эмаль ВН-78 — алюминиевой пудры в лаке этиноль. Этинолевое покрытие наносят из трех слоев эмали ВН-780, двух слоев алюминиевой эмали ВН-78 и одного слоя лака этиноль. Общая толщина покрытия составляет 150–200 мкм.

Перед нанесением эмали и лак разводят растворителем. Отверждение покрытия происходит при температуре не ниже –20 °С. Второй и все последующие слои наносят при небольшом "отлипе", но не позже чем через 18 ч летом и 48 ч зимой. После окончательного нанесения по-

крытие выдерживают в течение 3–5 сут летом и 10–15 сут зимой. Покрытие обладает склонностью к старению, оно становится хрупким под влиянием света.

Для рассмотренных покрытий применяют различные виды подготовки защищаемой поверхности: механический способ, химический способ, с помощью преобразователей ржавчины. Наилучшие результаты достигаются обычно при пескоструйной очистке.

Армированные полимерные покрытия представляют собой композиционный материал, состоящий из наполнителя в виде стеклянных, синтетических, хлопчатобумажных тканей, сеток или волокон, пропитанных полимерным материалом. Наиболее известны армированные покрытия на основе ненасыщенных полиэфирных и эпоксидных смол. Их применяют для защиты внутренней поверхности днища и нижнего пояса вертикальных резервуаров, а также нижней части горизонтальных резервуаров от механических повреждений при удалении из резервуаров шлама и других загрязнений. В случаях сквозной коррозии днища или нижней части резервуара эти покрытия могут обеспечить герметичность и высокую прочность (до 260 МПа).

Покрытие на основе ненасыщенных полиэфирных смол ПН-1 или ПН-2 включает в себя грунтовочный, покрывный и отделочный слои. Грунтовочный слой готовят на основе смолы ПН-1 или ПН-2 с добавлением инициатора (гидроперекись кумола) и ускорителя (нафтенат кобальта) для полимеризации при комнатной температуре. В грунтовку вводят также смесь слюдяной муки и белой сажи при тщательном их перемешивании. Грунтовку наносят на защищаемую поверхность кистью и сушат при температуре 15–20 °С в течение 48 ч.

Покрывный слой покрытия включает грунтовочный слой и слой армирующего материала, пропитанного полиэфирной смолой ПН-1 или ПН-2.

Сначала наносят грунтовку указанного выше состава, а затем по ней выкладывают внахлест раскроенные и предварительно пропитанные полиэфирной смолой полотнища армирующего материала.

В случае применения рубленых стеклянных волокон их смешивают с полиэфирной смолой и наносят на защищаемую поверхность пневматическим распылением. После укладки армирующего материала его прикатывают резиновыми или пластмассовыми роликами для получения плотного покрытия без пузырей, складок и других дефектов. Отверждение покрытия происходит при температуре 15–20 °С в течение 48 ч. После этого на отвержденное покрытие наносят отделочный слой, состоящий из тех же компонентов, как и грунтовка, но без добавления белой сажи. Готовят его аналогично грунтовке перед нанесением.

Покрытие на основе эпоксидных смол состоит также из грунтовочного, покрывного и отделочного слоев. Наносят его по аналогичной технологии. Грунтовку готовят из эпоксидной смолы ЭД-20 или ЭД-

16, в которую вводят стирол, полиэтиленполиамин и смесь слюдяной муки и белой сажи. Наносят ее на поверхность слоем 250–300 мкм и сушат при температуре 15–20 °С в течение 12–15 ч.

Покрывный слой включает грунтовочный слой и слой армирующего материала, пропитанного смолой ЭД-20 или ЭД-16. Продолжительность отверждения составляет 12–15 ч при температуре 15–20 °С. Отделочный слой имеет такой же состав, как и грунтовка, но без добавления белой сажи. Сушат его при температуре 15–20 °С в течение 12–15 ч.

Полиэфирные и эпоксидные армированные покрытия имеют толщину грунтовочного слоя 250–300 мкм, отделочного слоя – 200–250 мкм и общую толщину покрытия – 1,3–1,5 мм. Они являются стойкими к длительному воздействию нефтепродуктов при температуре от –50 – 50 °С, отличаются высокой прочностью и твердостью.

Покрытия наносят на подготовленную механическим или химическим методами поверхность.

Внешние части резервуаров окрашивают в светлые серебристые тона, хорошо отражающие солнечные лучи, уменьшающие нагревание резервуаров, что снижает испарение нефтепродуктов.

Перед нанесением покрытия поверхности тщательно зачищают пескоструйным методом с последующей обдувкой сжатым воздухом. Процесс нанесения антикоррозионного покрытия осуществляют также пневматическими краскораспылителями.

33. СТЕКЛЯННЫЕ ПОКРЫТИЯ

Стеклозные покрытия наносят двумя методами: стеклоэмалированием и остеклованием (стеклянными баллонами, стеклянным порошком и др.).

Стеклоэмалевые покрытия

Стеклоэмаль представляет собой неорганическое стекло или спекшуюся (фриттованную) силикатную массу, которую наносят на поверхность металлических изделий в тонкоизмельченном состоянии и закрепляют на ней посредством обжига в виде тонкослойного покрытия. Процесс нанесения и закрепления эмалевого покрытия на предварительно подготовленную поверхность изделий называется эмалированием.

Различают два вида эмалей: грунтовые, которые наносят непосредственно на поверхность металла, и покрывные, наносимые на предварительно покрытые грунтом (загрунтованные) изделия.

Исходные шихты для покрытий, называемые фриттами, представляют собой сплавленные (фриттованные) стекла. Компоненты фритт – кварцевый песок, полевой шпат, бура, сода кальцинированная и др. (табл. 47).

Для получения стеклоэмалевых покрытий на стальных изделиях из исходной фритты составляют шликер. Для этого во фритту вводят добавки в виде молотого кварцевого песка, глины, буры и воды в определенных количествах. Например, шликер грунта включает: 30 кг фритты грунтовой эмали марки 3132 и 70 кг эмали марки 2015; 30–40 кг

Т а б л и ц а 47. Состав некоторых фритт грунтовых и покрывных эмалей для стальных изделий, кг

Компоненты	Грунтовые эмали		Покрывные эмали		
	3132	2015	105-Т	2/3	143
Песок кварцевый SiO_2	34	12	44,4	35,1	51
Полевой шпат $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	3,9	37	–	24,2	11,6
Калци $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	–	–	7,9	–	–
Бура $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	57,6	33,2	5,1	2,9	4,7
Сода кальцинированная	–	–	23,5	21,6	11,1
Поташ K_2CO_3	0,3	–	–	2,6	4,1
Селитра натриевая NaNO_3	–	6,1	–	3,3	3,5
Плавиновый шпат CaF_2	–	–	–	1,7	1,9
Кремнефтористый натрий Na_2SiF_6	–	3,4	5,5	–	–
Мел CaCO_3	1,5	6,3	6,3	3,2	7,5
Оксид цинка ZnO	–	–	–	3,4	–
Оксид кобальта Co_2O_3	1,6	0,5	0,8	–	0,1
Оксид никеля Ni_2O_3	0,5	0,4	–	–	0,1
Пиrolюзит MnO_2	0,6	1,2	–	–	0,3
Оксид титана IV TiO_2	–	–	6,5	2	3,8
Оксид хрома Cr_2O_3	–	–	–	–	0,3

молотого песка, 6 кг глины; 0,5 кг буры и 50 кг воды. Шликер эмали составляют из 100 кг фритты покрывной эмали марки 105Т, 5 кг глины и 45 кг воды.

Фритты измельчают в шаровых мельницах мокрым способом до такой степени помола, когда дальнейшее измельчение не дает заметного ее изменения, и вводят в них измельченные добавки для получения шликера. Для увеличения способности шликера подвешивать составляющие его частицы и повышения его устойчивости в него вводят добавки, являющиеся хорошими электролитами для шликеров, например, буру, азотно- и азотистокислые соли калия и натрия и др.

Эмалирование труб осуществляют как с наружной, так и с внутренней поверхности в заводских условиях. Эмалированные трубы обладают высокой химической и эрозийной стойкостью против действия движущихся частиц. При эмалировании внутренней поверхности труб пропускная способность трубопроводов возрастает на 6–10 % благодаря высокой гладкости стенок.

Основной недостаток стеклоэмалевых покрытий – высокая их хрупкость. Соблюдая осторожность в процессе перевозки труб со стеклоэмалевым покрытием, их следует применять при прокладке трубопроводов в агрессивных грунтах, на "горячих" участках трубопроводов.

Эмалирование заключается в покрытии очищенной трубы стеклоэмалевым шликером, последующем его просушивании и оплавлении (обжиге).

Покрытие, например, на основе эмали 105Т включает грунтовочный и покрывной слои. Грунтовочный слой наносят из смеси грунтов № 2015 (70 %) и № 3132 (30 %) и оплавляют при температуре 940–960 °С. Покрывную эмаль в виде стеклоэмалевого шликера наносят на поверхность труб методом окунания или методом распыления в электростатическом поле коронного разряда (предложено ВНИИСтОм). Оплавляют шликер индукционным нагревом трубы примерно до температуры 850 °С с помощью кольцевого индуктора. При одностороннем эмалировании нагрев проводят на небольшую глубину, при двухстороннем – на всю толщину стенок.

Толщина стеклоэмалевого покрытия должна быть не менее 0,5 мм. На трассе стыки труб можно эмалировать с помощью передвижной эмалировочной установки, которая очищает сварной шов от окалины (шлифовальным кругом), наносят стеклоэмалевый шликер (ручным пистолетом), сушит его и оплавляет (высокочастотным индуктором с образованием сплошного стеклоэмалевого покрытия). При помощи этой установки также можно исправить дефекты покрытия, возникающие при перевозке эмалированных труб к месту укладки.

Остеклование труб

Положительные свойства стеклянных покрытий – высокие чистота поверхности, антикоррозионная стойкость, прочность, теплостойкость и микротвердость. Поэтому у нас в стране и за рубежом остеклованные трубы применяют для систем теплофикационных сетей, перекачки агрессивных сред, газонефтепроводов, а также в теплообменниках, конденсаторах и т.д. В СССР для промышленных труб нефтяного сортамента распространен способ однослойной технологии остеклования с использованием стеклянных цилиндрических баллонов – баллонное остеклование.

Промышленное остеклование труб включает: подготовку поверхности труб путем отжига с последующей пневматической продувкой и пропуском механического ерша, изготовление стеклянных баллонов из стеклянных труб путем запайки их торцов и остеклование труб с помощью баллонов путем нагрева. Остеклование проводят в электрической печи. Подготовленные трубы подают на рольганги нагревательных печей, где в трубы устанавливают стеклянные баллоны. В зоны нагрева печи, под действием давления нагретого воздуха в герметично запаянном баллоне, размягченная стеклянная оболочка прижимается к внутренней поверхности стальной трубы, футеруя ее. Нагрев осуществляют последовательным проталкиванием трубы со стеклянным баллоном через зону нагрева с температурой 650–720 °С.

В некоторых случаях при подготовке стеклянного баллона в него помещают жидкое или твердое газообразующее вещество для создания дополнительного избыточного давления в процессе нагрева при остекловании и осуществления лучшего прилегания стеклянной оболочки к трубе. На некоторых установках дополнительно вовнутрь стеклянного баллона вдувают воздух от внешнего источника с этой же целью.

Известны поточные многобаллонные технологические линии по остеклованию труб и другие установки.

Применение остеклованных насосно-компрессорных труб дает экономический эффект за счет снижения подземных ремонтов скважин.

В США разработан метод остеклования труб для нефтепромысловых трубопроводов сырой нефти. Трубы остекловывают изнутри при подаче стеклянного порошка с помощью шнекового устройства. Трубу помещают в нагревательную печь, в которой поддерживают температуру 909 °С, и вращают на роликовом стенде. Шнековое устройство, находящееся внутри трубы, и вращение трубы на роликах обеспечивают равномерное распределение расплавленного стеклянного порошка по внутренней поверхности трубы толщиной 0,23–0,3 мм. Затем трубу перемещают в зону печи с более низкой температурой, где нанесенная стеклянная масса остывает, после чего наносят второй слой покрытия тем же способом. Общая толщина стеклянного покрытия до 0,5 мм. После нанесения второго слоя покрытия трубу выдерживают при температуре 862 °С в течение 8 мин,

а затем остужают при непрерывном ее вращении. Готовую трубу испытывают на электрическую прочность покрытия под напряжением 1000 В. Покрытие устойчиво к воде, сырой нефти и кислотам (кроме плавиковой) до температуры 110 °С. На его поверхности не наблюдается отложения парафина.

В полевых условиях трубы стыкуют в плети при помощи сварки, на резьбе и клею. При сварке стеклянное покрытие удаляют на конце трубы длиной 6,4 мм.

34. СТАЛЬНЫЕ ФУТЕРОВАННЫЕ ТРУБЫ

Футерованные пластмассой бесшовные горячекатаные трубы из малоуглеродистой стали очень долговечны. Для футеровки применяют термопластичные полимерные материалы.

В футерованных стальных трубах термопласты, благодаря наличию прочной и жесткой стальной оболочки, частично освобождаются от механических нагрузок. Поэтому футерованные трубы работают в условиях агрессивных сред при значительно более широких диапазонах температур и давлений, чем обычные пластмассовые трубы. Футерованные трубы не повреждаются от случайных ударов, как это свойственно пластмассовым. Они являются в ряде случаев заменителями дорогостоящих труб из высоколегированных (нержавеющих) сталей и цветных металлов и сплавов. Несмотря на ряд достоинств, футерование долгое время не находило большого распространения в производстве, так как способы футерования были нетехнологичными, трудоемкими, не всегда обеспечивающими требуемое качество труб.

Известный способ — футерование стальных труб постепенным проталкиванием разогретой трубы из поливинилхлорида (винипласта) вовнутрь стальной. Диаметр поливинилхлоридной трубы берут несколько больше внутреннего диаметра стальной трубы, так как поливинилхлорид при нагревании дает усадку. Для поддержания постоянной температуры пластмассовой трубы стальную трубу предварительно нагревают до температуры 110–120 °С, а пластмассовую нагревают постепенно, по мере проталкивания отдельными участками (150–200 мм).

Футерованные поливинилхлоридом стальные трубы работают в условиях агрессивной среды при температуре до 90 °С. Но футерование таким способом выполняют только на трубах длиной не более 1 м, причем футеруемая поверхность стальной трубы должна быть сравнительно гладкой.

Футерование стальных труб можно выполнять также полиизобутиленовой пленкой. Из листа полиизобутилена вырезают полосу шириной на 2–3 см больше внутреннего периметра футеруемой трубы. Затем края полосы смазывают клеем и формируют из нее шланг (рукав), наматывая полосу на металлическую трубу-оправку. После сварки шва

(прутковой сваркой) полученный шланг снимают с оправки. Клей приготавливают в виде раствора клеящих веществ в полимеризующихся жидкостях, например в мономере стирола. Перед применением в клей добавляют около 0,5 % перекиси бензоила.

До футерования внутреннюю поверхность стальной трубы очищают от окалины и ржавчины, например, пескоструйным аппаратом до металлического блеска. После очистки трубу протирают сухой тканью, продувают сжатым воздухом и промывают 2–3 раза бензином или другим растворителем для удаления следов жира. Затем трубу покрывают клеем, наливая его вовнутрь трубы; избытку клея дают стечь и, непрерывно вращая трубу, ждут, пока клей подсохнет. Подсушенную стальную трубу покрывают вторым слоем клея и протаскивают в нее шланг из полиизобутилена с помощью специального конусного металлического захвата, закрепленного на конце шланга. Стальную трубу закрепляют в зажиме при втаскивании в нее шланга из полиизобутилена с помощью троса, соединенного с захватом, и лебедки. В процессе протаскивания в стальную трубу шланг покрывают с наружной стороны клеем. Затем у футерованной трубы один конец полиизобутиленового шланга отбортовывают на фланец, а другой зажимают с помощью болтов.

Фланец с отбортованным концом шланга закрывают шайбой с патрубком, через который в течение 15–30 мин подают сжатый воздух давлением 0,05 МПа, чтобы обеспечить плотное прилегание шланга к поверхности стальной трубы. Для ускорения процесса полимеризации клея стальную трубу подогревают снаружи. У готовой трубы отбортовывают затем второй конец шланга и заделывают торцы труб.

Иногда применяют резиновую грушу для обеспечения хорошего прилегания шланга к стальной трубе. Резиновую грушу с помощью сжатого воздуха или горячей воды медленно проталкивают вдоль всей трубы, удаляя при этом пузырьки воздуха, находящегося между стенкой трубы и шлангом, и создавая плотное прилегание шланга. Но в то же время такой способ футерования затрудняет удаление растворителя из клея, особенно при большой длине труб. Остаток растворителя в слое клея между металлом и пленкой приводит к образованию пузырьков, которые впоследствии при длительной эксплуатации труб вызывают нарушение сплошности футеровки в местах их расположения.

За рубежом известен способ футерования внутренней поверхности металлических труб твердой поливинилхлоридной пленкой толщиной 0,8–1 мм. Сначала изготавливают шланг для футерования. Исходную поливинилхлоридную пленку в виде рулона ленты или листов перед раскроем подвергают термической обработке и испытывают на пористость электроискровым индуктором. Заготовку-ленту определенной ширины протягивают без подогрева через приспособление, представляющее собой трубу с раструбом, изготовленную из стеклопластика на основе полиэфирной смолы, со сквозной прорезью вдоль образующей трубы и раструба.

Внутренний диаметр приспособления равен наружному диаметру изготавливаемого поливинилхлоридного шланга. Затем шланг формируют из пленки обжатием отдельными участками на металлической оправке, нагретой до температуры 130 °С. Сформованные участки шланга охлаждают водой.

Поверхности кромок формируемого шланга, соединяемые внахлестку, промывают растворителем (обычно метиленхлоридом) для очистки от грязи и склеивают. Клей составляют из перхлорвиниловой смолы, метиленхлорида, гексахлорана и стабилизатора и наносят на склеиваемые поверхности кромок шланга. После склеивания швов дополнительно сваривают прутковой сваркой.

Готовый шланг промывают с поверхности метиленхлоридом и промазывают клеем в два слоя с просушкой в течение 4 ч при комнатной температуре. В период сушки на шланг не должны попадать пыль, грязь и особенно жир.

Перед футерованием внутреннюю поверхность стальной трубы очищают как обычно и покрывают в три слоя раствором клея. В процессе покрытия клеем трубу непрерывно поворачивают на подставке под углом 45°. Первые два слоя просушивают при комнатной температуре в течение 12 ч каждый, а третий слой — 4 ч. Растворитель удаляют из клея нагреванием трубы при температуре 140–155 °С с одновременной продувкой трубы теплым воздухом.

Шланг, надетый на специальную металлическую оправку, вводят внутрь трубы с помощью специальной установки и пневматического устройства в минимально короткое время, чтобы он не склеивался преждевременно с трубой.

Футерованную трубу нагревают до температуры 150 °С и затем подвергают вакуумированию для обеспечения хорошего приклеивания шланга к металлической трубе. Качество футерованных труб достаточно хорошее. К недостаткам этого способа футерования труб относятся значительная продолжительность процесса, трудоемкость операций, необходимость применения растворителя и др.

В различных странах применяют много разных способов футерования металлических труб термопластами, кроме рассмотренных.

Трубы можно футеровать нанесением пластмассовых паст на внутреннюю поверхность металлической трубы (путем распыления или с использованием центробежных сил). Футеруют трубы также закладыванием тонкостенной пластмассовой трубы в металлическую с последующей задачей пластмассовой трубы водой или паром. Внутрь трубы подают воду с температурой 20–30 °С и выдерживают под давлением 8,4 МПа в течение 6 дней по 8 ч в день. На протяжении всего цикла футерования, обработку давлением дважды снимают в течение часа и в трубу подают воду температурой 64 °С.

В ряде стран холоднотянутые стальные трубы футеруют трубами из термопластов толщиной 1–3,5 мм при совместном их волочении.

Футерованные трубы диаметром до 60 мм имеют длину 10 м, а диаметром свыше 60 мм – 4 м. Трубы стальные собирают с пластмассовыми вручную закладыванием труб из полиэтилена или поливинилхлорида вовнутрь стальной трубы. Затем их подвергают обычному для стальных труб холодному волочению без оправки, после чего обе трубы надежно скрепляются друг с другом. Недостатки этого способа футерования – значительное ухудшение механических свойств стальной трубы за счет наклепа при волочении, так как отжиг проводить нельзя из-за пластмассовой футеровки, и невозможность применения (из-за волочения) дешевых электросварных и чугунных труб.

В нашей стране с 1957 г. освоено производство футерованных труб напряженными трубами из термопластов по способу, предложенному Научно-исследовательским институтом санитарной техники (НИИСТ). При этом поверхность футеруемой трубы не подготавливают. Для футерования применяют бесшовные и сварные трубы из термопластов.

Процесс футерования состоит из двух основных стадий:

получение напряженной пластмассовой трубы при деформировании ее в состоянии высокой эластичности. Напряжения в пластмассовой трубе создают за счет уменьшения ее диаметра при деформировании, последующего фиксирования уменьшенного размера интенсивным охлаждением без снятия деформирующей нагрузки;

собственно футерование, заключающееся в свободном введении напряженной пластмассовой трубы вовнутрь металлической и в последующем совмещенном нагреве обеих труб, в процессе которого напряженная труба, стремясь восстановить свой первоначальный размер, плотно прилегает к металлической оболочке.

Пластмассовую трубу 2, подлежащую напряжению, нагревают в печи 1 до температуры, при которой полимер находится в высокоэластическом состоянии, и протягивают через раструбную металлическую трубу 3, внутренний диаметр которой несколько меньше наружного диаметра напрягаемой пластмассовой трубы (рис. 96). Рабочую поверхность раструба подогревают во избежание преждевременного охлаждения нагретой пластмассовой трубы до температуры, превышающей температуру напрягаемой трубы на 30–40 %. Температуру в зоне стабилизации, расположенной за раструбом или в зоне предварительного охлаждения 5, поддерживают равной 40–50 % от температуры раструба. Температуру раструба и зоны стабилизации регулируют периодической подачей холодной воды в зону стабилизации через управляемый клапан. Включение и выключение клапана осуществляют с помощью терморегулятора 4.

В последней зоне 6 происходит интенсивное охлаждение напряженной пластмассовой трубы 7 за счет непрерывной подачи холодной воды в камеру.

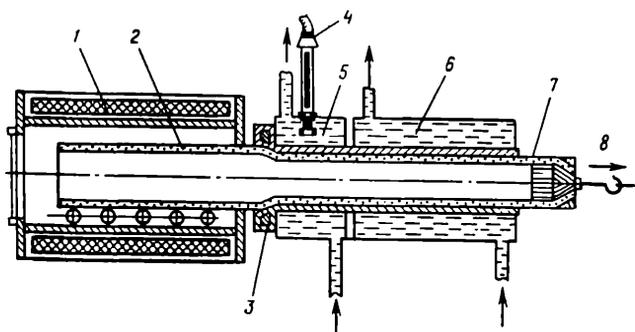


Рис. 96. Получение напряженной пластмассовой трубы

Напрягаемая пластмассовая труба испытывает осевое растяжение и радиальное обжатие в процессе протягивания под действием тягового усилия δ , что вызывает возникновение суммарных напряжений в стенках пластмассовой трубы, которые определяются обжатием, т.е. изменением сечения пластмассовой трубы до и после ее напряжения.

В процессе прохождения деформированной и напряженной пластмассовой трубы через зону интенсивного охлаждения фиксируют приданную ей форму, а напряжение в ее стенках как бы "замораживают". Затем напряженную пластмассовую трубу с объемно-напряженным состоянием стенок помещают внутрь металлической с некоторым зазором и нагревают до температуры, несколько превышающей температуру, при которой осуществляли деформирование (рис. 97). При этом под действием внутреннего напряжения стенок пластмассовая труба увеличивается в диаметре (уменьшаясь в длине) и плотно прилегает к внутренней поверхности металлической трубы. Готовую трубу после футерования охлаждают на воздухе до температуры окружающей среды.

Для того чтобы выступающие концы напряженной пластмассовой трубы не заворачивались, на торцы трубы в процессе ее футерования надевают специальные струбины. Так как металлическая оболочка обладает большей жесткостью, чем размягченная пластмассовая труба, и препятствует ее расширению в процессе футерования, то в пластмассовой трубе всегда наблюдаются остаточные напряжения.

Трубы в процессе футерования нагревают в электрической печи горячим воздухом в течение определенного времени во избежание термической деструкции термопласта.

Футерование стальных труб напряженными пластмассовыми трубами нашло промышленное применение, но технология процесса и оборудование, на котором выполняют отдельные операции, еще несовершенны, себестоимость футерованных труб относительно высока.

Разработан процесс футерования стальных труб напряженными пласт-

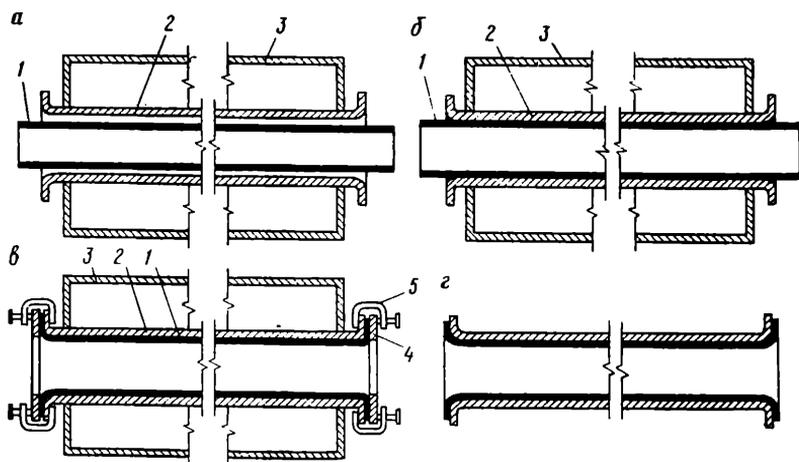


Рис. 97. Футерование стальной трубы напряженной пластмассовой:

a — расположение трубы в печи; *б* — футерование; *в* — отбортовка футерующего слоя; *г* — готовая труба; *1* — предварительно напряженная термопластичная труба; *2* — стальная труба; *3* — электропечь; *4* — прижимное кольцо; *5* — струбина

массовыми трубами, совмещенный с процессом из изготовления методом экструзии. Выходящая из экструдера пластмассовая труба поступает в специальное калибрующее и охлаждающее устройство, отличающееся от обычного тем, что после калибровки и неполного охлаждения пластмассовая труба находится не в окончательно отвердевшем состоянии, а в высокоэластичном. К калибрующему устройству примыкает раструб оформляющего аппарата с отверстием меньшего диаметра для радиально-осевого обжатия пластмассовой трубы и быстрого охлаждения.

Деформированную и охлажденную трубу захватывают ролики тянущего устройства (в начальный момент пластмассовую трубу подают на ролики тянущего устройства с помощью троса и лебедки), передают для резки на мерные части и далее на футерование стальных труб. Такой процесс производства футерованных труб позволяет осуществить непрерывность и полную автоматизацию как операции напряжения пластмассовых труб, так и ряды последующих операций, а следовательно, повысить качество труб и снизить их себестоимость. Соединения футерованных труб выполняют разъемными на фланцах и муфтах и неразъемными с приваркой предохранительных муфт.

В нашей стране изготавливают футерованные поливинилхлоридом и полиэтиленом трубы условным диаметром 25–150 мм, толщиной стальной стенки 2,5–6 мм, пластмассовой стенки — 2–4 миллиметра, длиной 2–8 м для агрессивных сред. —

В зависимости от рабочего давления допускаются следующие температурные интервалы эксплуатации труб:

Давление, МПа	1–16	0,6–1	До 0,6
Температура, °С	–40–70	–40–80	–40–90

35. ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Назначение тепловой защиты трубопроводов с применением различных теплоизоляционных материалов – сохранение температурных параметров транспортируемой среды при колебаниях температуры окружающей среды от 40 до –60 °С в некоторых районах страны.

Теплопроводы прокладывают двумя методами: в железобетонных унифицированных каналах и бесканально. В зависимости от способа прокладки по-разному проводят и теплозащиту трубопроводов. В каналах прокладку обычно осуществляют с подвесной изоляцией, которую делают из минеральной ваты с последующим оштукатуриванием поверхности. К материалам для тепловой изоляции трубопроводов при бесканальной их прокладке предъявляют следующие требования: малое водопоглощение, т.е. гидрофобность; достаточно высокое электрическое сопротивление; хорошая прочность на сжатие и изгиб, позволяющая выдерживать механические воздействия на материал при монтаже и эксплуатации; высокая теплостойкость; стабильность коэффициента теплопроводности с течением времени; высокая морозостойкость; недефицитность и невысокая стоимость.

Конструкции теплоизоляционных покрытий

Теплоизоляционное покрытие при бесканальной прокладке имеет следующую конструкцию: антикоррозионный (битумный) слой, наносимый на трубу; собственно теплоизоляционный слой; гидроизоляционная оболочка и защитная обертка. Некоторые элементы в зависимости от физико-механических свойств тепловой изоляции и условий эксплуатации могут отсутствовать. Иногда вводят дополнительный слой: между битумным антикоррозионным слоем и слоем пористой теплоизоляции размещают непроницаемую оболочку из алюминиевой фольги. Ее роль состоит в предотвращении испарения легкоплавких фракций из битума, поскольку при испарении происходит охрупчивание, растрескивание и отслоение битумного слоя от трубы.

Наиболее известны два типа теплоизоляционных покрытий: сборные и монолитные. Сборная конструкция содержит отдельные теплоизоляционные элементы, заранее отформованные в виде цилиндров, полуцилиндров (скорлуп цилиндрической конструкции), сегментов, блоков, установ-

ливаемых и закрепляемых на трубопроводе. Зазоры между элементами уплотняют специальными составами или сами элементы склеивают между собой и прикрепляют к трубопроводу. Теплоизоляцию защищают водонепроницаемой оболочкой. Монолитная теплоизоляция образуется непосредственно на изолируемом трубопроводе и, как правило, прочно сцепляется с наружной поверхностью трубы.

Сборные конструкции тепловой изоляции рекомендуются для трубопроводов, транспортирующих низкотемпературные среды, например охлажденный или сжиженный природный газ.

Классификация теплоизоляционных материалов

Теплоизоляционные материалы классифицируют по теплопроводности [в Вт/м·°С] при температуре 25 °С на три класса: I – низкой до 0,06, II – средней 0,06–0,115 и III – повышенной 0,115–0,175.

По плотности (в кг/м³) их подразделяют на группы: ОНП – особо низкой плотности (15, 25, 35, 50, 75), НП – низкой плотности (100, 125, 150, 175), СП – средней плотности (200, 225, 250, 300, 350) и ПЛ – плотные (400, 450, 500, 600).

По жесткости материалы подразделяют на: М – мягкие, П – полужесткие и Ж – жесткие с относительной деформацией сжатия соответственно свыше 30, 6–30 и до 6 % при давлении 0,002 МПа, ПЖ – повышенной жесткости и Т – твердые с относительной деформацией сжатия до 10 % при давлении соответственно 0,04 и 0,1 МПа.

По виду исходного сырья материалы подразделяют на органические и неорганические; по возгораемости делят на три группы: Н – несгораемые, Т – трудносгораемые и С – сгораемые.

По структуре материалы подразделяют на волокнистые, порошкообразные зернистые и ячеистые (пенопласты). К волокнистым теплоизоляционным материалам относятся минеральная и стеклянная вата, асбестовые волокна и изделия из них. Порошкообразные зернистые материалы – вспученный перлит (горная порода), вспученный вермикулит и др. Вспучивание перлита, вермикулита и других горных пород осуществляют тепловой обработкой на специальных установках. В качестве ячеистых теплоизоляционных пенопластов применяют пенополистирол, пенополиуретан, пенополимербетон и др.

Основные виды материалов

Волокнистые материалы и изделия из них. Минеральную вату изготавливают из силикатного расплава горных пород и металлургического шлака или их смесей. В зависимости от массы она делится на марки 75, 100 и 125 высшей и I и категории качества и предназначается для температур до 700 и 600 °С в соответствии с категориями.

Из минеральной ваты выпускают маты, плиты и другие изделия. Маты минеральные прошивные изготавливают марок 75, 100 и 125 и 150 в зависимости от плотности; их теплопроводность при температуре 25 °С соответственно не более 0,044; 0,044; 0,046 и 0,049 Вт/(м·°С). По температуре применения и материалу обкладки с двух сторон маты для теплоизоляции промышленного оборудования и трубопроводов делят на типы: 1М и 2М (до 600 °С), 3М (до 150 °С) и 4М (до 60 °С).

Минераловатные цилиндры и полуцилиндры высшей и I категорий качества из минеральной ваты на синтетическом связующем делают длиной 500, 750 и 1000 и 1500 мм и толщиной 40, 50, 60 и 70 мм.

В зависимости от плотности цилиндры выпускают марок 150, 200 и 250 при температуре 25 °С с теплопроводностью не более 0,051, 0,053 и 0,056 Вт/(м·°С) соответственно, а полуцилиндры – марок 100, 150 и 200 при температуре 25 °С с теплопроводностью не более 0,049; 0,051 и 0,053 Вт/(м·°С) соответственно. Они имеют внутренний диаметр 25, 33, 45, 57, 76, 133, 159 и 219 мм. Применяют их для температур от –180 до 400 °С.

Плиты из минеральной ваты на синтетическом связующем с модифицирующими добавками или без них в зависимости от плотности выпускают марок 50, 75, 125, 175, 200 и 300 высшей и I категорий качества толщиной соответственно 60–100, 50–80, 40–70, 40–60 и 20–40 мм (с интервалом 10 мм). Длина плит марок 50, 75, 125, 175 и 200 составляет 1000 мм, а ширина – 500 и 1000 мм, длина плит марки 300–900, 1200 и 1800 мм, а ширина – 450, 600, 900 и 1800 мм.

Плиты марок 50, 75, 125 и 175 предназначены для температур до 400 °С, а марок 200 и 300 – до 100 °С. При температуре 25 °С теплопроводность плит этих марок составляет не более 0,047, 0,047, 0,049, 0,052, 0,056 и 0,06 Вт/(м·°С) соответственно.

Плиты из минеральной ваты на битумном связующем в зависимости от плотности выпускают марок 75, 100, 150, 200 и 250 высшей и I категорий качества для температур от –100 до 60 °С. При температуре 25 °С теплопроводность плит этих марок составляет не более 0,046; 0,046; 0,052; 0,058 и 0,064 Вт/(м·°С) соответственно. Плиты марок 75, 100, 150 и 200 составляют длиной 1000 и 1500 мм, а марок 75 и 100 – длиной 2000 мм, шириной 500 и 1000 мм, толщиной – 50–100 мм (с интервалом 10 мм); плиты марки 250 – длиной 1000 мм, шириной 500 мм, толщиной 40, 50, 60 и 70 мм.

Минеральные плиты на крахмальной основе в зависимости от плотности выпускают марок 50, 75, 100, 125 и 150 при температуре 25 °С с теплопроводностью не более 0,04; 0,04; 0,042; 0,042 и 0,044 Вт/(м·°С) соответственно. В зависимости от уплотнения под давлением 0,002 МПа их подразделяют на мягкие, полужесткие и жесткие. Они имеют длину 1000 мм, ширину 500 мм, толщину 50, 60, 70 и 80 мм. Применяют их для температур от –60 до 400 °С.

Маты прошивные из минеральной ваты на металлической сетке (МП/С) предназначены для температур до 600 °С. Под давлением 0,017 МПа они имеют плотность не более 100 кг/м³. Их длина составляет 3000 и 5000 мм, ширина — 500 и 1000 мм, толщина 50 и 100 мм; теплопроводность при температуре 0 °С — не более 0,037 Вт / (м·°С).

На основе волокон асбеста применяют асбестовую бумагу и картон. Асбестовая бумага марок БТ бывает толщиной 0,65; 1 и 1,5 мм; она имеет разрывное усилие в продольном направлении не менее 20, 25 и 28 Н соответственно. Картон асбестовый листовой марок КАОН-1 и КАОН-2 выпускают толщиной 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8 и 10 мм; он имеет предел прочности при разрыве в продольном направлении не менее 1,2 и 1,5 МПа соответственно. Применяют его при температуре до 500 °С.

С применением стекловолокон изготавливают плиты, пластины, вату, маты и другие изделия. На основе стеклянного штапельного волокна, склеенного синтетическими смолами, производят плиты марок ПЖС-175 и ПЖС-200 (жесткие строительные плотностью не более 175 и 200 кг/м³); ППС-50 и ППС-75 (полужесткие строительные плотностью не более 50 и 75 кг/м³); ППТ-40, ППТ-50 и ППТ-75 (полужесткие технические плотностью не более 40, 50 и 75 кг/м³), а также маты марок МС-35 (строительные) и МТ-50 (технические) плотностью не более 35 и 50 кг/м³ соответственно. При температуре 25 °С их теплопроводность составляет не более 0,052; 0,057; 0,047; 0,047; 0,043; 0,047; 0,047; 0,047; 0,047 Вт/м³ соответственно. При температуре 25 °С их теплопроводность составляет не более 0,052; 0,057; 0,047; 0,047; 0,043; 0,047; 0,047; 0,047; 0,047 Вт/(м·°С) соответственно. Применяют их для температур от —60 до 180°С.

Из однонаправленного стеклянного волокна, получаемого непрерывным вытягиванием, уложенного в несколько слоев и покрытого с двух сторон стеклотканью или стеклохолстом, с последующей прошивкой хлопчатобумажными или стеклянными нитями изготавливают эластичные пластины (маты и полосы) марок МТС-12; МТХ-20; МТХ-30 и ПТХ-30: диаметр используемого волокна — 12, 20, 30 и 30 мкм; плотность пластины — не более 110, 150, 175 и 175 кг / м³, а теплопроводность при температуре 25 °С — не более 0,046; 0,049; 0,052 и 0,052 Вт / (м·°С) соответственно. Применяют их для температур до 500 °С.

Стекловату и маты изготавливают из супертонкого стекловолокна без связующего. Такое волокно представляет собой слой перепутанных штапельных супертонких коротких волокон, скрепленных между собой силами естественного сцепления. Их получают раздуванием горячими газами первичных непрерывно вытягиваемых из печи волокон. Волокна диаметром не более 3 мкм должны быть равномерно распределены в матах по всей их площади. Плотность матов не превышает 25 кг/м³, теплопроводность при температуре 25 °С — не более 0,044 Вт/(м·°С).

Прошивные маты прямоугольной формы получают прошивкой матов

из супертонкого стекловолокна без связующего с обкладкой из стеклоткани со всех сторон. Применяют их для трубопроводов и оборудования с температурой до 450 °С. Толщина матов – 30, 40, 50, 60 мм, а длина – 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250 и 2500 мм; ширина – 500 мм; плотность – не более 45 и 50 кг/м³ для высшей и I категорий качества соответственно; теплопроводность при температуре 25 °С – не более 0,044 Вт/(м·°С). Стекломаты теплоизоляционные в рулоне выпускают из стеклянных штапельных волокон, получаемых центробежно-фильтродутьевым способом, скрепленных синтетическим полимерным связующим. Плотность мата 25 кг/м³, диаметр волокон не более 10 мкм, теплопроводность при температуре 25 °С не более 0,041 Вт/(м·°С), длина мата 8000 мм; ширина 1000 мм, толщина – 60 и 70 мм.

Вестные стекловолоконные холсты ВВГ в рулонах, представляющие собой нетканый материал из хаотически расположенных стеклянных волокон диаметром не более 18 мкм, склеенных синтетической смолой.

Из отходов стеклянного волокна изготавливают холстопршивное полотно в рулонах, состоящее из слоев, перевязанных нитями трикотажным переплетением. Полотно марок ХПС-Т-5 и ХПС-Т-2,5 применяют как теплоизоляционный и защитно-покровный, а марки ХПС-А-5 – как армирующий материал в производстве стеклопластиков. В марке полотна буквы обозначают: ХП – холстопршивной; С – из стекловолоконных отходов; А – для армирования, Т – для теплоизоляции; цифры 2,5 и 5 – класс вязальной машины. Полотно марки ХПС-Т-5 имеет ширину 900, 1000 и 1600 мм, а марки ХПС-Т-2,5 – 800 и 1600 мм при толщине 1,4 мм и длине не менее 20 м.

Из рулонных стекломатов марок МРС-50 и МРС-35 методом centrifугирования с пропиткой мочевиноформальдегидной смолой изготавливают жесткие цилиндры для теплоизоляции трубопроводов с температурой от –60 до 180 °С. Цилиндры разрезают по одной образующей насквозь, а по второй – на 2/3 их толщины. Размеры цилиндров: внутренний диаметр 27, 34, 40, 47 и 59 мм; толщина изоляции 40 и 50 мм; длина цилиндра 500 и 1000 мм.

Порошкообразные материалы и изделия из них. Перлит применяют в виде вспученного песка и щебня, представляющих собой пористый материал. Получают его вспучиванием при термической обработке свыше 1000 °С дробленых водосодержащих вулканических стекол (перлита, абсидента и др.). По размеру зерен перлит делят на фракции: менее 0,14 мм – пудра; до 1,25 мм – песок мелкий (порошок); 1,25–5 мм – песок крупный; 5 – 10 мм – щебень мелкий; 10 – 20 мм – щебень крупный. В зависимости от плотности перлит подразделяют на следующие марки: 75, 100, 150, 200 и 250 – песок и 300, 400, 500, 600 – щебень. Теплопроводность их при температуре 25 °С составляет не более 0,041; 0,052; 0,058; 0,064; 0,07; 0,075; 0,081; 0,093 Вт/(м·°С) по маркам соответственно: для марки 600 – не гарантируется.

Из вспученного перлитного песка, цемента и асбеста изготавливают перлитцементные изделия: плиты П, полуцилиндры Ц, сегменты С. В зависимости от плотности их поставляют марок 225, 250, 300 и 350 для температур не выше 600 °С.

Плиты имеют ширину 500 мм, толщину 50, 75 и 100 мм; цилиндры – внутренний диаметр 58, 78, 91, 110, 135, 161 и 222 мм, толщину 50, 55, 70, 80, 83, 90, 93 и 100 мм; сегменты – внутренний диаметр 161, 222, 277, 327, 380 и 430 мм, толщину 75, 100, 104, 105 мм. Длина П, Ц, С составляет 500 и 1000 мм. Теплопроводность П, Ц и С для марок 225, 250, 300 и 350 при температуре 25 °С должны быть не более 0,065; 0,07; 0,076 и 0,081 Вт/(м·°С) соответственно (для I категории качества).

Битумоперлит получают смешиванием вспученного перлитового песка и битума с добавкой асбеста или без него. Перлит – наполнитель, битум – связующее.

На основе вспученного перлитового песка, битумоглинистой пасты, асбеста и модифицирующих добавок смешением и формовкой изготавливают перлитобитумные плиты марок 200, 225, 250 и 300 для температур от –60 до 100 °С. В зависимости от содержания битума плиты могут быть трудносгораемыми Т или сгораемыми С. Плиты имеют толщину 40, 50 и 60 мм; длину 500 и 1000 мм; ширину 500 мм. Теплопроводность при температуре 25 °С плит марок 200, 225, 250 и 300 составляет 0,076; 0,079; 0,082 и 0,087 Вт/(м·°С) соответственно.

Из смеси солей углекислого магния и кальция с асбестом путем их прессования и сушки выпускают совелитовые изделия в виде плит и полуцилиндров марок 350 и 400 теплопроводностью при температуре 25 °С не более 0,076 и 0,084 Вт/(м·°С) соответственно для температур не выше 500 °С. Длина изделий составляет 260 и 500 мм; толщина – 40, 50, 60 и 75 мм; ширина плит – 170, 250 и 500 мм; внутренний диаметр полуцилиндров – 57, 76, 89, 108, 133 и 159 мм. Из боя совелитовых изделий путем их размола готовят совелитовый порошок с плотностью не более 250 кг/м³, применяемый для теплоизоляции оборудования и трубопроводов в виде порошка или мастики.

Вермикулит – вспученный зернистый материал чешуйчатого строения – применяют в качестве теплоизоляционной засыпки для температур от –260 до 1 100 °С; при изготовлении теплоизоляционных изделий, а также для теплоизоляционных и звукопоглощающих бетонов и растворов. Получают вермикулит при обжиге природных гидратированных смол. Вермикулит вспученный делится на фракции по размеру зерен (в мм) 5 – 10 – крупный; 0,6 – 5 – средний; до 0,6 – мелкий. В зависимости от плотности он имеет марки 100, 150 и 200; его теплопроводность при температуре 25 °С составляет не более 0,064; 0,071 и 0,075 Вт/(м·°С) соответственно.

Из вспученного вермикулита, связующих веществ, асбеста и других

добавок путем формирования и последующего высушивания получают асбовермикулитовые изделия в виде плит, полуцилиндров (скорлуп) и сегментов цилиндрических для температур не выше 600 °С. Их выпускают марок 250, 300 и 350 теплопроводностью при температуре 25 °С не более 0,087; 0,092 и 0,099 Вт/(м·°С) соответственно. Плиты имеют длину 1000 и 5000 мм; ширину 500 мм, толщину 40, 50, 80 и 100 мм. Полуцилиндры и сегменты имеют ширину 500 мм, толщину 40 и 50 мм, а внутренний диаметр 52, 67, 77, 95, 116, 161, 177 мм и 222, 282 и 388 мм соответственно.

Из распущенного асбеста, вспученного вермикулита или перлита (или их смеси), добавкой связующего изготавливают методом формования асбовермикулитовые и асбоперлитовые плиты и скорлупы марок: ФОВ-230, ФОВ-250, ФОВ-280 – формованные из обожженного вермикулита; ФОР-230, ФОР-250, ФОР-280 – формованные из обожженного перлита; ФОВП-230, ФОВП-250 и ФОВП-300 – формованные из обожженного вермикулита и перлита. Плиты имеют длину 1000 мм, ширину 500 мм, толщину 40 и 50 мм; скорлупы – длину 500 мм, толщину 30, 40, 50, 60 и 70 мм, внутренний диаметр 57, 70, 75, 89, 108, 128, 133, 140, 159, 168, 188, 195, 219, 245, 279 и 295 мм. Их теплопроводность при температуре 25 °С составляет не более 0,087 Вт/(м·°С) для всех марок.

Ячеистые материалы. Пенопласты представляют собой органические полимерные пористые (газонаполненные) теплоизоляционные материалы. Получают их вспениванием полистирольных, полиуретановых, фенолформальдегидных, мочевиноформальдегидных и полихлорвиниловых полимеров газами, образующимися в результате химических реакций между компонентами материала или выделяющимися при разложении специально вводимых в материал минеральных органических газообразователей или вспенивающихся веществ.

Свойства пенопластов зависят от вида полимера и способов производства и изменяются в следующих пределах: плотность 10–150 кг/м³; теплопроводность 0,023 – 0,052 Вт/(м·°С) при температуре 20 °С; прочность 0,05 – 4 МПа; объемное водопоглощение 2 – 70 %.

Пенополистирол получают путем вспенивания полистирола с газообразователями. Пенополистирол марок ПС-1 и ПС-4 получают прессовым методом, марок ПСБ-С и ПСБ – беспрессовым методом в виде плит, а марок ПСБ-С – для теплоизоляции труб в виде скорлуп длиной 1 м, толщиной 40–50 мм и внутренним диаметром 65–385 мм. Теплопроводность [в Вт/(м·°С)] полистирола марки ПСБ-С I категории качества при температуре 25 °С в зависимости от плотности составляет (не более) 0,04 для 20 кг/м³, 0,038 для 25, 30 и 40 кг/м³. Пенополиуретан (ППУ) – продукт сложных реакций, протекающих при смешивании простых и сложных полиэфиров и изоцианатов в присутствии катализаторов, эмульгаторов, вспенивающих агентов. Пенополиуретаны делятся на жесткие марок ППУ-3с (заливочный), ППУ-3н (напыляемый), ППУ-331 (зали-

вочный), ППУ-308н (напыляемый), "Изолан-3" ("Изолан-ЭМ") и эластичные марок ППУ-Э-28-0,8; ППУ-Э-35-0,8; ППУ-Э-40-0,8; ППУ-Э-60-0,4.

При температуре 25 °С теплопроводность полиуретанов марок ППУ-3с, ППУ-3н, ППУ-308н и "Изолан-3" составляет 0,04 Вт/(м·°С), а марки ППУ-331 – 0,029 Вт/(м·°С). Полиуретаны марок ППУ-3с, ППУ-3н и ППУ-331, ППУ-308н и "Изолан-3" имеют плотность 50–70; 50–80; 40–50; 40–60 и 45–70 кг/м³ соответственно. Их применяют для температур от –180 до 60 °С – ППУ-3с и ППУ-3н, от –180 до 100 °С – ППУ-331; от –180 до 120 °С – ППУ-308н; от –180 до 180 °С – "Изолан-3"

Теплоизоляция трубопроводов и резервуаров

Для теплоизоляции резервуаров применяют плиты и изделия различной формы, изготовленные из волокнистых материалов с добавлением связующих (полимеры, битум, цемент и др.) Для трубопроводов сжиженного природного газа толщина теплоизоляции не превышает 15 % наружного диаметра трубы. В качестве теплоизоляции трубопроводов используют пенополистирол, пенополиуретан и др.

Жесткий заливочный ППУ может заполнять в жидком виде изолируемое пространство на месте проведения работ. Жесткий пенополиуретан наиболее эффективный теплоизоляционный материал. Для трубопроводов его применяют при обязательном сочетании с гидроизоляционной и защитной от механических повреждений оболочками.

ВНИИСТом совместно с Центральным ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательским и проектно-экспериментальным институтом строительных конструкций и сооружений им. В.А. Кучеренко (ЦНИИСК) разработан композиционный пенополиуретан (КППУ). Его получают путем применения минеральных наполнителей в виде гранул керамзита, вспученного перлита, пеностекла. Пеностекло изготавливают путем термической обработки смеси порошкообразных стекол и газообразователя при температуре 700–800 °С.

Введение этих наполнителей в ППУ повышает прочность покрытия, огнестойкость, снижает расход полимеров (полиуретана), уменьшая стоимость. КППУ относится к трудногоряемым пенопластам, их рекомендуют для температур эксплуатации трубопроводов от –100 до 100 °С.

ВНИИСТом совместно с другими организациями рекомендуется также применять комплексную теплоизоляцию и защиту от коррозии трубопроводов из пенополимербетона, который, как материал комплексной изоляции, обладает низким коэффициентом теплопроводности, высокими гидроизоляционными, механическими и противокоррозионными свойствами, высокой технологичностью при нанесении на трубу, небольшой массой покрытия, недефицитностью и невысокой стоимостью исходных компонентов. Для повышения огнестойкости и химической стойкости в качестве наполнителя используют андезит, который представляет собой дробленую горную породу.

Пенополимербетон (ячеистый бетон) получают в результате твердения смеси, состоящей из вяжущего материала, мелкого и крупного заполнителя и специальных добавок. Эти добавки делятся на пластифицирующие, газообразующие, уплотняющие, замедлители схватывания, ускорители твердения и др. Пенополимербетон изготавливают с добавками из следующих компонентов: кубовый остаток полиизоцианата, диэтиленгликоль, триэтанолмин, кремнийорганическая жидкость, ацетон и андезит. При подготовке материала для нанесения на трубы в смеситель заливают полиизоцианат, а затем в него добавляют остальные компоненты. После перемешивания и выдержки (3–5 мин) смесь помещают в форму. Выдержка в форме 40–45 мм. За это время происходит химическая реакция, вызывающая вспенивание, уплотнение и затвердевание изоляционного материала. Ацетон, участвуя во вспенивании, обеспечивает дополнительное схватывание материала на границе с изолируемой трубой. Полное отверждение покрытия наступает через 2 ч после извлечения трубы из формы.

Пенополимербетон можно наносить на поверхность трубопровода без какой-либо подготовки (без удаления ржавчины, обезжиривания поверхности). В случае наличия ржавчины полиизоцианат взаимодействует с ней и удаляет ее. При этом не требуется предварительного нанесения на поверхность антикоррозионного (битумного) покрытия. Изоляция из пенополимербетона наряду с выполнением функций теплоизоляции и защиты от коррозии обеспечивает также гидроизоляцию и защиту от механических повреждений. Для комплексной изоляции трубопроводов при различных видах их прокладки рекомендуют пенополимербетон плотностью 350–450 кг/м³.

Битумоперлит широко используют для устройства теплоизоляции трубопроводов с температурой не выше 130 °С в сухих грунтах. При более высоких температурах резко ухудшаются гидрофобные его свойства, и поэтому его необходимо защищать надежной гидроизоляцией. Битумоперлит применяют в виде монолитного покрытия или блоков.

Битумокерамзитовую теплоизоляцию, имеющую большое распространение, непрерывно совершенствуют. Керамзит получают из легкоплавких глинистых пород, способных вспучиваться при тепловой обработке (обжиге). В глиняную массу можно вводить железистые и органические добавки для улучшения свойств керамзита. Битумокерамзитовермикулитовая теплоизоляция с применением вспученного вермикулита обладает более стабильными теплоизоляционными и лучшими формовочными свойствами. Минерал вермикулит подвергают предварительно тепловой обработке для вспучивания, а затем подают в смеситель для приготовления битумокерамзитовермикулитовой массы. Эта масса поступает в расходный бункер, а из него – в шнек, который наносит ее на трубу, покрытую грунтовкой.

Поверх теплоизоляции механическим способом укладывают защит-

ные обертки из бумаги, стеклохолста и пленки ПВХ. Введение в теплоизоляционную массу пластификаторов (резиновой крошки, латекса) повышает эластичность массы.

Для теплопроводов в тяжелых гидрогеологических условиях разработана монолитная теплоизоляция на основе фенольных пенопластов марок ФЛ-1 и ФЛ-2, а также марки ФЛ-3 с модифицированием карбамидной смолой 25 %. Пенопласт марки ФЛ-3 обладает лучшими свойствами по сравнению с пенопластами ФЛ-1 и ФЛ-2. Фенольные пенопласты марки ФЛ-3 изготавливают из следующих компонентов: фенольная смола (75 %), карбамидная смола (25 %), поверхностно-активное вещество, алюминиевая пудра, ортофосфорная кислота, раствор бензолсульфокислоты (БСК) в этиленгликоле (12 %). Получение фенопласта основано на вспенивании и отверждении полимерной композиции.

В заливочной машине три основных компонента (фенольная и карбамидная смолы и кислотный катализатор) перемешиваются в смесительной головке перед вспениванием в течение нескольких секунд (30–60 с). Затем происходит газообразование и вспенивание композиции.

Формы для нанесения теплоизоляции делают металлическими из двух частей (верхней и нижней) с зажимными приспособлениями и заливочными отверстиями. Внутреннюю поверхность формы смазывают антиадгезионным составом – солидолом (тавотом) и закрывают бумагой, чтобы изолируемая труба не прилипла к форме. В форму устанавливают изолируемую трубу. Затем форму закрывают и заливают в нее полимерную композицию для получения теплоизоляции. После охлаждения пенопластового покрытия трубу освобождают от формы и подают на участок нанесения гидроизоляции.

На компрессорных станциях (КС) теплоизоляцией покрывают следующие технологические трубопроводы: обвязки газовой турбины, всасывающий, наружной обвязки нагнетателя, от компрессора к воздухоподогревателю, сброса воздуха, обвязки промежуточного воздухоохладителя, от воздухоподогревателя к камере сгорания и др. Трубопроводы имеют диаметр от 300 до 1400 мм, сложную конфигурацию, сечение круглое и прямоугольное. Их теплоизоляция обычно включает следующие элементы: основной теплоизоляционный слой (плиты или сегменты перлитовые на керамической основе, матрацы из асбестовой ткани с наполнителем, плиты из минеральной ваты и др.); защитный слой, предохраняющий основной теплоизоляционный материал от атмосферных осадков, механических повреждений, воздействия агрессивных сред (выполняют путем оклейки листами из алюминиевого сплава толщиной 0,8 мм и окраски или только окраски); пароизоляционный слой (фольга толщиной 0,03 мм в два слоя) для изоляции объектов с отрицательными температурами и предохраняющий изоляционную конструкцию от проникновения в нее паров воды из окружающего воздуха; крепежные детали для крепления теплоизоляционных материалов и защитных слоев, служащих также для повышения прочности конструкции в целом.

В качестве новой теплоизоляции технологических трубопроводов на КС перспективным является заводское нанесение огнезащитного покрытия ФТП-М. Покрытие состоит (по массе) из асбеста пятого сорта (30 %), вспученного перлитового песка (17 %), жидкого стекла (48 %) и фосфатного отвердителя жидкого стекла (нефелинового антипирена 5 %).

Теплоизоляционное покрытие ФТП-М обладает высокими огнезащитными, теплофизическими, механическими и эксплуатационными свойствами. Оно имеет низкий коэффициент теплопроводности, небольшую плотность, эластичность, монолитность, долговечность, виброустойчивость.

Это покрытие наносят механизированным способом методом напыления с помощью установки аэродинамического действия ТМ-1А, которая состоит из аэродинамической машины, насоса для жидкого стекла, пистолета с комплектом рукавов и переходников. Способ механизированного нанесения теплоизоляционного покрытия включает следующие операции: распушку волокнистого материала, дозированную подачу компонентов покрытия, создание смеси напыляемых материалов с воздухом, транспортировку аэросмеси под избыточным давлением к соплу, введение связующего в напыляемую массу при вылете ее из сопла и нанесение порошково-волокнистой массы на защищаемую поверхность.

Покрытие ФТП-М можно наносить как в заводских условиях, так и в условиях строительной площадки. Толщина теплоизоляции составляет 200 мм. Это обеспечивает перепад температур с 700 °С на металле трубы до 40 °С на поверхности изоляции.

В северных условиях обычно теплоизоляционное покрытие надземных трубопроводов на обустройстве промышленных объектов собирают из штучных элементов — минераловатных плит или пенопластовых скорлуп с последующей защитой их обечайками из металла, стеклоцемента или подобных им материалов.

Для теплоизоляции трубопроводов, резервуаров, аппаратов также используют минераловатные теплоизоляционные конструкции двух типов: полносборные теплоизоляционные конструкции (ТК), состоящие из соединенных между собой теплоизоляционных изделий, элемента покрытия и деталей крепления; сборные теплоизоляционные конструкции (СТК), представляющие собой укомплектованные по размерам теплоизоляционные изделия, элементы покрытия и крепежные детали, не соединенные между собой. Конструкции первого типа имеют различные размеры, их изготавливают из разнообразных материалов. Теплоизоляционные изделия в них соединяют с элементом покрытия шпильками или на клею.

Для теплоизоляции трубопроводов применяют полносборные теплоизоляционные конструкции № 1 ТК-1, № 2 ТК-2, № 3 ТК-3, № 3 ТК-3а. Конструкция № 1 ТК-1 включает теплоизоляционные изделия-цилиндры, маты и плиты из минеральной ваты и стеклянного волокна; материалы

покрытия — листы из алюминия и его сплавов, сталь тонколистовую оцинкованную, сталь с полимерным покрытием; крепежные детали — бандажи с пружкой; крепление теплоизоляционного слоя проводят на шпильках.

Для теплоизоляции резервуаров и аппаратов используют полносборные теплоизоляционные конструкции № 4 ТК-4, № 5 ТК-5, № 6 ТК-6, № 7 ТК-7, № 8 ТК-8 (для днищ). Конструкция № 4 включает те же теплоизоляционные изделия (кроме цилиндров) и те же материалы элементов покрытия, что и конструкция № 1 ТК-1, но крепежные детали здесь другие — захваты и шпильки, закрепленные на элементах покрытия, и скобы, приваренные к изолируемой поверхности; крепление теплоизоляционного слоя на штырях или на клею.

36. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ БАЛЛАСТИРОВКИ ТРУБОПРОВОДОВ

Балластировка (утяжеление) подводных трубопроводов предназначена для обеспечения их устойчивого положения на дне водной преграды. Для балластировки применяют чугунные и железобетонные грузы, а также бетонирование трубопроводов. Чугунные грузы изготавливают из серого чугуна в заводских условиях. Они состоят из двух полуколец, соединяемых на болтах (рис. 98, а). При балластировке нижние половинки грузов раскладываются вдоль заизолированной и футерованной деревянными рейками плети трубопровода, а затем на них устанавливают плеть. После этого на плеть трубопровода навешивают верхние половинки грузов, собирают их на болтах и болтовые соединения заливают битумной или битумно-резиновой мастикой.

Чугунные грузы допускается применять для балластировки подводных трубопроводов диаметром 1020 мм и более в русловой части рек в особо сложных условиях Западной Сибири и Крайнего Севера.

Замена чугунных грузов железобетонными приводит к экономии металла и удешевлению балластировки. Железобетонные грузы делятся по

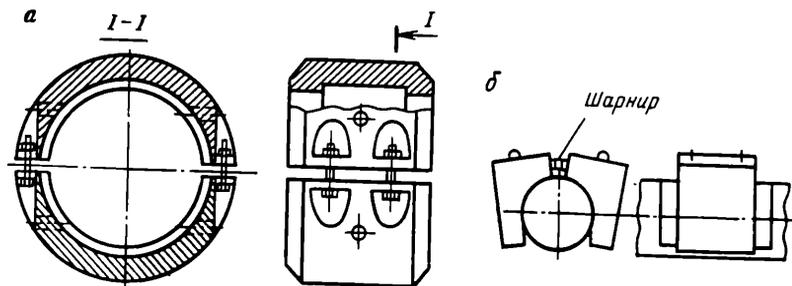


Рис. 98. Утяжеляющие грузы:

а — чугунный; б — шарнирный железобетонный

конструкции на седловидные, поясные, шарнирные и кольцевые. Изготавливают их в заводских условиях, а также на полигонах вблизи сооружаемых крупных подводных трубопроводов. Железобетонные грузы изготавливают из тяжелых плотностью не менее 2200 кг/м^3 и особо тяжелых плотностью не менее 2900 кг/м^3 виброуплотненных бетонов. Применяют для этого шлакопортландцемент, кварцевый песок, гравий и щебень из изверженных пород. Железобетон по сравнению с чугуном обладает меньшей плотностью, что приводит к увеличению размеров железобетонных грузов и усложнению укладочных работ на подводных переходах трубопроводов. Поэтому железобетонные грузы лучше изготавливать из тяжелых и особо тяжелых бетонов с рудосодержащими наполнителями, полученными, например, из отвальных шлаков металлургического производства. Применяют такие утяжеляющие грузы для балластировки магистральных газопроводов диаметром до 1420 мм на переходах через реки, болота, заболоченные участки, поймы рек. Плотность бетона составляет $2,9\text{--}3,1 \text{ т/м}^3$, предел прочности при сжатии — 20 МПа. По морозостойкости бетон соответствует марке $F100$, по водонепроницаемости — $W4$.

Седловидные грузы применяют для балластировки пойменных и заболоченных участков подводных трубопроводов, уложенных в траншею. Они обладают невысокой несущей способностью. Их центр тяжести расположен выше оси трубопровода, в связи с этим возможно их опрокидывание. В процессе транспортных и погрузочно-разгрузочных работ могут возникать поломки грузов в вершине седловидной части.

Поясной и шарнирный железобетонные грузы не имеют этих недостатков. Поясной груз состоит из двух бетонных блоков, соединенных стальными поясами. Блоки имеют общий центр тяжести, находящийся ниже оси трубопровода. Шарнирный груз (рис. 98,б) состоит из двух половинок седловидного груза, соединенных шарниром. Он плотно прилегает к трубопроводу и имеет пониженный центр тяжести что обеспечивает ему устойчивость против опрокидывания. Навешивают шарнирные грузы в раскрытом виде, что уменьшает повреждение изоляции.

Кольцевые железобетонные грузы типа УТК (утяжелитель кольцевой), как и чугунные, состоят из двух полуколец, соединенных на болтах. Применяют их для балластировки русловых подводных и морских участков трубопроводов. Они получили наибольшее распространение взамен чугунных.

При балластировке трубопроводов с использованием в качестве балласта минерального грунта (при засыпке) применяют утяжелители типа УБО, устанавливаемые групповым методом.

Балластирующая способность утяжелителей составляет не менее 2, 3, 7, 15 и 25 кН/м в зависимости от наружного диаметра трубопровода 152–299, 325–426, 480–720, 820–1020 и 1120–1420 мм соответственно.

Обетонирование подводных и морских трубопроводов проводят для получения сплошного (монолитного) утяжеляющего покрытия на

их поверхности. Сплошные бетонные покрытия защищают антикоррозионную изоляцию от повреждений и исключают необходимость применения защитной деревянной футеровки. При этом упрощается технология укладки трубопроводов. Кроме этого, они уменьшают необходимые тяговые усилия при протаскивании трубопровода по дну водной преграды в процессе его укладки.

Обетонирование трубопроводов осуществляют методом торкретирования, в съемных опалубках, виброприкатом, набрасыванием бетона, а также с применением сборных железобетонных утяжелителей и др.

Трубопроводы перед обетонированием покрывают противокоррозионной изоляцией. ВНИИСТ и ЭКБ по железобетону рекомендуют применять усиленную битумную изоляцию с защитной оберткой. Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по проблемам освоения нефтяных и газовых ресурсов континентального шельфа Миннефтепрома СССР предложил наносить изоляционные покрытия механизированным способом на поточной линии в несколько слоев: грунтовка из цинковой краски на основе полистирола блочной полимеризации слоем толщиной 120–150 мм; битумное покрытие из двух слоев битумно-резиновой мастики марки МБР-90 и двух слоев бикарула.

Для изоляции труб можно использовать изоляционные полимерные ленты как отечественного производства типа ПВХ-БК, ПВХ-Л, так и зарубежные типа "Поликен". Применяют обычно не менее двух слоев ленты общей толщиной 1 мм и двухслойную защитную обертку. В качестве защитных оберток используют ленты ПДБ и полимерные обертки.

ВНИИСТ и ЭКБ по железобетону разработали нанесение монолитного бетонного покрытия методом торкретирования (набрызга). Слой бетона толщиной 6 см наносят за три прохода. После получения необходимой толщины бетон выдерживают двое суток в естественном состоянии; затем плетть трубопровода с помощью трубоукладчиков переворачивают и бетонируют нижнюю ее поверхность. Поверхность бетона толщиной 6 см покрывают слоем металлической сетки и проводят обетонирование до проектной толщины.

Для трубопроводов диаметром 720 мм и больше покрытия армируют двумя слоями арматурной сетки, для трубопроводов меньшего диаметра применяют один слой сетки. Для предохранения арматурного слоя от коррозии толщина защитного слоя должна быть не менее 25 мм. Раствор для обетонирования труб готовят из песка и цемента в соотношении 1:2 (по массе). Для нанесения бетонного раствора используют установку "Пневмобетон".

Бетонное монолитное покрытие трубопровода диаметром 377–1220 мм получают в навесных опалубках конструкции ЭКБ по железобетону. Для уменьшения жесткости обетонированных трубопроводов в бетонном монолитном покрытии через каждые 3 м предусмотрены кольцевые разрезы (рис. 99). Разработано несколько типоразмеров бетонно-

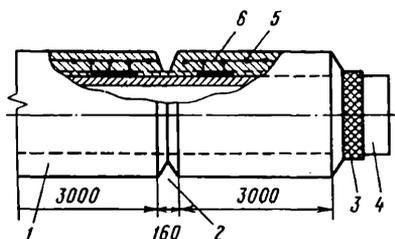


Рис. 99. Конструкция бетонного покрытия:

1 — железобетонное покрытие; 2 — рабочий шов по бетонированию (разрез); 3 — изоляция; 4 — трубопровод; 5 — арматурная сетка; 6 — продольная арматура

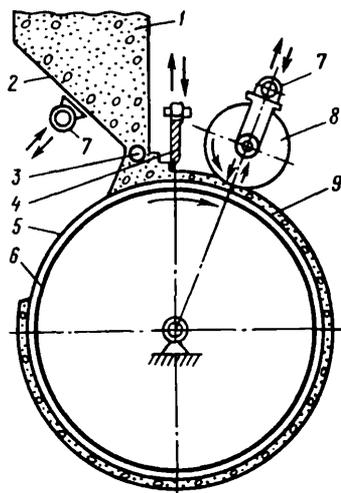


Рис. 100. Установка для обетонирования труб вибропркатным методом:

1 — раствор; 2 — вибробункер; 3 — шнек; 4 — вибробрус; 5 — арматура; 6 — труба; 7 — вибратор; 8 — формующий каток; 9 — формируемый бетонный слой

го покрытия в зависимости от диаметра и толщины стенки труб. Бетонное покрытие армируют сварными сетками и продольной арматурой. Сетку фиксируют на трубопроводе с помощью прокладок.

Опалубка состоит из двух разъемных стальных полуформ-оболочек, шарнирно соединенных в верхней части на продольном несущем опорном элементе. При подъеме за кромки, опалубка раскрывается, а при плавном опускании на трубопровод опалубка опирается обрезиненными башмаками непосредственно на изоляцию или на специальные упоры (прокладки) при установке на ранее обетонированные участки. После установки на трубопровод нижние части полуформ опалубки стягивают болтами. Бетон укладывают через загрузочный люк и уплотняют дисковыми вибраторами.

Всесоюзный научно-исследовательский гидротехнический институт им. Б.Е. Веденеева разработал вибропркатный способ обетонирования секций труб при их вращении. Покрытие получают толщиной 6–8 см по всей окружности труб любого диаметра на длине 30–40 м. Раствор для бетонирования применяют с водоцементным отношением 0,3–0,32. Подают его из бункера с использованием вибрации, вызываемой высокочастотным вибратором (рис. 100). Уплотнение покрытия осуществляют массой вибрирующего катка.

Наиболее эффективно заводское обетонирование труб методом на-

брызгивания бетона метателями. На стационарных установках бетонное покрытие толщиной 25–125 мм наносят на трубы диаметром 200–800 мм длиной 7–12 м; производительность – 6–12 труб в час. Бетонную смесь составляют из портландцемента, кварцевого песка и утяжелителя (молота железная руда, сульфат бария или гранитная крошка). После обетонирования на трубе закрепляют арматурную сетку. В бетонном покрытии через 90 см по длине труб делают кольцевые разрезы, не достигающие до антикоррозионной изоляции, что снижает жесткость и повышает трещиностойкость покрытия.

Монолитные бетонные утяжеляющие покрытия подводных трубопроводов – более экономически эффективны по сравнению с балластировкой одиночными грузами с учетом транспортных и погрузочно-разгрузочных операций.

Сплошное бетонное покрытие для плетей трубопроводов диаметром 529–1220 мм получают также с применением сборных железобетонных утяжелителей типа УКС (утяжелитель консольно-сварной), которые изготовляют в заводских условиях в виде цилиндрической тонкостенной оболочки открытого профиля с консольными клинообразными выступами. При сборке покрытия консольные выступы оболочек входят один в другой и их сваривают. На конце плети труб приваривают упор для предотвращения сдвига покрытия при укладочных операциях подводного перехода трубопровода. Утяжелители типа УКС устанавливают на антикоррозионную изоляцию без футеровки деревянными рейками. По сравнению с чугунными грузами применение таких утяжелителей снижает расход металла в 9–10 раз, а стоимость в 2–3 раза.

37. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДОВ И КОНСТРУКЦИЙ

При сооружении газонефтепроводов, наряду с наложением изоляционного покрытия на их поверхность, применяют электрохимическую противокоррозионную защиту. Изоляционные покрытия без электрохимической защиты не могут надежно защищать трубопровод от коррозии, так как в процессе наложения изоляции и укладки трубопровода в траншею могут нарушаться ее сплошность и целостность, образовываться различные дефекты, микровключения и т.д. В период эксплуатации в изоляционных материалах происходят необратимые процессы (старение, износ от воздействия грунта), приводящие к снижению электроизоляционных свойств покрытия, а иногда к нарушению его механической прочности и целостности. Применяя одну электрохимическую защиту без изоляции экономически невыгодно из-за большого расхода электроэнергии на процесс защиты. Наиболее эффективно защищают газонефтепроводы от коррозии сочетанием обоих видов защиты: наложением изоляционного покрытия

и электрохимическим способом, заключающимся в создании поляризационного защитного потенциала на трубопроводе (катоде) по отношению к окружающей среде (грунту) от источника постоянного тока (катодная защита), или присоединением к трубопроводу (катоде) специальных электродов-анодов (протекторная защита).

Для электрохимической защиты газонефтепроводов применяют катодные станции, протекторные установки, а также дренажную защиту от блуждающих токов. Катодные станции устанавливают и для защиты от коррозии подземных коммуникаций компрессорных станций, промышленных объектов и других сооружений. С применением протекторов защищают от коррозии не только газонефтепроводы, а также резервуары и другие конструкции.

Материалы для протекторов

Протекторная защита заключается в присоединении к защищаемой конструкции (трубопроводу) металлического протектора (анодного электрода – анода), имеющего более низкий электрохимический потенциал, чем потенциал защищаемого металла. Трубопровод является катодом.

В основу протекторной защиты положен принцип работы гальванического элемента. Анодный процесс сопровождается переходом ионов металла в электролит–грунт (разрушение протектора), в то время как на катоде происходит разряд этих ионов, и коррозионного разрушения трубопровода в грунте не происходит.

Протекторную защиту можно осуществить одиночными и групповыми установками (рис. 101). Тип и схему расположения протекторов выбирают в соответствии с местными условиями сооружаемого объекта. Групповые протекторные установки обладают рядом преимуществ по сравнению с одиночными: удобство контроля, меньшая стоимость строительно-монтажных работ, более широкий диапазон действия протекторов, простота эксплуатации.

Устанавливают протекторы в грунт в скважинах, заполненных активатором так, чтобы протектор был покрыт активатором со всех сторон. Активатор представляет собой тестообразную массу, состоящую из смеси сернокислых солей магния, натрия и кальция ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$; $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ и $CaSO_4 \cdot 2H_2O$), сухой глины и воды в определенном соотношении в зависимости от условий применения и материала протектора.

Протекторы подразделяют на литые длиной до 1,5 м и протяженные длиной более 10 м. Протяженный протектор представляет собой биметаллический пруток, состоящий из оболочки (магниевый сплав) и стального оцинкованного контактного стержня, проходящего по центру прутка. Протяженные магниевые протекторы типа ПМТ применяют для защиты трубопроводов.

Для подземных условий работы выпускают комплекты литые

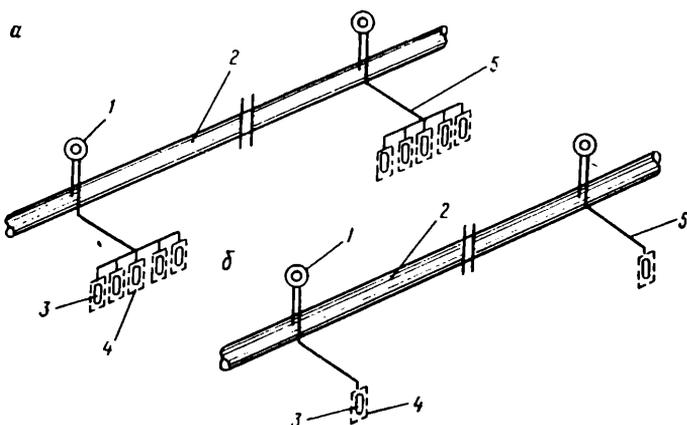


Рис. 101. Схема электрической протекторной защиты трубопровода:

а – групповые протекторы; *б* – одиночные протекторы; 1 – контрольно-измерительный пункт; 2 – трубопровод; 3 – протектор; 4 – активатор; 5 – проводник

протекторы, представляющие собой литые магниевые аноды типов ПМ5, ПМ10, ПМ20, помещенные вместе с порошкообразным активатором в хлопчатобумажные мешки (рис. 102). Для анодов типов ПМ5, ПМ10, ПМ20 соответственно: условный диаметр – 95, 123 и 131 мм; длина – 500, 600 и 610 мм; масса – 5, 10 и 20 кг. Для протекторов типов ПМ5У, ПМ10У, ПМ20У соответственно: диаметр – 165, 200 и 270 мм; длина – 580, 700 и 710 мм; масса – 16, 30 и 60 кг.

Теоретическую токоотдачу протекторов принимают равной $2330A \cdot ч / кг$. Коэффициент полезного действия протекторов из магниевого сплава марки МП1 составляет 0,65, а из магниевого сплава марки МП2 – 0,6. Удельное электрическое сопротивление активатора протекторов равно $1,6 \text{ Ом} \cdot м$. Стационарный потенциал протекторов относительно медно-сульфатного электрода сравнения принимают равным 1,6 В.

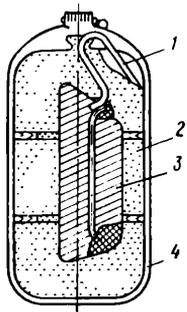


Рис. 102. Комплектный магниевый протектор:

1 – изолированный проводник марки ВРГ; 2 – активатор; 3 – магниевый анод; 4 – хлопчатобумажный мешок

Протекторы можно изготавливать из любого металла, обладающего более отрицательным потенциалом, чем защищаемый материал. Но по экономическим и техническим соображениям наиболее пригодными являются магнии, алюминий, цинк и их сплавы. В сплавы иногда вводят марганец, кальций (в небольших количествах). Металл протектора должен характеризоваться определенным электрическим сопротивлением, а также удельным током, получаемым в единицу времени с единицы массы протектора при полном его растворении). Поэтому важная характеристика металла – его электрохимический эквивалент. Эффективность работы протектора зависит от внутреннего электрического сопротивления цепи "защищаемая конструкция – протектор". В связи с этим материал не должен покрываться слоем малозлектропроводных оксидов, образующихся в результате его растворения. Поэтому наибольшее распространение для электрической защиты трубопроводов от коррозии получили протекторы их магниевых сплавов.

В магниевых сплавах легирующие добавки – алюминий, цинк и марганец, растворяющиеся в магнии. Растворимость различных элементов в магнии изменяется в зависимости от температуры, что позволяет применять для этих сплавов термообработку, состоящую в закалке с последующим старением, но у них не происходит большого изменения свойств, как у алюминиевых сплавов. Алюминий и цинк вводят в промышленные сплавы магния для упрочнения, а марганец – для повышения коррозионной стойкости и измельчения зерна. Кроме того, в сплав магния вводят и другие элементы, обычно в сотых долях процента, например, цинк и редкоземельные материалы (РЗМ) для измельчения зерна и улучшения механических свойств, главным образом пластичности; бериллий для уменьшения склонности к воспламенению при разливке.

Сплавы магния подразделяют на деформируемые марки МА и литейные марки МЛ. Для изготовления протекторов применяют литейные магниевые сплавы. Наиболее простой – литейный сплав МЛ-2 (с добавкой марганца 1–2 %). Он обладает высокой коррозионной стойкостью. Значительно лучшие технологические и механические свойства имеют сплавы МЛ-4 (90,5 % Mg, 6 % Al, 3 % Zn и 0,5 % Mn) и МЛ-5 (92,1–89,1 % Mg, 7,5–9,3 % Al, 0,2–0,8 % Zn, 0,2–0,8 % Mn). Отрицательный потенциал их равен 1,5–1,6 В.

Цинк – один из первых материалов, используемый для протекторной защиты. Цинк – металл с низкими температурами плавления (419°С) и кипения (906°С), высокой плотностью (7,13 г/см³). Прочность цинка низка ($\sigma_{\text{в}} = 150$ МПа) при высокой пластичности ($\delta \sim 50$ %). Аллотропических превращений этот металл не имеет. Цинк применяют в промышленности для горячего и гальванического оцинкования стальных листов, изготовления гальванических элементов и других целей. Цинк используют также как добавку в разные сплавы. В зависимости от чистоты цинк подразделяют на марки: ЦВ (99,99 % Zn), ЦО (99,96 % Zn); ЦІ

(99,94 % Zn), Ц2 (99,9 % Zn), Ц3 (98,7 % Zn) и Ц4 (97,5 % Zn). Основные примеси в техническом цинке – железо, кадмий и некоторые другие элементы. Для изготовления протектора применяли обычно цинк высокой чистоты, например ЦО. Так как цинк имеет невысокий электрохимический эквивалент ($820\text{А} \cdot \text{ч}/\text{кг}$), цинковые протекторы вытеснили магниевые.

Алюминий в качестве анодов для протекторной защиты распространения пока не получил, так как он обладает склонностью выпрямлять переменный блуждающий ток в почвах, содержащих сульфат кальция. Но в почвах с высокой коррозионной активностью грунтов, где магниевые протекторы имеют небольшой срок службы (например, в солончаковых грунтах), протекторы из сплавов алюминия весьма перспективны благодаря высокой коррозионной стойкости и, следовательно, большому сроку службы.

Материал для анодного заземления

Применяемые для электрической защиты магистральных трубопроводов катодные станции обязательно заземляют с помощью электродов анодного заземления (заземлителей). Анодное заземление во время работы катодной станции находится под положительным потенциалом по отношению к окружающей среде, в связи с этим процессы электролиза приводят к довольно быстрому разрушению материала заземлителей. В зависимости от характера окружающей среды (почвы, воды) ток 1А, стекающий с анодного заземления, разрушает в год до 10 кг стали, 5–10 кг чугуна.

В качестве электродов анодного заземления катодных станций применяют сталь, железокремний, графит и графитопласт в коксовой засыпке и без нее. Сталь можно использовать и в коксобетоне.

Анодные заземления (заземлители) подразделяют по конструктивному исполнению и глубине заложения на следующие группы:

подпочвенное анодное заземление, которое устанавливают в грунтах с глубиной погружения до 10 м ниже поверхности земли с горизонтальным, вертикальным и комбинированным расположением электродов;

глубинное анодное заземление, которое устанавливают в специально пробуренные скважины (например, свайные анодные заземления и используемые в качестве анодного заземления обсадные колонны скважин, глубинные заземления с выходом рабочей части на поверхность земли, свайные заземления с выходом торца на поверхность);

орошаемое анодное заземление – подпочвенное глубинное заземление, которое устанавливают в засушливых местностях, пустынях и безводных степях. Они имеют устройства для увлажнения грунта, что приводит к снижению его сопротивления растеканию.

В качестве протяженных горизонтальных анодных заземлений катодных станций можно использовать бросовые подземные стальные сооружения, а также ликвидированные скважины (как глубинные анодные заземления).

Подпочвенное анодное заземление сооружают из отдельных электродов, устанавливаемых вертикально в грунт и соединяемых в общий контур. К катодной станции их подключают изолированным кабелем. Вертикальное подпочвенное анодное заземление выполняют однорядным, многорядным и в виде сложных фигур в зависимости от местных условий. Наиболее распространено для обычных условий средней полосы СССР подпочвенное заземление катодных станций с горизонтальным расположением электродов. При их сооружении применяют те же механизмы, что и при сооружении газонефтепроводов.

При выборе материала для анодного заземления учитывают расчетную среднюю силу тока и падение напряжения в цепи катодной станции, гидрогеологические условия грунта в месте размещения заземления (удельное сопротивление грунта, влажность, глубину промерзания); плотность застройки территории, где будет сооружаться катодная станция и другие особенности (табл. 48).

Глубинные анодные заземления используют в тех местных условиях, в которых установка подпочвенных анодных заземлений не обеспечивает необходимую эффективность защиты.

Т а б л и ц а 48. Условия применения различных материалов для электродов анодных заземлений катодных станций

Материал электрода	Удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м	Влажность грунтов	Анодная плотность тока, мА/дм ²	Потери массы электрода, кг·А/год
Сталь	> 100	—	100	9–10
Сталь в коксовой засыпке	> 20	Малоувлажненные	100	1–1,5
Сталь в коксобетоне	> 20	Болотистые и обводненные	80	0,6–1,2
Железкремний	> 30	Малоувлажненные	100	0,3–0,6
Железкремний в коксовой засыпке	< 30	То же	80	0,12–0,2
Графитированный	< 100	—	80	0,9–1,2
Графитированный в коксовой засыпке	< 50	Малоувлажненные	80	0,2–0,5
Графитопласт	—	Влажные	40	0,7–1
Графитопласт в коксовой засыпке	< 30	Малоувлажненные	40	0,5–0,8

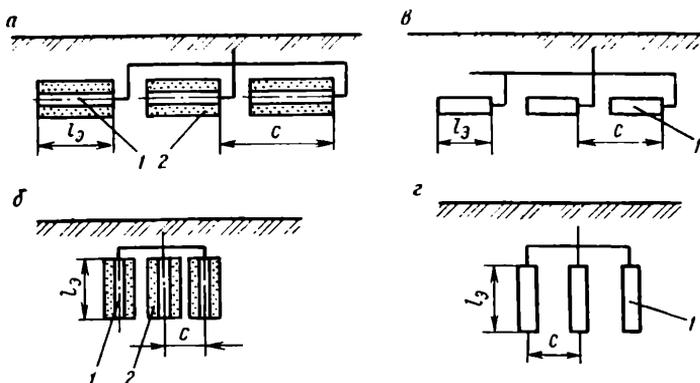


Рис. 103. Схема расположения анодных заземлителей:

а, б – соответственно горизонтальное, вертикальное в коксовой засыпке; *в, г* – соответственно горизонтальное, вертикальное без засыпки; *1* – электрод; *2* – коксовая засыпка; *c* – расстояние между электродами; l_z – длина электрода

Рекомендуют железокремнистые анодные заземлители типа ЗЖК, АК и АКО.

Графитопластовые материалы изготавливают в виде электродов марок ЭГ, ЭГ-1, Э-2. Активный элемент электродов типа ЭГ – труба из графитопласта АТМ-1 различной длины диаметром 114 мм. Электрод длиной 3000 мм имеет массу 22 кг.

Электроды анодных заземлений (заземлители) устанавливают в электропроводящий наполнитель, расположенный между металлом и грунтом (рис. 103). В качестве наполнителя (засыпки) применяют кокс или уголь в виде мягких фракций и графитовую крошку. Наполнители увеличивают активную поверхность, уменьшают сопротивление растеканию тока, увеличивают долговечность заземлителей. Наполнителем может служить коксовая мелочь с размером зерен до 10 мм, в которой содержится до 15 % влаги, до 15 % золы и не более 8 % летучих веществ. Коксовая мелочь имеет пористость по объему 45–55 %. Ее удельное сопротивление составляет 0,2–0,3 Ом·м. При использовании коксовой мелочи потеря массы анодных заземлителей уменьшается до 10 раз по сравнению с непосредственным размещением в грунте. Сопротивление растеканию тока стального анодного заземлителя в коксовой мелочи уменьшается на 30 % и становится более стабильным и менее чувствительным к изменениям влажности и температуры грунта. Срок службы анодного заземлителя в коксовой мелочи составляет до 30 лет и более.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие виды материалов применяют для изоляции газонефтепроводов?
2. Какие основные требования предъявляют к изоляционным материалам?
3. Какие виды полимерных материалов применяют для изоляционных покрытий? Их перспективность?
4. Какие типы полимерных изоляционных покрытий применяют, их послойный состав?
5. Какие виды материалов на основе битума применяют для газонефтепроводов, их характеристики?
6. Какие типы битумных покрытий применяют для газонефтепроводов? До каких диаметров? Послойный состав покрытий?
7. Когда применяют лакокрасочные покрытия? Особенность их нанесения?
8. Какие виды стеклянных покрытий применяют для труб?
9. Какие достоинства и недостатки имеют стеклоэмалевые покрытия? Перспективы их применения для газонефтепроводов?
10. В чем заключается остеклование труб? Перспективы его применения?
11. В чем заключается принцип и назначение футерования труб?
12. По каким признакам и на какие виды классифицируют теплоизоляционные материалы?
13. Какой послойный состав имеет теплоизоляционное покрытие трубопровода бесканальной прокладки?
14. Какие виды балластировки применяют для подводных трубопроводов?
15. Какие утяжеляющие грузы применяют для газонефтепроводов?
16. Как осуществляют обетонирование трубопроводов? Его достоинства и недостатки?
17. Какие виды материалов молучили применение для протекторов? Их назначение?
18. Охарактеризуйте виды и назначение анодных заземлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Болотов А.С.* Перспективы применения электросварных труб из экономнолегированных сталей. – Строительство трубопроводов. 1984, № 9.
2. *Бортников В.Г.* Основы технологии переработки пластических масс. Л., Химия, 1983.
3. *Виноградов А.Г.* Трубное производство. М., Металлургия, 1981.
4. *Возможности комплексной теплоизоляции и защиты трубопроводов от коррозии / А.М. Зиневич, А.Е. Гуликов, Г.А. Булатов и др.* – Строительство трубопроводов. 1985, № 9.
5. *Гуляев А.П.* Металловедение. М., Металлургия, 1986.
6. *Гуревич Д.Ф. и Шпаков О.Н.* Справочник конструктора трубопроводной арматуры, Л., Машиностроение, 1987.
7. *Гуль В.Е., Акутин М.С.* Основы переработки пластмасс. М., Химия, 1985.
8. *Гуль В.Е., Кулезнев В.Н.* Структура и механические свойства полимеров. М., Высшая школа, 1979.
9. *Гуревич Д.Ф.* Трубопроводная арматура. Л., Машиностроение, 1981.
10. *Зиневич А.М., Прокофьев В.И., Ментюков В.П.* Технология и организация строительства магистральных трубопроводов больших диаметров. М., Недра, 1979.
11. *Защита металлических сооружений от подземной коррозии / И.В. Стрижевский, М.М. Зиневич, К.К. Никольский и др.* М., Недра, 1981.
12. *Колчинский Ю.Л.* Изготовление и монтаж технологических трубопроводов из неметаллических материалов. М., Стройиздат, 1985.
13. *Ковалев Е.П.* Комплексы специальной техники для сооружения магистральных и промышленных трубопроводов. – Строительство трубопроводов. 1984, № 4.
14. *Комар А.Г., Баженов Ю.М., Сулименко Л.М.* Технология производства строительных материалов. М., Высшая школа, 1984.
15. *Крашенинников А.Н., Иванов В.В., Шутов В.Е.* Применение фенольных пенопластов для теплоизоляции трубопроводов. – Строительство трубопроводов. 1985, № 9.
16. *Кулешов И.В., Торнер Р.В.* Теплоизоляция из вспененных полимеров. М., Стройиздат, 1987.
17. *Ляхтин Ю.М., Арзамасов Б.Н.* Химико-термическая обработка металлов. М., Металлургия, 1985.
18. *Лыков М.В.* Защита от коррозии резервуаров, цистерн, тары и трубопроводов для нефтепродуктов бензостойкими покрытиями. М., Химия, 1978.
19. *Михайлов А.В.* Хрупкое разрушение элементов стальных конструкций. М., Стройиздат, 1986.
20. *Орлов А.Н.* Введение в теорию дефектов в кристаллах. М., Высшая школа, 1982.
21. *Пикернг Ф.* Металловедение и разработка сталей. М., Металлургия, 1982.
22. *Поповский Б.В., Дикун В.Н.* Изготовление и монтаж крупногабаритных листовых конструкций. М., Стройиздат, 1983.
23. *Производство труб.* Под редакцией И.П. Потапова. М., Металлургия, 1980.
24. *Ромейко В.С., Володин В.М.* Эффективность производства и применения неметаллических труб в строительстве. М., Стройиздат, 1980.
25. *Скакун М.Г.* Сферические резервуары. М., Стройиздат, 1986.
26. *Скугорова Л.П.* Металловедение и трубопроводостроительные материалы. М., Недра, 1987.

27. *Стальные и чугунные трубы: Справочник* / В.И. Стрижак, В.В. Шерианский, В.П. Сокуренок и др. М., Металлургия, 1982.
28. *Стрижевский И.В.* Подземная коррозия и методы защиты / Под общей редакцией Я.М. Колотыркина. М., Металлургия, 1986.
29. *Тепловая изоляция: Справочник строителя* / Под редакцией Г.Ф. Кузнецова. М., Стройиздат, 1985.
30. *Термическая обработка в машиностроении: Справочник* / Под редакцией Ю.М. Лахтина, А.Г. Рахштадта. М., Машиностроение, 1980.
31. *Технология металлов и конструкционные материалы* / Под редакцией В.А. Кузьмина. М., Машиностроение, 1981.
32. *Трущелева Т.Е., Зиневич А.М., Козловская А.А.* Современные изоляционные материалы. М., изд. ВНИИСТ, 1981.

ТУ 100-80
(НКК)
(9,8 МПа)

1420	15,7	637,5	510	18	49	58,8	85	0,41	14,9	
	19,5	637,5	510	18	49	58,8	85	0,41	18,5	
	14,2	588,4	461	20	49	58,8	85	0,38	12,2	
	17	588,4	461	20	49	58,8	85	0,38	14,6	
	21	588,4	461	20	49	58,8	85	0,38	18,1	
	18,6	686,5	539,4	16	58,8	117,7	85 (-20 °C)	0,45	13,4	
						(-60 °C)	(-20 °C)			
		22,2	686,5	539,4	16	58,8	117,7	85	0,45	16
		27,5	686,5	539,4	16	58,8	117,7	85	0,46	19,8
		20	637,5	510	18	58,8	117,7	85	0,43	13,6
		23,9	637,5	510	18	58,8	117,7	85	0,44	16,3
		29,6	637,5	510	18	58,8	117,7	85	0,45	20,2
		21,6	588,4	461	20	58,8 (-60 °C)	117,7 (-20 °C)	85 (-20 °C)	0,42	13,3
		25,8	588,4	461	20	58,8	117,7	85	0,43	16
		31,9	588,4	461	20	58,8	117,7	85	0,44	19,7
	1220	15,3	686,5	539,4	16	58,8 (-60 °C)	78,5 (-20 °C)	85 (-20 °C)	0,45	12,9
		18,3	686,5	539,4	16	58,8	78,5	85	0,45	15,4
		22,7	686,5	539,4	16	58,8	78,5	85	0,45	19
		16,5	637,5	510	18	58,8	78,5	85	0,43	13,1
		19,6	637,5	510	18	58,8	78,5	85	0,43	15,6
24,4		637,5	510	18	58,8	78,5	85	0,44	19,4	
17,8		588,4	461	20	58,8	78,5	85	0,42	12,8	
21,2		588,4	461	20	58,8	78,5	85	0,42	15,3	
1020		26,3	588,4	461	20	58,8	78,5	85	0,43	18,9
		12,2	686,5	539,4	16	49 (-60 °C)	58,8(-20 °C)	85 (-20 °C)	0,45	12,3
	14,6	686,5	539,4	16	49	58,8	85	0,45	14,7	
	18,1	686,5	539,4	16	49	58,8	85	0,45	18,1	
	13,1	637,5	510	18	49	58,8	85	0,43	12,5	
	15,7	637,5	510	18	49	58,8	85	0,43	14,9	
	19,5	637,5	510	18	49	58,8	85	0,43	18,5	
	14,2	588,4	461	20	49	58,8	85	0,42	12,2	
	17	588,4	461	20	49 (-60 °C)	58,8 (-20 °C)	85 (-20 °C)	0,42	14,6	
	21	588,4	461	20	49	58,8	85	0,42	18,1	

Продолжение прил. 1

Технические условия (рабочее давление)	Наружный диаметр труб, мм	Номинальная толщина стенки, мм	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Ударная вязкость КСУ Дж/см ²	Ударная вязкость КСВ, Дж/см ²	Процент волокна в изломе образца ДВТТ, %	Эквивалент углерода C_3 , не более	Заводское испытательное давление, МПа	
ТУ 100-80 (с) (9,8 МПа)	1420	18,6	686,5	539,4	16	58,8 (-60 °С)	117,7 (-20 °С)	85 (-20 °С)	0,46	13,4	
		22,2	686,5	539,4	16	58,8	117,7	85	0,46	16	
		27,5	686,5	539,4	16	58,8	117,7	85	0,43	19,8	
		20	637,5	510	18	58,8	117,7	85	0,44	13,6	
		23,9	637,5	510	18	58,8	117,7	85	0,45	16,3	
		29,6	637,5	510	18	58,8	117,7	85	0,43	20,2	
		21,6	588,4	461	20	58,8	117,7	85	0,43	13,3	
		25,8	588,4	461	20	58,8	117,7	85	0,44	16	
		31,9	588,4	461	20	58,8	117,7	85	0,46	19,7	
		1220	15,3	686,5	539,4	16	58,8 (-60 °С)	78,5 (-20 °С)	85 (-20 °С)	0,46	12,9
		18,3	686,5	539,4	16	58,8	78,5	85	0,46	15,4	
		22,7	686,5	539,4	16	58,8	78,5	85	0,46	19	
		16,5	637,5	510	18	58,8	78,5	85	0,43	13,1	
		19,6	637,5	510	18	58,8	78,5	85	0,43	15,6	
	24,4	637,5	510	18	58,8	78,5	85	0,44	19,4		
	17,8	588,4	461	20	58,8	78,5	85	0,42	12,8		
	21,2	588,4	461	20	58,8	78,5	85	0,43	15,3		
	26,3	588,4	461	20	58,8	78,5	85	0,44	18,9		
	1020	12,2	686,5	539,4	16	49 (-60 °С)	58,8 (-20 °С)	85 (-20 °С)	0,46	12,3	
	14,6	686,5	539,4	16	49	58,8	85	0,46	14,7		
	18,1	686,5	539,4	16	49	58,8	85	0,46	18,1		
	13,1	637,5	510	18	49	58,8	85	0,43	12,5		
	15,7	637,5	510	18	49	58,8	85	0,43	14,9		
	19,5	637,5	510	18	49	58,8	85	0,43	18,5		
	14,2	588,4	461	20	49	58,8	85	0,42	12,2		

ТУ 100-80 кс (9,8 МПа)	1420	17	588,4	461	20	49	58,8	85	0,42	14,6
		21	588,4	461	20	49	58,8	85	0,43	18,1
		18,6	686,5	539,4	16	58,8 (-60 °C)	78,5 (-20 °C)	85 (-20 °C)	0,46	13,4
		22,2	686,5	539,4	16	58,8	78,5	85	0,46	16
		27,5	686,5	539,4	16	58,8	78,5	85	0,46	18,8
		20	637,5	510	18	58,8	78,5	85	0,44	13,6
		23,9	637,5	510	18	58,8	78,5	85	0,45	16,3
		29,6	637,5	510	18	58,8	78,5	85	0,45	19,1
		21,6	588,4	461	20	58,8	78,5	85	0,42	13,3
		25,8	588,4	461	20	58,8	78,5	85	0,44	16
	1220	31,9	588,4	461	20	58,8	58,5	85	0,44	18,6
		15,3	686,5	539,4	16	58,8 (-60 °C)	78,5 (-20 °C)	85 (-20 °C)	0,46	12,9
		18,3	686,5	539,4	16	58,8	78,5	85	0,46	15,4
		22,7	686,5	539,4	16	58,8	78,5	85	0,46	19
		16,5	637,5	510	18	58,8	78,5	85	0,44	13,1
		19,6	637,5	510	18	58,8	78,5	85	0,44	15,6
		24,4	637,5	510	18	58,8	78,5	85	0,45	19,4
		17,8	588,4	461	20	58,8	78,5	85	0,42	12,8
		21,2	588,4	461	20	58,8	78,5	85	0,42	15,3
		26,3	588,4	461	20	58,8	78,5	85	0,44	18,9
1020	12,2	686,5	539,4	16	49 (-60 °C)	58,8 (-20 °C)	85 (-20 °C)	0,46	12,3	
	14,6	686,5	539,4	16	49	58,8	85	0,46	14,7	
	18,1	686,5	539,4	16	49	58,8	85	0,46	18,2	
	13,1	637,5	510	18	49	58,8	85	0,44	12,5	
	15,7	637,5	510	18	49	58,8	85	0,44	14,9	
	19,5	637,5	510	18	49	58,8	85	0,44	18,5	
	14,2	588,4	461	20	49	58,8	85	0,42	12,2	
	17	588,4	461	20	49	58,8	85	0,42	14,6	
	21	588,4	461	20	49	58,8	85	0,42	18,1	
	15,7	588,4	461	20	49 (-60 °C)	78,5 (-20 °C)	80 (-20 °C)	0,41	8,7	
ТУ 40/48/56- 79 (7,4 МПа)	1420	18,7	588,4	461	20	49	78,5	80	0,42	10,5
		23,2	588,4	461	20	49	78,5	80	0,44	13,1
		12,9	588,4	461	20	49	58,8 (-20 °C)	70 (-20 °C)	0,4	8,4
		15,4	588,4	461	20	49	58,8	70	0,41	10
		1020	12,9	588,4	461	20	39,2 (-60 °C)	49 (-20 °C)	60 (-20 °C)	0,4

Продолжение прил. 1

Технические условия (рабочее давление)	Наружный диаметр труб, мм	Номинальная толщина стенки, мм	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Ударная вязкость КСU Дж/см ²	Ударная вязкость КСV, Дж/см ²	Процент волокна в изломе образца ДВТТ, %	Эквивалент углерода C_3 , не более	Заводское испытательное давление, МПа	
ТУ 20/28/40/48 -- 79 (7,4 МПа)	1220	15,4	588,4	461	20	—	58,8 (-20 °C)	70 (-20 °C)	0,42	10	
		19,1	588,4	461	20	58,8 (-60 °C)	—	70	0,43	12,5	
	1020	12,9	588,4	461	20	—	49 (-20 °C)	60 (-20 °C)	0,42	10,1	
		16	588,4	461	20	49 (-60 °C)	—	60	0,42	12,5	
	720	7,6	588,4	461	20	—	39,2 (-20 °C)	50 (-20 °C)	0,4	8,3	
		9,1	588,4	461	20	—	39,2	50	0,4	10	
	530	11,3	588,4	461	20	39,2 (-60 °C)	—	50	0,42	12,5	
		6	529,6	392,3	20	—	34,3 (-20 °C)	50 (-20 °C)	0,4	8,1	
		9	529,6	392,3	20	—	34,3 (-20 °C)	50 (-20 °C)	0,4	11,3	
		12	529,6	392,3	20	34,3 (-60 °C)	—	50	0,4	16,7	
		14	529,6	392,3	20	34,3	—	50	0,4	19,6	
		16	529,6	392,3	20	34,3	—	50	0,4	21,6	
	Дополнение № 1 к ТУ 20-28-40-48-79 (5,4 МПа)	530	6	529,2	392	20	34,3 (-60 °C)	34,3 (-20 °C)	50 (-20 °C)	0,43	8,2
			6,5	529,2	392	20	34,3	34,3	50	0,43	8,9
720		6,2	529,2	392	20	39,2 (-60 °C)	34,3 (-20 °C)	50 (-20 °C)	0,43	6,2	
		7,1	529,2	392	20	39,2	34,3	50	0,43	7,2	
		7,4	529,2	392	20	39,2	34,3	50	0,43	7,5	
		9,5	529,2	392	20	39,2	34,3	50	0,43	9,6	
820		7,1	529,2	392	20	39,2 (-60 °C)	34,3 (-20 °C)	50 (-20 °C)	0,43	6,3	
		8,5	529,2	392	20	39,2	34,3	50	0,43	7,5	
1020		10,5	529,2	392	20	39,2	34,3	50	0,43	9,3	
		8	588	460,6	20	39,2 (-60 °C)	39,2 (-20 °C)	60 (-20 °C)	0,43	6,7	
		9,5	588	460,6	20	39,2	39,2	60	0,43	7,9	

Дополнение № 2 к ТУ 20- 28-40-48-79 (6,3 МПа)	1220	12	588	460,6	20	39,2	39,2	60	0,43	10,1	
		9,5	588	460,6	20	49 (-60 °C)	39,2 (-20 °C)	60 (-20 °C)	0,43	6,6	
		11,5	588	460	20	49	39,2	60	0,43	8	
	530	14,1	588	460	20	49	39,2	60	0,43	9,8	
		7,2	529,2	392	20	29,4 (-60 °C)	29,4 (-5 °C)	-	0,43	9,9	
		6,9	529,2	392	20	39,2 (-60 °C)	29,4 (-5 °C)	-	0,43	7	
	720	8,3	529,2	392	20	39,2	29,4	-	0,43	8,4	
		10,1	529,2	392	20	39,2	29,4	-	0,43	10,2	
		10	588	460,6	20	49 (-60 °C)	58,8 (-5 °C)	-	0,43	7	
	1220	11	588	460,6	20	49	58,8	-	0,43	7,7	
		12,5	588	460,6	20	49	58,8	-	0,43	8,7	
		13,5	588	460,6	20	49	58,8	-	0,43	9,4	
ТУ 40/48/ 56-80 (9,8 МПа)	1420	21,6	588,4	461	18	58,8 (-60 °C)	117,7 (-20 °C)	85 (-20 °C)	0,46	12,4	
		25,8	588,4	461	18	58,8	117,7	85	0,46	14,8	
		31,9	588,4	461	18	58,8	117,7	85	0,47	18,3	
	1220	17,8	588,4	461	18	58,8 (-60 °C)	78,5 (-20 °C)	85 (-20 °C)	0,46	11,7	
		21,2	588,4	461	18	58,8	78,5	85	0,46	14	
		26,3	588,4	461	18	58,8	78,5	85	0,46	17,6	
	1020	14,2	588,4	461	18	49 (-60 °C)	58,8 (-20 °C)	85	0,46	11,1	
		17	588,4	461	18	49	58,8	85	0,46	13,3	
		21	588,4	461	18	49	58,8	85	0,46	16,7	
	ТУ 56-83 (7,4 МПа)	1420	15,7	588,4	461	20	58,8 (-60 °C)	78,5 (-20 °C)	80 (-20 °C)	0,41	9,4
			15,7	588,4	461	20	49 (-60 °C)	78,5 (-20 °C)	80 (-20 °C)	0,41	8,7
			18,7	588,4	461	20	49	78,5	80	0,42	10,5
		1220	23,2	588,4	461	20	49	78,5	80	0,44	13,1
25			588,4	461	20	49	78,5	80	0,44	14,3	
12,9			588,4	461	20	58,8 (-20 °C)	58,8 (-20 °C)	70 (-20 °C)	0,4	8,4	
48/56-79 (с дополнени- ем) (7,4 МПа)		15,4	588,4	461	20	58,8	58,8	70	0,41	10	
		19,1	588,4	461	20	58,8	58,8	70	0,42	12,5	
		26	588,4	461	20	58,8	58,8	70	0,44	17,4	
1020		10,8	588,4	461	20	49 (-60 °C)	49 (-20 °C)	60 (-20 °C)	0,4	8,4	
		12,9	588,4	461	20	49	49	60	0,4	10,1	
		16	588,4	461	20	49	49	60	0,41	12,5	
720		7,6	588,4	461	20	39,2 (-60 °C)	39,2 (-20 °C)	50 (-20 °C)	0,4	8,3	

Продолжение прим. 1.

Технические условия (рабочее давление)	Наружный диаметр труб, мм	Номинальная толщина стенки, мм	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Ударная вязкость КСВ, Дж/см ²	Ударная вязкость КСВ, Дж/см ²	Процент волокна в изломе образца ДВТТ, %	Эквивалент углерода C_3 , не более	Заводское испытательное давление, МПа	
		9,1	588,4	461	20	39,2	39,2	50	0,4	10	
		11,3	588,4	461	20	39,2	39,2	50	0,4	12,5	
		16	588,4	461	20	39,2	39,2	50	0,41	17,7	
		20	588,4	461	20	39,2	39,2	50	0,42	18,6	
		22	588,4	461	20	39,2	39,2	50	0,44	18,6	
						<i>Италия</i>					
ТУ-100-80 (9,8 МПа)	1420	20	637,5	500,2	18	58,8 (-60 °C)	117,7 (-20 °C)	85 (-20 °C)	0,45	13,6	
		23,9	637,5	500,2	18	58,8	107,9 (-20 °C)	85	0,45	16,3	
		21,6	588,4	461	20	58,8	117,7 (-20 °C)	85	0,43	13,3	
		1220	16,5	637,5	500,2	18	58,8	78,5 (-20 °C)	85	0,45	13,1
			19,6	637,5	500,2	18	58,8	78,5	85	0,45	15,6
			17,8	588,4	461	20	58,8	78,5	85	0,43	12,7
			21,2	588,4	461	20	58,8	78,5	85	0,43	15,3
		1020	13,1	637,5	500,2	18	49 (-60 °C)	58,8 (-20 °C)	85	0,45	12,5
			15,7	637,5	500,2	18	49	58,8	85	0,45	14,9
			19,5	637,5	500,2	18	49	58,8	85	0,45	18,5
			14,2	588,4	461	20	49	58,8	85	0,43	12,2
			17	588,4	461	20	49	58,8	85	0,43	14,6
			21	588,4	461	20	49	58,8	85	0,43	18,1
	ТУ 20/28-40/ 48-79	1220	15,4	588,4	461	20	49 (-60 °C)	58,8 (-20 °C)	70 (-20 °C)	0,43	10
19,1			588,4	461	20	49	58,8	70	0,43	12,5	

(7,4 МПа)	1020	12,9	588,4	461	20	39,2 (-60 °C)	49 (-20 °C)	60 (-20 °C)	0,42	10,1
		16	588,4	461	20	39,2	49	60	0,42	12,5
	720	7,6	529,6	392,3	20	39,2	39,2 (-20 °C)	50 (-20 °C)	0,4	8,3
		9,1	529,6	392,3	20	39,2	39,2	50	0,4	10
		11,3	529,6	392,3	20	39,2	39,2	50	0,4	12,5
	530	6	529,6	392,3	20	39,2	39,2	50	0,4	8,1
		9	529,6	392,3	20	39,2	39,2	50	0,4	11,3
		12	529,6	392,3	20	39,2	39,2	50	0,4	16,7
		14	529,6	392,3	20	39,2	39,2	50	0,4	19,6
		16	529,6	392,3	20	39,2	39,2	50	0,4	21,6
ТУ 40/48/56/79 (7,4 МПа)	1420	15,7	588,4	461	20	49 (-60 °C)	78,5 (-20 °C)	80 (-20 °C)	0,42	8,7
		18,7	588,4	461	20	49	78,5	80	0,42	10,5
		23,2	588,4	461	20	49	78,5	80	0,44	18,1
	1220	12,9	588,4	461	20	49	58,8 (-20 °C)	70 (-20 °C)	0,4	8,4
		15,4	588,4	461	20	49	58,8	70	0,42	10
	1020	12,9	588,4	461	20	39,2 (-60 °C)	49 (-20 °C)	60 (-20 °C)	0,4	10,1
	<i>ЧССР</i>									
ТУ 301/84 (5,4-7,4 МПа)	530	7	490	355	20	39,2 (-40 °C)	29,4 (-5 °C)	-	0,42	7,7
		7,5	490	355	20	39,2	29,4	-	0,42	8,1
		8	490	355	20	39,2	29,4	-	0,42	8,9
ТУ 55-86 (5,4 МПа)	1220	9,5	588,4	461	20	49 (-60 °C)	39,2 (-20 °C)	60 (-20 °C)	0,43	6,6
		11,4	588,4	461	20	49	39,2	60	0,43	7,9
		14,1	588,4	461	20	49	39,2	60	0,43	9,8
	1020	8	588,4	461	20	39,2 (-60 °C)	49 (-20 °C)	60 (-20 °C)	0,42	6,7
		9,5	588,4	461	20	39,2	49	60	0,42	7,8
		11,8	588,4	461	20	39,2	49	60	0,42	9,8
	720	6,2	529,6	392,3	20	39,2 (-60 °C)	39,2 (-20 °C)	50 (-20 °C)	0,42	6,2
		7,5	529,6	392,3	20	39,2	39,2	50	0,42	7,6
		9,3	529,6	392,3	20	39,2	39,2	50	0,42	9,4
	530	6	529,6	392,3	20	34,3 (-60 °C)	34,3 (-20 °C)	50 (-20 °C)	0,42	8,2
6,5		529,6	392,3	20	34,3	34,3	50	0,42	8,9	

Примечания: 1. Трубы всех размеров – сварные, регулируемой прокатки с коэффициентом надежности по материалу $K_1 = 1,34$, кроме труб диаметром 530 мм (ЧССР) ($K_1 = 1,55$) бесшовных горячекатаных. 2. Все трубы проходят 100 %-ный ультразвуковой контроль. 3. В скобках дана температура испытания.

ОТКАЗЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

При испытании и эксплуатации линейной части магистральных трубопроводов могут происходить их отказы.

ВНИИСТом (В.В. Рождественский, В.П. Черний, О.И. Молдаванов, А.С. Болотов и др.) разработана методика исследования отказов. Причины отказов – различные факторы, которые условно можно разделить на три группы: заводской брак, брак строителей, несовершенство методов расчета и проектирования.

Прежде всего при отказах изучают техническую документацию по разрушенному участку трубопровода, в том числе: исполнительную схему, акты производства и приемки работ, сертификаты, журнал испытаний (с результатами отбора проб смеси при заполнении трубопровода газом), график подъема давления при испытании. При ознакомлении с исполнительной документацией определяют протяженность испытываемого участка, профиль участка, глубину заложения трубопроводов (при подземной прокладке), конструкцию трубопровода (при надземной или наземной прокладке), характеристики труб, из которых сооружен участок (сечение труб, марка стали, завод-изготовитель), схему раскладки труб по участку.

Далее составляют план и профиль отказавшего участка трубопровода, где указывают подключение к нему напорительно-опрессовочных агрегатов или компрессоров, расположение манометров и места отказа. В случае гидравлического испытания определяют давление в момент отказа в верхней и нижней точках профиля участка трубопровода и в месте отказа. Описывают процесс испытания, где указывают испытательную среду, дату и время отказа, климатические и погодные условия в месте отказа, в том числе температуру наружного воздуха, температуру, механический состав и влажность грунта, график подъема давления от начала испытаний до момента отказа и график последующего падения давления (при гидравлических испытаниях рекомендуется составить график зависимости внутреннего давления от объема закачиваемой воды).

Затем осматривают место отказа и составляют схему разрушенной части испытываемого участка трубопровода с привязкой к пикетам.

Определение характера разрушения и очага отказа выполняет комиссия непосредственно на месте отказа трубопровода. При осмотре места отказа трубопровода устанавливают и фиксируют общий характер разрушения (хрупкий, вязкий, квазихрупкий) по виду излома кромок разрыва.

Хрупкий излом представляет собой шероховатую плоскость скола, перпендикулярную к поверхности металла. Отличительная особенность хрупкого излома – отсутствие макропластических деформаций. Условно принято считать, что относительное сужение площади поперечного сечения металла при хрупком разрушении не превышает 1,5–2 %. Поверхность излома имеет явно выраженную кристаллическую структуру. Кристалличность в изломе – основной признак хрупкого разрушения.

Хрупкие изломы при разрушении труб реальных трубопроводов имеют, как правило, незначительные деформации (губы среза), прилегающие к поверхности металла. Размер губ среза фактически определяет степень хрупкости излома. Излом следует считать хрупким, если суммарная толщина губ среза не превышает 20 % от номинальной толщины стенки трубы. Хрупкое разрушение образуется в результате нормального отрыва (разрыва) под действием растягивающих напряжений. Плоскость разрушения в этом случае перпендикулярна к направлению растягивающих напряжений.

Вязкий (пластический) излом образуется в результате сдвига (среза). При

вязком изломе относительное сужение площади поперечного сечения превышает 15 %.

Поверхность вязкого разрушения – матовая и имеет характерное волокнистое строение, указывающее на широкое развитие пластической деформации в процессе разрушения. На поверхности металла, непосредственно прилегающего к вязкому излому, наблюдается утяжка (местное утонение) стенки трубы.

Вязкие изломы при разрушении труб могут быть трех разновидностей:

первая характеризует чисто сдвиговый пластический излом. Плоскость среза (сдвига) проходит через всю толщину стенки и образует с поверхностью металла угол, приблизительно равный 45° . Эта разновидность вязкого излома характерна прежде всего для стадии прекращения разрушения;

вторая – вязкий Z-образный излом. Профиль излома в данном случае представляет собой две взаимнопараллельные плоскости среза, составляющие с поверхностями металла угол около 45° . Плоскости среза разделены в середине толщины излома центральной полоской волокнистого излома, перпендикулярной к поверхности металла. Нередко в центральную полоску вкраплены кристаллы хрупкого излома. Эта разновидность наиболее характерна для распространения вязких разрушений в магистральных трубопроводах;

третья – вязкий V-образный излом. Этому виду излома присущи те же характерные особенности, которые свойственны вязкому Z-образному излому (II-разновидность). V-образный излом встречается в начале распространения вязкого разрушения, а также при разрушениях металла труб с весьма мелкой структурой, например, для термически упрочненных труб или труб из стали, прокатанной по регулируемому режиму температур и обжатий.

Квазихрупкий излом образуется при комбинированном (смешанном) характере разрушения, когда в центральной части толщины стенки имеется участок излома хрупкого типа, ориентированного нормально к поверхности листа (трубы), а остальные части стенки разрушаются вязко (срезом). Излом следует считать квазихрупким в случае, если суммарная толщина губ среза превышает 20 % от номинальной толщины стенки трубы, в противном случае излом необходимо считать хрупким.

При квазихрупком изломе наблюдается относительное сужение поперечного сечения, но оно не превышает 15 %. Квазихрупкий излом следует отличать от вязких изломов II- и III-разновидностей по структуре центральной полоски излома.

Условно вязкий (волокнистый) излом образуется без утяжки металла по толщине листа и характерен для очагов разрушений в сварных соединениях и в местах механических повреждений трубопроводов.

Общий характер распространения разрушения по трубопроводу определяют по траектории движения трещины. Хрупкая трещина, как правило, распространяется по волновой (синусоидальной) траектории. При этом осью синусоиды является образующая трубопровода. Без учета стадий торможения вязкое разрушение распространяется вдоль образующей трубопровода с незначительными отклонениями от прямолинейного движения. Кроме того, кромки разрыва при вязком разрушении трубопровода образуют беспорядочные гофры вследствие их пластического удлинения в процессе разрушения.

Очаг разрушения представляет собой, как правило, участок с прямым изломом, перпендикулярным к поверхности металла, независимо от того, каким является общий характер разрушения – хрупким или вязким. Излом в месте очага разрушения может быть хрупким (кристаллическим) или условно вязким (волокнистым).

При хрупком разрушении очаг определяют по характерному для хрупкого излома шевронному узору ("елочке"), острые углы которого всегда направлены противоположно направлению движения трещины. Схождение двух направленных

один к другому шевронных узоров указывает на начало распространения (очаг) разрушения. Поверхность трещины в очаге разрушения – гладкая, плоская или ступенчатая и кристаллическая, а на участке распространения она имеет характерный шевронный узор ("елочку"), являющийся признаком малой пластической деформации.

При вязком изломе очаговый участок разрушения перпендикулярен к поверхности листа и имеет волокнистый макрорельеф. Вязкий (пластический) излом иногда также имеет шевронный узор. Однако узор выражен слабо и принимать его во внимание при определении очага вязкого разрушения не рекомендуется. При установлении очага вязкого разрушения необходимо по кромкам разрыва отыскать участки с прямыми изломами, перпендикулярными к поверхности металла, и определить наиболее вероятный очаг разрушения.

При определении наиболее вероятного очага вязкого разрушения следует руководствоваться следующими дополнительными признаками:

очаг разрушения совпадает, как правило, с эпицентром образовавшегося при разрушении трубопровода котлована;

начало разрушения находится, как правило, в месте максимального раскрытия кромок (при гидравлических испытаниях трубопроводов) или на самом, развернутом в плоскость, участке трубы (при пневматических испытаниях);

начало разрушения может примыкать к заводскому сварному соединению или к механическому повреждению поверхности металла (задир, риска) трубы.

Возможны разрушения трубопроводов, неоднородные по характеру излома. Хрупкие участки могут чередоваться с квазихрупкими и вязкими. Последовательность расположения участков с различными типами изломов, их размеры и расстояния очага разрушения должны быть указаны в акте и на схеме разрушения.

В случаях, когда линии разрушения имеют сложные очертания или разрушение сопровождалось образованием кусков труб и их разбросом, для установления расположения очага разрушения необходимо вычертить развертку разрушенного участка трубопровода на плоскости. Для этого обмеряют отдельные куски трубопровода и определяют порядок их стыковки между собой.

После построения развертки разрушенного участка трубопровода находят направление и последовательность распространения разрушения: каждая последующая трещина примыкает своим началом к предыдущей. Угол примыкания, как правило, равен примерно 90° .

При хрупких разрушениях (с минимальными губами среза) может наблюдаться несколько очагов разрушения со сходящимся шевронным узором с образованием множества кусков и осколков труб. При нахождении первичного очага хрупкого разрушения в этом случае руководствуются следующими соображениями:

первичный очаг находится на том куске разрушенного участка, длина контура которого равна периметру трубы;

дополнительные очаги, образовавшиеся вследствие распространения упругих волн в металле при разрушении, находятся, как правило, в сварных (монтажных и заводских) соединениях, в ремонтных подварках, а также в местах концентрации напряжений, на кусках или осколках, длина контура которых равна полному периметру трубы.

Очаг разрушения тщательно обмеряют, составляют эскиз и описывают. Указывают также место расположения очага отказа по конструктивному признаку: в основном металле трубы, в заводском сварном шве; в зоне термического влияния заводского сварного шва, в кольцевом монтажном (поворотном или потолочном) сварном шве. Если очаг разрушения обнаружен в сварном соединении, то указать, где произошло разрушение: на направленном металлу шва или по линии сплавления шва с основным металлом. При обнаружении в зоне очага механических по-

вреждений поверхности металла дефектов сварки или металлургических дефектов их тщательно обмеряют и подробно описывают.

Дефекты стенки трубопроводов по их происхождению подразделяют на три группы:

А. Дефекты металлургического происхождения (трещины, расслоения, закаты, плены, рванины и др.), возникающие в процессе прокатки стального листа;

Б. Механические повреждения (царапины, задиры, забоины, вмятины), возникающие при изготовлении труб на заводе, транспортировке труб и производстве сварочно-монтажных и строительных работ;

В. Дефекты сварных соединений (трещины, поры, шлаковые включения, непровары, подрезы, смещения кромок и др.).

При рассмотрении отказов трубопровода характеризуют также остановку разрушения по одному из типов:

тип I – остановка без изменения направления трещины, он наиболее характерен для гидравлических и пневматических испытаний при невысоком давлении, когда скорость распространения трещины незначительна по сравнению со скоростью декомпрессии испытательной среды;

тип II – остановка винтовым торможением трещины;

тип III – остановка раздвоением трещины;

тип IV – остановка в результате опережающего разрыва поперечного сварного стыка на пути движущейся трещины.

Типы II, III и IV характерны для пневматических испытаний газопроводов при высоком давлении, когда разрушения распространяются с высокой скоростью. Типы II и III встречаются в трубопроводах из спиральношовных труб, однако их можно наблюдать и при разрушении трубопроводов из прямошовных труб. Тип IV возникает в трубопроводах из прямошовных труб, когда остановка происходит в результате разрушения кольцевого стыка на пути движущейся трещины. При остановке разрушения впереди вершины вязкой трещины перемещается волна, изгибающая форму сечения трубы, а непосредственно перед вершиной трещины протекает продольная пластическая деформация. Наплавленный металл сварного стыка может не выдержать высокоскоростной деформации изгиба, а затем растяжения и разрушится раньше, чем его пересечет магистральная трещина. Разрушение вдоль трубопровода прекращается. В этом случае дефекты сварки в кольцевом стыке способствуют остановке данного типа разрушения. Если распространение разрушения на длине всей трубы носило хрупкий характер, то такую трубу необходимо считать металлургическим браком, независимо от причины ее разрушения и независимо от того, находился ли в ней дефект, приведший к разрушению, или нет.

Для воссоздания полной картины разрушения к акту технического расследования отказа трубопровода прилагают схему разрушенного участка трубопровода с указанием предполагаемого очага разрушения и расположением разбросанных осколков трубопровода.