

В.М.Финкель

ПОРТРЕТ ТРЕЩИНЫ





2-е издание,
переработанное и дополненное



МОСКВА "МЕТАЛЛУРГИЯ"

1989

Рецензент докт. техн. наук *Е. М. Морозов*

Обложка художника В. Н. ЗАБАЙРОВА

Рисунки художника Р. В. ЛЕВИЦКОГО

Финкель В. М.
Ф59 Портрет трещины. 2-е изд., перераб. и доп. —
М.: Металлургия, 1989. — 192 с, ил., 1,47 л. ил.

Разрушение... Мы сталкиваемся с ним ежедневно, ежечасно. Вот слабый стебель травы пророс сквозь асфальт и победно зеленеет. Как это пришло? Вот совершенно неожиданно переломилась мощная металлическая конструкция, которой стоять бы века... Почему? В чем причина катастроф и разрушений, происходящих в мире прочнейших материалов? Как ведет себя микроскопическая трещинка, откуда у нее такая сила и такое коварство? Как человек учится управлять этой страшной силой и обращать ее себе на пользу? На эти и многие другие вопросы отвечает автор. Непринужденная форма изложения, поэтические примеры, подтверждающие мысль автора, делают книгу интересной и познавательной.

Книга предназначена для широкого круга читателей, для всех, кто хочет постичь одну из великих загадок природы. И прежде всего она адресована молодежи, стоящей перед выбором профессии.

Ф $\frac{2601000000-005}{040(01)-89}$ 95-89

ББК 34.32

ISBN 5-229-00356-1

© Издательство «Металлургия», 1989

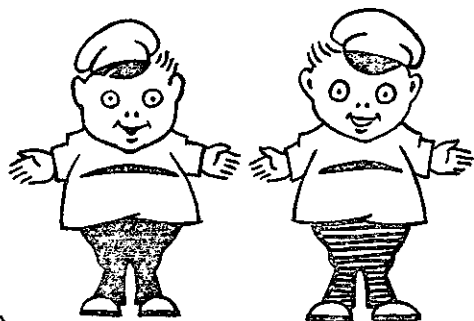
Закончен зодчим
 превосходный дом...
 А дальше что?
 Начнется разрушенье!
 Но житель дома — человек,
 и в нем
 Вперед и выше —
 вечное стремленье!

Джон Донн

ОГЛАВЛЕНИЕ

Воспеть или проклясть?	7
1. Трещина без фрака и галстука	11
Первичный диагноз	12
Мечта и явь	24
Бесценный порок	27
Окончательный диагноз	34
Отрочество трещины	50
Активное и творческое совершеннолетие	56
«Убеждения» трещины	66
Братские? Скорее волчьи качества!	72
Колоратурное сопрано	77
Такова природа вещей	87
2. Разрушение — враг	90
Возможен ли прогноз?	91
Пень у дороги	92
Холода, холода	99
Неприятные последствия	106
Металл устал...	110
Нужен орлиный глаз	116
3. Разрушение, остановись!	125
Можно ли взять трещину под уздцы?	126
Маникюр топдром	128
«Бутерброд» тормозит разрушение	132
Трещина, гори огнем!	137
Трещине полезно волноваться	141
Трещина и шахматы	146
Надежда — мой компас земной	148
Неправильности действуют правильно	IS 1
И разрушая, можно создавать	162
4. Разрушение — друг	169
Острый нож	170
Клинок надежный без порока	173
В пыль его...!	184
Финиш	191

“ДЕЙСТВУЮЩИЕ ЛИЦА” В ЭТОЙ КНИГЕ



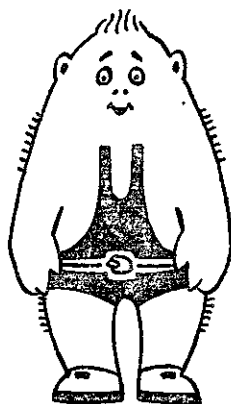
АТОМЫ



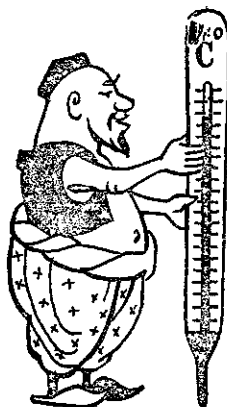
ВАКАНСИЯ



УЧЕНЫЙ

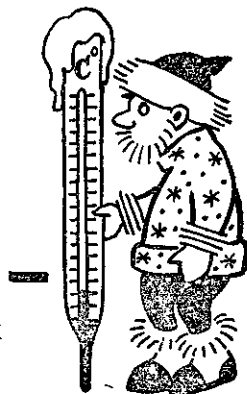


МЕТАЛЛ

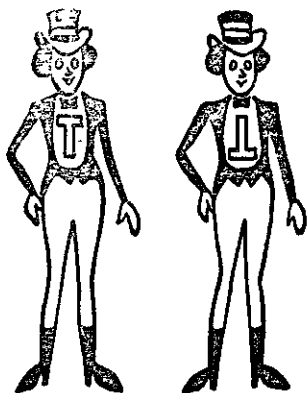


+

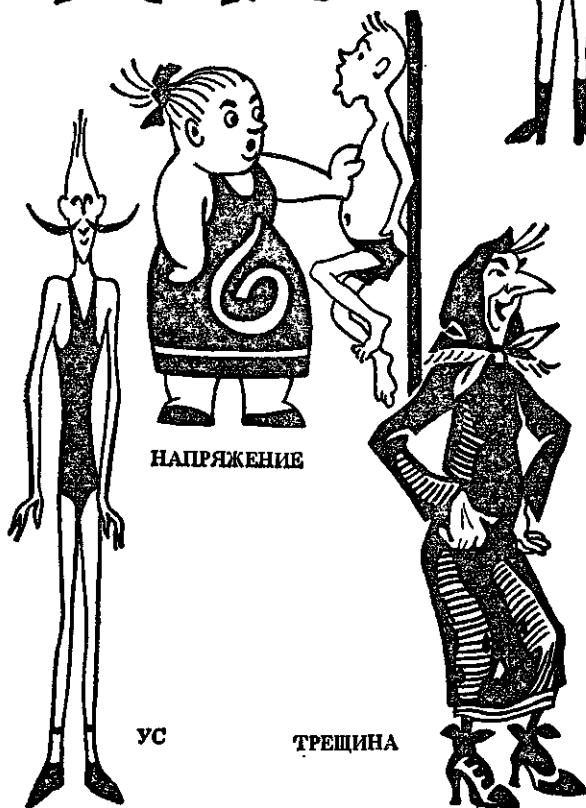
ТЕМПЕРАТУРЫ



КРАЕВЫЕ ДИСЛОКАЦИИ



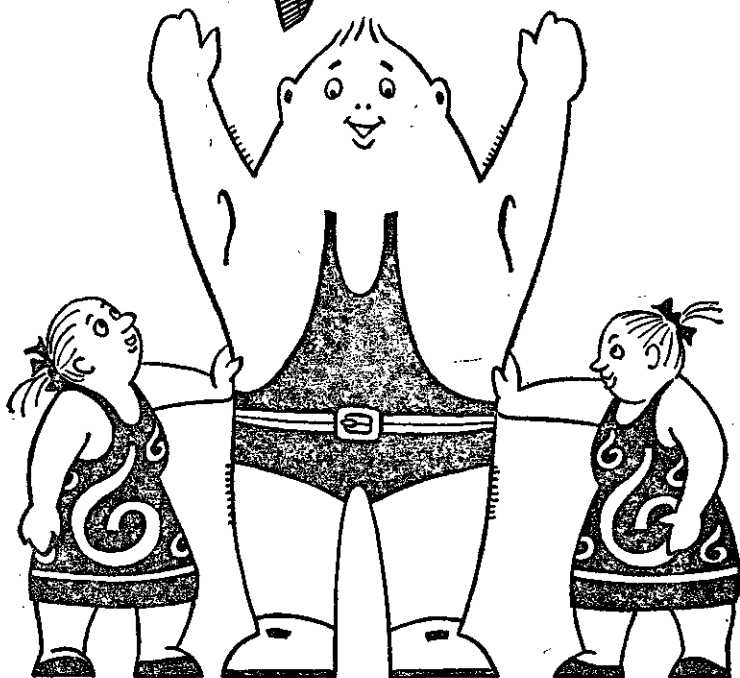
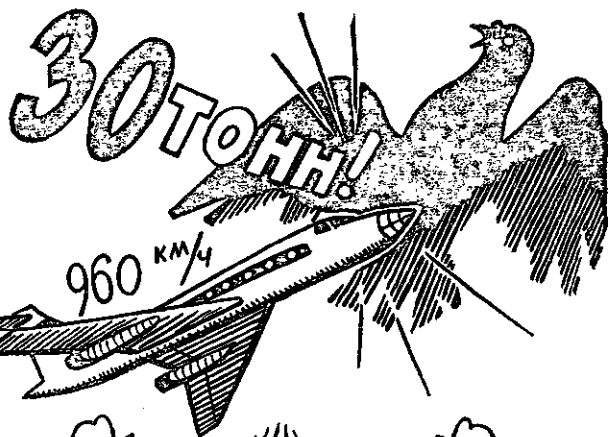
ВИНТОВАЯ ДИСЛОКАЦИЯ



НАПРЯЖЕНИЕ

УС

ТРЕЩИНА



ВОСПЕТЬ ИЛИ ПРОКЛЯСТЬ

Приближение — начало познания.

Хулио Кортасар

Вот вопрос, вставший перед автором с первой мыслью о написании этой книги. И действительно, сплошь и рядом разрушение и его оружие — трещина — это беда, а когда они сопровождаются гибелью людей, — трагедия.

Но ведь для того, чтобы изложить что-то на бумаге, надо вдохновиться? Чем же?

Разрушение само по себе глубоко неэстетично, но, чтобы с ним бороться, надо понимать его законы. Часто оно имеет и сенсационный характер. Действительно, как иначе назовешь, например, столкновение самолета с птицей? Между тем сила удара голубя при скорости самолета всего в 320 км/ч составляет 32 кН, а при скорости 960 км/ч — почти 300 кН. Разрушения при этом возникают самые серьезные.

Но сенсация вызывает различные и порой довольно противоречивые чувства и может лишить читателя способности объективно воспринимать факты и события. Нет, думаю, что на сенсации книгу о разрушении мне не построить.

В конце концов осталось наиболее целесообразное, с моей точки зрения» решение, которое мне подсказала одна из фраз диктора московского радио: «Послушайте передачу из цикла «Здоровье: сахарный диабет». И в самом деле, ведь разрушение — это негативная сторона прочности. И если нельзя воспеть тень, то ничто не мешает восторгаться ажурностью и прочностью телевизионной вышки, легкостью моста, взлетевшего над многокилометровым проливом, или удивительной стройностью стометровой космической ракеты. «Ведает» же этими вопросами один из разделов современной физики твердого тела, в котором заложены представления о большой прочности материалов, их способности противостоять действию высоких и низких температур, коррозионных сред, импульсных нагрузок и всему невообразимому множеству методов воздействия, с которыми встречается современная конструкция. Говорим ли мы о химическом или ядерном реакторе, корпусе сверхзвукового самолета или ракеты, нефтяном буре или ледоколе, каждый раз едва ли не основным оказывается вопрос — вы-

держит ли? Не произойдет ли катастрофического разрушения? Как сделать машину, прибор, аппарат не только предельно легкими и дешевыми, но и надежно прочными?

Именно физика твердого тела во всех ее разновидностях и направлениях способна обеспечить современную цивилизацию основным конструкционным материалом. Ведь еще выдающийся английский физик Дж. Дж. Томсон сказал: «В техническом прогрессе участвуют три основных элемента: знание, энергия и материал». Поэтому примерно треть всех физиков на Земле занята поиском новых и расширением возможностей старых, уже давно известных металлов и сплавов. И для этого есть очень серьезные основания. Достаточно сказать, что почти весь инструмент, которым человечество создало свою технику, сделан из металла. И еще: самое ответственное и надежное на земле построено из металла: мост ли это через Енисей или Волгу, пинцет и скальпель хирурга, камера современного ускорителя ядерных частиц. Именно металлоконструкции преградили путь мощному селевому потоку и спасли Алма-Ату, гигантские железобетонные плотины перекрыли великие реки и дали нашей стране электроэнергию. Наконец, именно танки и орудия, сделанные из особых высокопрочных сталей, содействовали нашей победе в Великой Отечественной войне.

И все же в обилии вопросов и проблем современной науки о прочности разрушение занимает особое место. Когда мы слышим об аварии самолетов гражданской авиации с сотнями жертв (отвалилось крыло) или с раздавленной многометровой толщей воды подводной лодке, или о разрушенном корпусе ядерного реактора с возможностью заражения окружающего пространства и облучения людей, особенно ясно понимаешь: необходимо что-то немедленно предпринять, чтобы подобное не повторилось. Но что?

Мы помним газетное сообщение: в стабилизаторах ракеты «Сатурн», которая должна была вывести на орбиту американский корабль в рамках совместного советско-американского полета «Союз» — «Аполлон», обнаружили трещины, и все восемь стабилизаторов необходимо было срочно заменить новыми. Это не повлекло за собой отсрочки запуска, но ведь бывает и по-другому, когда в полете ломаются лопасти винта вертолета и машина камнем идет вниз. Или когда взрывается неф-

тг провод, газопровод, по которому трещина умудряется гробежать марафон в 10—20 км со спринтерской скоростью в 1000—2000 м/с.

Колоссален материальный ущерб, невосполнима возможная гибель людей...

Говорят, что катастрофа, в которой трудится тот или иной специалист, влияет на него не всегда благотворно. Поэтому работники уголовного розыска, вынужденные знать жаргон преступников, стремятся не «заразиться» им, врачи-психиатры должны, как мне кажется, противопоставить безумию больных свой светлый разум и беспредельный, чистый оптимизм. Рассуждая так, можно представить себе: нечто подобное происходит с научным работником, занимающимся проблемами разрушения. Ему, проникшему во многие тайны этого явления, могло бы порой показаться, будто губительное разрушение всевластно, а надежной прочности вообще не существует...

К счастью, такого не случается. Более того, нередко он убеждается, что не только прочность может быть обеспечена в достаточной мере, но и само разрушение, как это ни парадоксально, оказывается полезным человеку.

Достаточно сказать, что это тот фундамент, на котором стоит вся гигантская мировая промышленность по добыче ископаемых, в частности, угля и различных руд. Не что иное, как сложное разрушение, представляет собой механическая обработка металлов на металлорежущих станках или технологические процессы при разделке гранита и мрамора.

Сплошь и рядом мы встречаемся и с разнообразнейшими проявлениями нарушения сплошности тел в природе. Так, преследуемая ящерица, чтобы спастись, жертвует хвостом. Предчувствуя сильный ветер, паук-синоптик разрывает свою паутину. Корни дерева разрушают камни. Столь хрупкие на первый взгляд грибы, встречая препятствие, уплотняют свои ткани и способны взламывать асфальт и пробуривать толстые цементообразные слои термитников в тропиках.

Известны случаи, когда набухшие от влаги бобы разрывали трюмы танкеров. Утверждают, что в глубокой древности первые анатомы применяли бобы для разделения костей черепа.

Книга, лежащая перед вами, посвящена разрушению,

его природе и его многообразным проявлениям: и когда оно — обнаженное зло, и когда оно жизненно важно и успешно служит людям. Но и в первом, и во втором случаях автор стремился быть оптимистом, всегда помнящим, что каждое разрушение требует своего отношения, подхода и действия. Возможно и хорошо, если бы природа была проще, чем она есть, но зато как чудесно, что так еще много неизвестного, даже опасного неизвестного, к чему можно приложить свои мужество, ум и руки. Не последнюю роль во всем этом играет и удивительное человеческое качество — любознательность, один из поразительнейших и бескорыстнейших рычагов человеческого мышления и созидания. Хорошо сказал об этом писатель Курт Воннегут устами ученого, получающего Нобелевскую премию: «Леди и джентльмены! Я стою тут, перед вами, потому что всю жизнь я озирался по сторонам, как восьмилетний мальчишка весенним днем по дороге в школу. Я могу остановиться перед чем угодно посмотреть, подумать, а иногда чему-то научиться. Я очень счастливый человек...»¹

Книга эта рассчитана на любознательного читателя, и автор стремился написать ее так, чтобы она была интересна и бесполезна и школьнику, и специалисту-инженеру.

Преисполненный этой надеждой, автор отдает свою книгу на суд читателей.

¹ *Воннегут К.* Колыбель для кошки.—М.: Молодая гвардия, 1970, с. 12.

Прочность уже сама по себе является благом.
О. Бальзак

1

ТРЕЩИНА БЕЗ ФРАКА
И ГАЛІСТУКА



ПЕРВИЧНЫЙ ДИАГНОЗ

Кусок квадратной формы где легко,
Где туго рвался, противопоставив
Упрямое сопротивление силе.

Д. Беррилин

Памятник Петру в Ленинграде — всемерно известный «Медный всадник» — свидетель удивительного потока событий. Кажется, что он вздымается не только над волнами Невы, но и над временами, возвышаясь над ними, независимый от них.

Между тем, монумент и разрушение связаны друг с другом. Еще сам Дидро, рекомендовавший своему другу Фальконе взяться за сооружение памятника Петру I, советовал: «...Петр взлетает на скалу, а из трещин этой скалы изливается прозрачная вода...»¹ Позднее, когда в 12 верстах от Петербурга нашли огромный Гром-камень — будущее основание памятника — выяснилось, что когда-то в него ударила молния и «произвела на оном расселину». Эта расселина постепенно заполнилась землей и в ней выросли березы высотой в 25 футов. Не обошлось и без комедийных ситуаций, когда, стремясь пристроить своего бывшего сельского дьячка — учителя Тимофея Краснопевцева, фаворит Екатерины светлейший князь Григорий Алексеевич Потемкин сказал:

— Добро, старик! Будешь ты наблюдать каждое утро, крепко ли стоит памятник Петру. Назначая тебя его смотрителем. И если заметишь какую неисправность, то немедленно доноси мне через дежурного флигель-адъютанта...

После смерти Тимофея Краснопевцева «смотрителей памятника» больше не назначали. В каком же состоянии находится он теперь? Недавно было сообщено, что в задних ногах коня развивались трещины. Что случилось с сооружением Фальконе? На этот вопрос можно было бы дать несколько ответов. Простейший из них основан на законах извечной науки о прочности — механике и звучит примерно так: это результат больших перегрузок на задние ноги и хвост коня. Это кажется тем более реальным, что скульптура обладает значительной па-

¹ *Воронов Н*, Люди, события, памятники. — М.: Просвещение, 1984, с. 45.

русьюстью и расположена с юга на север, а роза ветров в Ленинграде ориентирована с запада на восток. Поэтому под действием ветра конь как бы «переваливается» с ноги на ногу. Второй ответ глубже: металл памятника «устаёт». Ведь с момента его сооружения прошло более двухсот лет, и если ориентировочно считать, что ветер изменялся ежедневно, то переминений с ноги на ногу было более 70 000! Есть и третий ответ — металл подвергается коррозии. Тем более, что вначале через трещины в корпусе накапливались тонны дождевой воды. Здесь следует остановиться и пояснить, что хотя прямых наследников у Тимофея Краснопевцева и нет, МЕДНЫЙ ВСАДНИК, относящийся к когорте мировых скульптурных ценностей человечества, не безнадзорен. В последнем столетии он, по меньшей мере, трижды подвергался капитальному ремонту. В 1909 году — со вскрытием люка в крупе коня. При этом, в частности, были проделаны отверстия в пятках всадника и в брюхе коня во избежание накопления воды внутри монумента. Позднее эти отверстия были расчищены и расширены. Следующий ремонт, на этот раз без вскрытия люка, провели в 1935 году. В его описании отмечена значительная по размерам трещина длиной примерно в 30 сантиметров на правой задней ноге между копытом и пяткой коня. Ее тогда же запаяли. Поскольку, однако, в последние годы трещины из ног коня продолжали развиваться, в 1976 году было проведено обстоятельное исследование монумента, о котором подробно рассказал в журнале «Литейное производство» К. П. Лебедев¹. Выяснилось, что прочность и устойчивость МЕДНОГО ВСАДНИКА была достигнута Фальковые, помимо всего прочего, за счет специального железного каркаса в крупе, задних ногах и хвосте коня. Большая часть каркаса, а его масса составляла около 4 тонн, была удалена впоследствии через люк. Однако часть его в виде кованых стальных стоек и брусьев является и поныне единственной опорой, удерживающей весь монумент. Роль литой бронзы в отношении прочности сводится к тому, чтобы связать отдельные части каркаса и обезопасить его от коррозии. Что касается трещин, то их происхождение оказалось следующим. При заливке бронзы непосредственно на

¹ Лебедев К. П. Новые данные о литее памятника «Медный всадник»//Литейное производство. 1978. № 12. С. 37, 38.

стальной каркас появились горячие трещины и можно предполагать, что первым их видел сам Фальконе. Кроме того, образовались так называемые неслитины — чисто литейный дефект, принимаемый иной раз за холодные, то есть обусловленные механическим нагружением трещины. Печальная роль этих двух дефектов—горячих трещин и неслитин — заключалась в обеспечивании доступа воздуха и влаги к стальному каркасу. Его ржавление сопровождалось увеличением объема и растрескиванием бронзовой оболочки, что в свою очередь интенсифицировало процесс. При ремонте в 1976 году дефектные куски бронзы были сняты, отлиты по моделям вставки и после установки кромки их тщательно зачеканили. Итак, если памятник Петру и «хворает», то причина тому — коррозионная. Справедливости ради отметим, что на процесс ржавления могут влиять и влияют механические напряжения и усталость, так и говорят: «Коррозия под напряжением». Так что же, неужели ничему не дано победить время и творение Фальконе рано или поздно обречено? Возможно это бы и произошло, случись нарисованное Александром Сергеевичем Пушкиным в действительности

За ним несется всадник медный
На звонко скачущем коне

— динамических нагрузок памятник бы не выдержал. Сегодня же, несмотря на всю экспрессию, неподвижно взмывший на каменной волне Петр вне времен и опасений. Забота и внимание пусть не бессмертных, но талантливых и преданных искусству и истории страны людей позволят монументу неколебимо стоять века!

В этом рассказе нас интересует первый подход к причинам разрушения. Ведь разрушение—явление столь же древнее, как человеческая цивилизация. Вначале оно «нападало» на примитивное человеческое жилище и каменный топор, позднее — на деревянные дома, конструкции мостов и каравелл.

Вот как Торнтон Уайлдер описывает разрушение древнего моста: «В полдень в пятницу 20 июля 1714 года рухнул самый красивый мост в Перу и сбросил в пропасть пятерых путников. Мост стоял на горной дороге между Лимой и Куско, и каждый день по нему проходили сотни людей. Инки сплели его из ивняка больше века назад, и его показывали всем приезжим. Это была просто лестница с тонкими перекладами и перилами

из сухой лозы, перекинута через ущелье... но люди — даже вице-король, даже архиепископ Лимы — предпочитали идти по знаменитому мосту короля Людовика Святого. Сам Людовик Святой французский охранял его — своим именем и глиняной церковкой на дальней стороне. Мост казался одной из тех вещей, которые существуют вечно: нельзя было представить себе, что он обрушится...»¹

Нет ничего удивительного в том, что инки не знали ни о прочности, ни о законах механики. Но мы знаем, что задолго до случившегося, в конце XV—начале XVI веков, великий Леонардо да Винчи уже пользовался расчетами деревянных конструкций, говорил о мельчайших частицах древесины, расшатывающихся под действием переменной нагрузки, о проникновении в материал «пространства», еще более раздвигающего их и приводящего к появлению «полости», т. е. в современном понимании трещины. Мало того, да Винчи хорошо знал опасные точки конструкции, к которым он относил, например, шпоночные, пазовые и другие соединения. Особенно угрожающими представлялись ему различные «тупики», в таких соединениях, то есть места, в которых плоскости соприкосновения смежных поверхностей меняют свое направление. Так Леонардо да Винчи пришел к одному из самых важных понятий современной механики прочности — понятию концентрации и концентратора напряжений. Не надеясь на Людовика Святого французского, великий мыслитель и ученый заложил тем самым основы современной механики разрушения. Это тем более удивительно, что речь-то идет о средних веках, времени, когда ограниченность знаний и беспомощность человека перед силами природы толкали его на фаталистическое представление о мире.

Что же такое концентрация напряжений? Представьте себе, читатель, простую задачу: надо разрезать лист резины. Способов для этого много. Можно, например, резать его ножницами. Но если резина достаточно толста, вряд ли мы справимся с задачей. Попробуем ножом. Но при этом можно повредить поверхность стола. Сделаем проще — изогнем слой резины и легко проведем по нему лезвием бритвы. При этом сразу же появляется

¹ Уайлдер Т. Мост короля Людовика Святого. — М.: Прогресс, 1976. С. 25—26.

быстро вскрывающийся разрез. Еще одно движение лезвием и место изгиба как бы вскрывается на все свое сечение. Что же произошло? Когда слой резины согнули, мы сдеформировали его и «загнали» поле напряжений. Это поле стремится распрямить резину и исчезнуть. Тут-то и приходит ему на помощь лезвие: оно создает вначале маленький надрез — концентратор напряжений, небольшой участок материала, как бы сосредоточивающий всю энергию упруго-деформированного объема на очень маленьком «пяточке». Если вдуматься, то это несколько не отличается от военной практики прорыва фронта противника на узенькой полосе, где можно собрать превосходящие силы, стянув свои войска с других участков. А как только фронт прорван... в него со всех концов устремляется основная лавина войск. Концентратор напряжений — это очаг разрушения. Интересно, что чем он «лучше», то есть острее, тем скорее наступит разрушение, иначе говоря тем «хуже» для конструкции. Это и понятно, во всяком случае, на словах, коль скоро мы решили не пользоваться формулами и математическими расчетами.

Для дальнейшего, однако, нам следует иметь в виду, что с увеличением остроты надреза, напряжения в его вершине растут очень быстро — обратно пропорционально корню квадратному из радиуса надреза. Это означает, что если он размером в одну десятую сантиметра, то напряжения в нем возрастут, примерно, в три раза. А если он совсем мал и составляет одну десятитысячную сантиметра, то существующие в металле напряжения увеличатся в сто раз.

Казалось бы, тут немедленно и последует разрушение. Но, к счастью,

...если вдруг, вкусивший всех наук,
читатель мой заметит справедливо:
— Все это ложь, изложенная длинно. —
ответчу я: — Конечно, ложь, мой друг.

(Б. Лхмадулина)

Природа позаботилась, и для очень широкого круга практически важных материалов «ввела» своего рода предохранительный механизм — пластическую деформацию. Она, а не разрушение возникает прежде всего в очень остром надрезах в стали. Вспомните, что происходит, когда вы хотите сломать медную проволоку. Много раз перегибая ее, вы замечаете, что наконец, по-

явилась трещина и произошло разрушение. Этот процесс можно ускорить, предварительно надрубив проволоку. Но все равно какой-то изгиб с пластической деформацией в меди, алюминии и низкоуглеродистой стали необходим, Масштаб этого явления в зависимости от материала (скажем, в мраморе и сливочном масле, принесенном с мороза) весьма различен, но явление почти всегда существует. Тем не менее здесь все не просто и возможны разные точки зрения. Согласно одной из них, пластическая деформация совсем не необходима для разрушения — ее может и не быть, а конструкция все-таки разрушится. И надо сказать, что хотя у этой точки зрения не слишком много приверженцев, она, опираясь на законы разрушения подлинно хрупких материалов (типа стекла), тоже довольно убедительна.

Но к этой проблеме мы еще вернемся.

А пока, чтобы разобраться в существующих точках зрения на это явление, надо еще немного порассуждать, надо вооружиться тонким надежным скальпелем, прежде чем мы поймем, как же превратить вершину надреза в трещину, обойдя или использовав при этом пластическую деформацию.

Обратимся к тому, что представляет сущность чисто механического подхода к разрушению.

Стоит ли слишком категорично разделять концентратор напряжений и трещину? В конечном итоге они ведь различаются только тем, что в концентраторе вершина сравнительно тупая, а в трещине она невероятно остра и исчисляется стомиллионными долями сантиметра, то есть порядка межатомного расстояния. Меняется, таким образом, лишь масштаб концентрации напряжений, но не сама, по мнению механики, сущность процесса. Поэтому отнюдь не обязательно детально, на уровне поведения отдельных атомов, анализировать зарождение исходной микротрещины на дне надреза.

Ну, а как быть при таком подходе с ролью пластической деформации? Ответ прост: не надо драматизировать! Да, пластическая деформация существует; да, она предшествует разрушению. Ее роль? Пожиратель энергии, нагнетаемой внешней нагрузкой в тело. Если разрушения нет, вся энергия идет на деформирование. Если разрушение уже действует, то лишь часть внешней энергии идет на его развитие, а вторая — на деформирование. В последнем случае разрушение происходит под

аккомпанемент пластического течения, так сказать под сурдинку.

В таком подходе много недостатков. В нем нет ответа на извечные вопросы: почему и как образовалась трещина из концентратора, как связана пластическая деформация с разрушением физически, какова структура материала в зоне зарождения трещины и многие другие. Но вместе с тем подход этот отличается и уникальными достоинствами. Он позволяет рассчитать реальные виды разрушения именно потому, что пренебрегает тонкими структурными деталями, численная оценка которых всегда трудна. Ясно, что рассчитать любое механическое устройство гораздо проще, чем сложнейшие процессы атомного масштаба.

Едва ли не самым ярким примером такого подхода к оценке прочности материала явилась теория, предложенная английским инженером, а впоследствии авиаконструктором А. Гриффитсом. Он обратил внимание на то, что реальная прочность конструкций всегда ниже той, которую можно было бы от нее ожидать. Это явление он объяснил так: каким бы монолитным не казался металл извне, он содержит в себе трещины. Откуда они? Какова их природа? На эти вопросы Гриффите ответов не нашел, да, вероятно, и не искал их. Они пришли позднее, через 30—40 лет и найдены были другими исследователями. Но в главном, и это потом было подтверждено физиками многократно, Гриффите был прав: металл действительно содержит трещины самых разных размеров и нередко очень опасных. Эти трещины, как болезни, развиваясь, сокращали жизнь деталей, обрекая их на преждевременную кончину.

В чем же состоит механизм их влияния на прочность?

В конечном итоге все сводится к той же концентрации напряжений. Допустим, в куске металла есть большая трещина. Она, естественно, уменьшает сечение, сопротивляющееся приложенной нагрузке, и на оставшееся тело материала действуют большие напряжения. Дело, однако, столь простым случаем не ограничивается. Даже, если бы пластина металла была бесконечно велика, все равно в вершине трещины напряжения как бы аккумулируются и способны в несколько раз, а иногда, как мы уже говорили, на много порядков превышать их средние значения. Это происходит в объеме металла



примерно того же размера, что и размер трещины. Интересную форму имеет область, в которой эти напряжения накапливаются — что-то вроде ушей по обе стороны вершины трещины. В этих «ушах» скапливается большая упругая энергия, стремящаяся разорвать металл. И если трещина находится в напряженном металле, она всегда с «ушами». Она может ими даже «хлопать» — при изменении режима ее роста или когда трещина располагается на границе между двумя различными слоями в композитном материале. Это означает изменение распределения напряжений в окрестностях вершины трещины. Об ушной проблеме читателю уже известно больше того, что знал в свое время Гриффите. Экспериментально и теоретически такое распределение напряжений было подтверждено лишь через 15—20 лет после работ Гриффитса. И тем не менее Гриффите нашел в принципе правильный ответ, хотя и исходил из того, что сконцентрированное упругое поле как бы окружает всю трещину. Когда-то знаменитый физик Р. Вуд писал,

что в молодости, начиная читать лекцию по физике, он был впереди студентов на два часа, а к концу лекции их знания сравнивались. Но эти исторические «два часа», отделившие Гриффитса от современников, и позволили ему обессмертить свою идею.

Сама задача была решена Гриффитсом следующим образом. Трещина сконцентрировала упругую энергию. Допустим, трещина подросла. Тогда часть упругой энергии разрядится, и этот процесс природе выгоден, как выгодно любое понижение энергии. На что же идет эта энергия? Естественно, на разрушение, решил Гриффите, А точнее на образование двух поверхностей трещины, и связанную с ними поверхностную энергию. Дело в том, что не только металл, но даже мыльный пузырь в граничном слое имеет свою поверхностную энергию, только у металла она в расчете на единицу поверхности в 10—15 раз больше, чем у мыльной пленки. Хорошо известно, что поверхности жидкостей и жидких пленок всегда стремятся сократиться. В твердых металлах этого в отличие от жидкости не происходит — слишком велика их прочность, но стремление такое всегда есть и в некоторых условиях, например, когда металл находится в расплавленном состоянии, пленка металла очень похожа на жидкую. Поэтому, чтобы создать свободную поверхность, надо затратить работу. Так вот, при образовании трещины возникают две свободные поверхности и каждая из них — носитель запаса поверхностной энергии. Гриффите решил, что вся разрядившаяся упругая энергия идет на создание поверхностной энергии двух половинок разрушенного металла. Допустим, продолжал Гриффите, что образование трещины требует большей энергии» чем освобождающийся запас упругой энергии. Очевидно, что разрушения в этом случае не произойдет. А если наоборот — выделяющейся упругой энергии с лихвой достаточно для покрытия энергетического дефицита, связанного с образованием двух поверхностей трещины? Тогда начинается стремительное развитие трещины и конструкция моста, резервуара, самолета или корпуса ракеты «умирает».

Все дальнейшее развитие механики и физики показало, что Гриффите нарисовал в основном правильную картину развития событий, но в деталях он был не точен или не прав. Например, ему казалось, что развитие трещины должно происходить со скоростью звука. Опыт

этого не подтвердил — трещина по крайней мере вдвое медлительнее.

Важнее оказалось другое. У Гриффитса трещина была совершенно хрупкой. Это означает, что при разрушении пластическая деформация отсутствовала. Между тем инженерный опыт показывает, что почти всегда деформация сопровождает разрушение. При этом она съедает энергии в тысячу, а иногда и в десять тысяч раз больше той, которая требуется для компенсации поверхностного натяжения. Ясно, что в этих условиях поверхностное натяжение становится несущественным. Последователи Гриффитса, в первую очередь американский ученый Г. Р. Ирвин, решили, что и столь большая пластическая деформация не помеха для расчета тела с трещиной. Надо только считать, что она располагается лишь вблизи самого носика длинной трещины. Такие трещины получили название квазиупругих, или квазихрупких, то есть якобы хрупких. «Достоинство» их заключается в том, что, с одной стороны, к ним можно применить весь математический аппарат теории трещин — ведь зона пластичности крохотная в сравнении с длиной трещины; с другой — крохотная-то крохотная, а энергию упругого поля деформации понижает.

Используют это так. Прежде всего анализируют характер напряженного состояния в конструкции — к какой трещине оно приведет. Есть три вида трещины: нормального разрыва, поперечного сдвига и продольного сдвига. Первая из них возникает, когда разрывают лист бумаги. Чтобы объяснить второй, представьте себе, что два листа металла склепаны. Вы хотите это соединение разделить и молотом ударяете по верхнему слою, срезая заклепку. Дефект в заклепке и есть трещина сдвига. Трещина продольного сдвига образуется, когда, например, бумагу не разрывают, а режут ножницами. Для каждой давно рассчитаны поля напряжений вокруг их вершин (помните: «уши» трещины?). По мере приближения к вершине напряжения быстро растут и достигают предела, после которого материал начинает «течь», то есть пластически деформироваться. Эти условия так и называются пределом текучести. Протяженность области, где это происходит, легко рассчитать; с этого момента реальная длина трещины — это ее подлинная длина плюс размер пластически деформированной зоны. Вот теперь, когда известна и длина трещины, и напря-

жения в ее вершине, и потери энергии на деформирование, можно определить силу, необходимую для продвижения трещины. И конечно, ее легко сравнить с силой из опыта. Но еще важнее введение удивительной характеристики материала — вязкости разрушения. Эта величина, пропорциональная разрушающим напряжениям в вершине трещины, служит своеобразным рубежом прочности скомпрометированного трещиной металла. Ее легко вычислить для трещин различного вида практически в любых металлоконструкциях. Сопоставляя ее с напряжениями, действующими на деталь в том или ином процессе нагружения, заранее можно предсказать: выдержит ли нагрузку конструкция, содержащая трещину, или не выдержит. Все это можно сделать, испытывая не целую ступень космической ракеты, а лишь образец ее материала.

Сегодня — это один из основных методов исследования прочности потому, что любой реальный элемент металлоконструкции содержит множественные дефекты: и трещины, и надрезы, и отверстия, а испытать его целиком (скажем, ферму протяженностью в 50—100 м) физически невозможно. Да, к счастью, теперь и не нужно. Сотни лабораторий во всех странах мира, во всех отраслях машиностроения используют этот метод, хотя еще 20 лет назад казалось, что он не нужен.

Механики оказались правы и подарили цивилизации отличный инструмент для прогнозирования и оценки реальной прочности, который мы условно назовем «первичным диагнозом». Что имеется в виду? Произошла авария. Она может быть грандиозной — развалился корпус танкера в сто тысяч тонн водоизмещением и нефть залила обширный район моря. А может быть и скромной по своим масштабам, например во время больших холодов «разморозились» батареи и некоторые из них взорвались с разлетом осколков (бывает и такое). Специалист-механик, подобно врачу-терапевту, при первичном осмотре «больного», еще не располагая данными анализов, скажет примерно следующее. В первом случае при сварке корпуса танкера была проявлена небрежность, в результате которой швы получились с несплошностями. Эти непроваренные места явились концентраторами напряжений. Кроме того, жесткость корпуса танкера оказалась недостаточной и при сравнительно небольшом волнении на море он постоянно прогибался.



Со временем число этих циклов изгиба достигло критического значения — из концентраторов напряжений в сварных швах пошли трещины.

Может быть и иной вариант. При сварке в корпусе оказались законсервированными мощные остаточные напряжения и они «разрядились» на непроваре и т. д. Итак, первичный диагноз носит макроскопический характер и оперирует такими понятиями, как напряжения в конструкции, энергия, запасенная в ней, концентрация напряжений и т. д.

Из древнегреческой легенды мы знаем: когда-то персидский царь Ксеркс, взбешенный тем, что буря разрушила мост через Геллеспонт, приказал высечь море плетью и заковать его в цепи. Будучи исследователем квалифицированным, современный инженер-механик не потребует наказания для моря, а начнет искать первопричину разрушения. С чего оно началось? Что произошло с атомами? Такие вопросы прежде всего поставит он перед собой. А ответить на них механику помогут другие исследователи — физики.

МЕЧТА И ЯВЬ

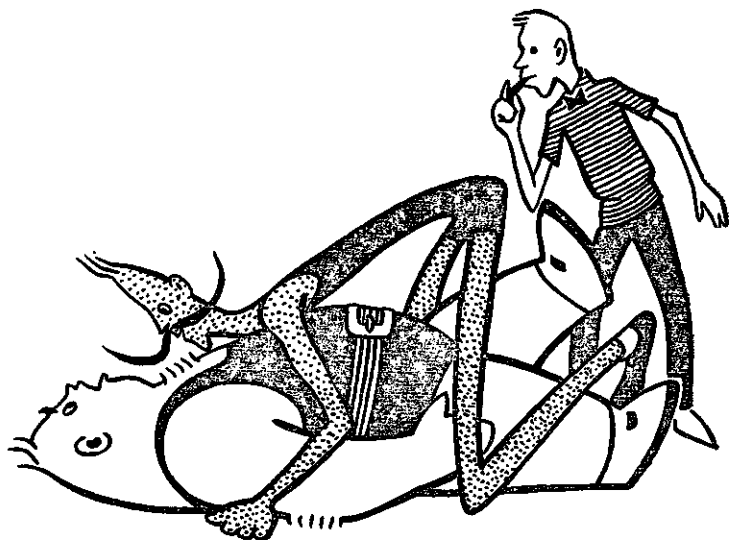
Ни с места! Проклятую нить
Не разогнешь ни так, ни этак.

Ж. Лафонтен

Мысль человека всегда опережала его возможности. В технике арбитром между фантазией и реальностью, едва ли не всегда, были прочность и материалы. Ими определялся круг всего того, что человек мог сделать сегодня. И это желание прочно стоять на ногах проникло во всех поры человеческого сознания.

«Ножницы» между желаемым и осуществимым, расхождение между тем, что человечество хотело и могло, стали очевидными после удивительной работы выдающегося советского физика Я. И. Френкеля, вышедшей в 1926 году. Смысл ее таков. Представим себе процесс пластической деформации как соскальзывание одного слоя атомов по другому, подобно тому» как сдвигается стопка листов чистой бумаги или колода карт. Из-за того что процесс этот идет одновременно по всей плоскости листа, мы вынуждены рвать межатомные связи сразу между всеми атомами¹ по обе стороны плоскости скольжения. Между слоями бумаги силы притяжения ничтожны. Но между слоями атомов они велики. Поэтому попытка сдвинуть два атомных слоя — один по отношению к другому — хотя и возможна, но потребует очень большого усилия. Я. И. Френкель нашел это усилие и пересчитал его на привычные нам напряжения. И тогда оказалось, что прочность в этом случае достигает удивительно больших значений, в 1000 раз превышающих привычные нам, будничные. Эту прочность называли теоретической прочностью твердого тела и определили ее как потолок, к которому можно и нужно стремиться.

Кто-то сказал, что новая идея — это клин, который входит только толстым концом. Но в случае теоретической прочности все было не так. Мысль Я. И. Френкеля была настолько ясной, а математический аппарат в такой мере простым, чтобы не сказать элементарным, что всему сразу поверили. Научная общественность мира приняла идею «к исполнению» и не ошиблась. Оказалось, в частности, что очень тонкие кристаллы, так называемые усы, толщиной в микроны, обладают прочно-



стями, очень близкими к теоретической. Так, прочность плавяных кремнеземных волокон оказалась равной 4,2 ГПа, усов железа 13 ГПа, а графитовых нитей еще большей 24 ГПа. Сравните эти цифры с прочностью хорошей стали, всего 1—2 ГПа! Кстати, прочность паутины превосходит прочность стальной нити такой же толщины, и при этом паутина еще может растягиваться на 20 %! Неудивительны слова поэта:

И даже тоненькую нить
не в состоянья разрубить
стальной клинок...

Удивительно другое, почему столетия человечество всего этого не замечало? А ведь оно прекрасно знало о поразительной прочности различных волокон.

Но как практически это было использовано? Никак, если не считать того, что в XVIII веке в Тирольских Альпах паутина оказалась незаменимой... для создания живописных полотен¹. Ее натягивали на картон, а затем наносили акварельный рисунок. Прочность материала была такой, что он выдерживал печатание с металлических пластин. Известен и экспонат одного из немецких

¹ Бабенко В. Мастер на все ноги. Ткачество//Вокруг света. 1976. № 4. С. 50.

музеев — перчатка из паутины. По словам Ж- Бержье, один безумный немецкий физик в попытке химическим путем воспроизвести нить паука с тем, чтобы соткать из нее пуленепробиваемые жилеты для солдат, уничтожил эту перчатку. Французский естествоиспытатель Г. Купэн сообщает о необыкновенной прочности нити одной из пород мадагаскарского паука: ткань, сотканная из нее, превзошла все ожидания². Вот и все. Зато сейчас человечество «вошло во вкус» и быстро наверстывает упущенное.

Металлическое волокно «паучий ус» — незаменимый материал для визирных перекрестий оптических инструментов. Из «усов» делают деликатнейшие микроскопические пружины. Из тончайших проволок вяют невероятной прочности канаты. Нити, наконец, основа производства композитных материалов, которые во всем мире широко применяют в военной и гражданской авиации, космонавтике, текстильной промышленности, в больничном и коммерческом оборудовании, в автомобилях, шляпках, музыкальных инструментах и многом, многом другом — всего и не перечислить... Вот как оценивает американский журнал новый композитный материал на основе графитовых усов тоньше человеческого волоса: в авиации замена алюминиевых деталей композитными облегчит на 15 % конструкцию и позволит военному реактивному самолету... увеличить на 10 % дальность полета или усилить на 30 % свое вооружение при одной и той же заправке горючим. Для гражданских самолетов это означает увеличение дальности полета и полезной нагрузки и, вероятно, более дешевые билеты.

А вот, например* как делают корпуса ракет больших диаметров. Берут деревянную обичайку в форме ракеты и наматывают на нее слой из тонкой нити-уса. Затем наносят вяжущий слой эпоксидной смолы, потом опять слой нити, смолы и т. д. Получается многослойная стенка, и прочная, и легкая. Так будут изготавливать метровые цилиндрические колонны для химической промышленности, цилиндры мощных прессов, баллоны для хранения сжатых газов. Недалеко время, когда сверхпрочные материалы на основе тончайших волокон, без преувеличения, покорят современное машиностроение

² Купэн Г, Искусство и ремесла у животных. Спб., изд. Девриен, 1910. С. 128,,

и приведут к появлению в полном смысле легковых автомобилей — в 100 килограмм весом, гигантских и вместе с тем и весе «пера» мостов и «пушинок»-самолетов. И все это абсолютно надежное, прочное. Невольно вспоминаются слова Леонида Мартынова:

Ведь не способна ни рваться, ни гнить
Даже в ушке этом тесном игольном
Великолепная светлая нить...

Но почему, говоря о теоретической прочности, мы все время твердим об усах? А как же быть с монолитными металлами, ведь именно они основа машиностроения? Вопрос верен. Все дело в том, что, к сожалению, теоретической прочности на монолитных металлах достичь не удалось, хотя это и не означает, что ученые стояли на месте. Теперь получают стали с прочностью до 3 и даже до 6 ГПа, но до теоретической прочности еще далеко.

Почему для тонких кристаллов мы ее получили, а для монолитных металлов, болванок, слитков, проката теоретических цифр прочности еще нет?

БЕСЦЕННЫЙ ПОРОК

Крокодильими складками бронза морщит...

Л. Симпсон

Итак, почему?

Этот вопрос был одним из самых важных в ряду тех, которые вызваны работой Я. И. Френкеля. Но не единственным. Непонятно было и то, почему прочность реальных кристаллов в сотни и тысячи раз меньше теоретической. Почему чистые металлы мягче сплавов? Почему поликристаллические — тверже монокристаллических? Двадцатые годы на эти вопросы не принесли серьезных ответов.

1934 год был переломным. Английский физик Г. Тейлор из Кэмбриджского университета и венгерский ученый Е. Орован выдвинули гипотезу: в кристаллах существует особый дефект — дислокация, решительным образом меняющая свойства кристаллического материала. Исходили при этом из того, что если бы кристалл был идеальным, то для его деформирования нужно было бы приложить напряжения, равные теоретической прочности. А коль скоро реальные напряжения деформирования незначительны, должен существовать какой-то кон-

центратор, сосредоточивающий приложенное усилие в небольшой части кристалла. Его «построили» так. Рассмотрели кристалл как толстую книгу, где атомные слои моделировались листами бумаги. А потом вложили еще один лист размером в полстраницы. По выражению поэта О. Мандельштама, эдакий «журавлиный клин в чужие рубежи». Понятно, что атомный ряд этой полустраницы (его называют экстраплоскостью) обрывается в пространстве. Представим себе далее плоскость скольжения, перпендикулярную листам и проходящую по краю экстраплоскости. По обе стороны от плоскости скольжения атомы наладили между собой взаимодействие, «вцепились» друг в друга. А атом на краю экстраплоского ги одинокий: ведь у него нет визави — атома напротив. А между тем «желание» вступить в контакт есть. Вот этот-то атом со своей экстраплоскостью и способен творить чудеса.

Приложили мы к кристаллу сдвигающее усилие. Атомы впереди и позади дислокации, за исключением двух-трех по обе ее стороны, крепко держатся один за другой. Иное дело наш «одинокий волк». Ведь в исходном состоянии он находился точно посередине между двумя атомами нижнего ряда и немного выше их. Но вот внешнее усилие слегка сместило его влево. Воспользовавшись этим, он «сцепился» с левым атомом нижнего ряда, оторвав его у прежнего соседа сверху. При этом он перестал быть краем экстраплоскости и вступил в сообщество обычных атомов, — хорошо быть незаметным, как все! Да и экстраплоскость перестала быть экстраплоскостью; ею стала другая, начинающаяся со вновь появившегося «обездоленного» атома, покинутого своим собратом. Расположилась она левее на одно межатомное расстояние. Но вот наладили опять атомы прочный контакт между собой, подтянули свои ряды и оказалось, что дислокация сместилась на одно межатомное расстояние влево. Еще один фокус-смещение, разрыв, новый союз, — и дислокация передвинулась еще левее. И пошло, и пошло... Побегала дислокация влево по кристаллу, каждый раз меняя атомы в своей экстраплоскости, чтобы каждый раз сохранять ее и свою форму.

Прав будет читатель, который задаст прямой вопрос: а откуда она взялась эта дислокация? Ведь не вставляем же мы каждый раз слой новых атомов, как лист в книгу?

Конечно нет! Это наиболее сложный и не полностью выясненный вопрос во всей многотомной теории дислокаций. Существует ряд процессов, при которых дислокации зарождаются в кристаллах, например при кристаллизации из расплава. Возникают дислокации и при сдавливании некоторых микроскопических пор в материале. Роль «родителей», выращивающих дислокации, могут играть другие дислокации. Но повторяю — сложный это вопрос.

Рассмотрим лучше чисто умозрительно эпизод, не имеющий места в жизни, но тем не менее очень удобный как пример для объяснения. Приложили мы сдвигающее усилие к боковой поверхности кристалла и сжали его верхнюю часть так, чтобы сверху над плоскостью скольжения гри атома оказались над двумя нижними. Для этого нам потребовалось сдеформировать кристалл на одно межатомное расстояние. Зато мы получили почти настоящую дислокацию. Если и теперь оказывать давление, то дислокация побегит. Как это происходит, мы уже обсуждали. Грубо говоря, одинокий атом на краю экстраплоскости получает возможность «пожать руку» своему визави и, подтягиваясь, передать функции экстраплоскости другому ряду атомов. Если бы мы нанесли сетку параллелей и меридианов, идущих точно по атомным рядам, то с появлением дислокации карта эта потеряла бы свою геометрическую строгость и правильность.

Почти совсем, как у Сергея Наровчатова:

А сейчас сместились меридианы
И сжались гармошкой параллели

Справа от дислокации верхняя и нижняя части кристалла смещены на одно межатомное расстояние. А слева от нее сдвига нет. По мере движения дислокации влево за ней тянется сдеформированная область. И когда дислокация пробежит по всему кристаллу и «выскочит» на его поверхность, окажется, что вся верхняя половина кристалла сдвинулась относительно нижней на одно межатомное расстояние. А дислокация при этом исчезла.

Итак, что же такое дислокация? Это линейный дефект кристаллической решетки. Почему линейный? Очень просто — это край экстраплоскости. На чертеже он выглядит точкой, одним атомом. А в действительности этих самых «одиноких волков» много — они сидят на краю экстраплоскости по всей ее протяженности, пер-

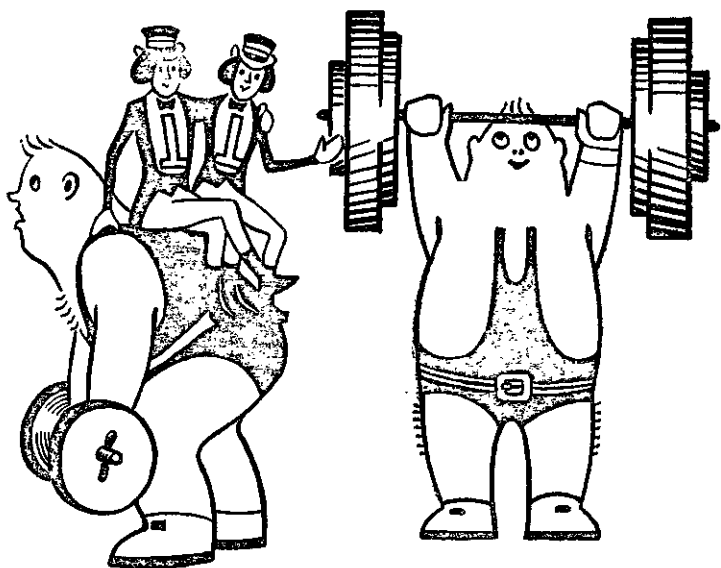
пендикулярной чертежу, и каждый из них жаждет «уйти в темь», перейти в статус рядового атома. Но за это он должен «поплатиться» сменой соседа ниже плоскости скольжения, то есть перемещением дислокации на одно межатомное расстояние.

Следовательно, дислокация — это линия, нить. Ее движение означает: дислокация осуществляет пластическую деформацию кристалла. Перед нею деформации нет, за ней — есть. Какова же ее толщина? В нашей схеме — один атом; в действительности «потолще», 5—6 атомов. А какова ее длина? Она примерно равна размеру кристалла, то есть может составить несколько миллиметров и даже сантиметров. Толщина, таким образом, стомиллионные доли сантиметра, а длина — сантиметры. Ну, чем не нить?

Да, поведение дислокаций подобно поведению тонкого волокна — они способны изгибаться, цепляться за дефекты, а иногда и образовывать ткань из переплетающихся линий. А как вы знаете, тканевый материал обладает довольно высокой прочностью. Поэтому когда множество дислокаций сплетаются, они мешают друг другу двигаться и делают кристаллический материал прекрасно сопротивляющимся пластической деформации, то есть более прочным. В монокристаллах дислокаций не слишком много. Примерно по миллиону на квадратный сантиметр. Эта цифра велика, но из-за того, что дислокации распределены неравномерно, довольно большие пространства кристалла от них свободны. И если в этом районе появилась дислокация, она распространяется без затруднений. Поэтому монокристаллы не слишком прочны.

Иное дело поликристаллический материал, например, сталь. Плотность дислокаций в ней в тысячи и миллионы раз выше, чем в монокристалле. При этом уже дислокации не могут двигаться независимо друг от друга. Они взаимодействуют. Нити дислокаций образуют сложную пространственную структуру, напоминающую клубки переплетенные, запутанные. Понятно, что такой металл труднее деформировать. Он оказывается прочнее.

В сплавах возникают новые явления. Дело в том, что примеси — легирующие атомы — стремятся окружить край экстраплоскости. Грубо говоря, они тяготеют к «одинокому волку», ведь он постоянно ищет себе собратьев. Кроме того, оказывается, дислокация обладает способ-



ностью создавать вокруг себя поле упругих напряжений. Оно как бы засасывает инородные атомы. В результате линия дислокации, тоненькая и элегантная в чистых металлах, полнеет и расплывается в легированных. При этом она теряет подвижность, а иной раз попросту не способна перемещаться в пространстве — легирующие и окружающие ее чужеродные атомы играют роль гвоздей, «прибивающих» ее к кристаллической решетке. Ну, а если дислокация неподвижна, пластической деформации быть не может. Следовательно, легированные металлы прочнее нелегированных.

Теперь нам ясно, что избыток дислокаций ведет к подавленной пластичности, а значит, к высокой прочности металла. Означает ли это, что всегда нужно много дислокаций, чтобы прочность была высокой? Такая постановка вопроса была бы слишком прямой, чтобы оказаться правильной.

И действительно, как быть с усами? У них почти теоретическая прочность; сколько же в них дислокаций? Наверное, очень много? В том-то и дело, что дислокаций в усах почти нет. Бывают нитевидные кристаллы, в которых одна дислокация, а имеются такие, в которых дислокаций нет вообще. Оказывается, именно такие бездис-

локационные кристаллы и обладают предельной прочностью.

Если вдуматься, то противоречия здесь нет. Главное заключается в том, что для получения высокой прочности нужно «подавить» пластичность. А это можно осуществить двумя способами. Либо исключить основной инструмент пластической деформации — дислокацию, либо «набить» их в металл столько, чтобы они из-за тесноты и двинуться не могли. Первый случай имеет место в бездислокационных кристаллах — усах. Второй — в специально термически обработанной стали с высокой плотностью дислокаций.

Таким образом, дислокация — это великое благо (или зло!), позволяющее нам понимать явления, происходящие в кристаллических материалах, и сознательно влиять на них. Меняя лишь одну плотность дислокаций, мы можем в широких пределах получать нужную нам прочность. И не только ее. Дислокации влияют почти на все свойства металлов. И на их вязкость, и на электросопротивление, и на магнитные качества. Думаю, что почти все в металле, с чем связан небескорыстный интерес к ним человека, зависит от дислокаций: их количества, расположения, качества.

Что значит качества? Не оговорился ли я? Нет, не оговорился. Оказывается, существуют дислокации по крайней мере двух видов. Ту дислокацию, с которой мы имели дело до сих пор, называют обычной краевой. Смысл этого термина опирается на существование экстраплоскости ее кромки — края. Есть еще один, не менее важный вид дислокации — винтовой. Экстраплоскости у такой дислокации нет и напоминает она ножницы, режущие тонкий лист жести. При этом одна половина листа идет вниз, а противоположная вверх. Ножницы как бы скручивают две половины листа по отношению друг к другу. Но ножницы металл режут, а винтовая дислокация его просто сдвигает. Чем-то она похожа на тупые ножницы, не способные разрезать, а только сминающие металл, деформирующие его. После того, как винтовая дислокация пробежит по металлу, части его окажутся повернутыми одна по отношению к другой. Так же, как в случае с краевой дислокацией, перед дислокацией деформации нет, а позади нее — есть.

Итак, существуют два вида дислокаций — краевая и винтовая. Что-то вроде двух фамилий, двух кланов.

Но кроме фамилий, дислокации должны иметь и имена — краевых дислокаций великое множество и их надо каким-то образом различать. Основные признаки дислокации — величина и направление осуществляемого ею сдвига. Ведь сдвиг в кристалле может проходить по различным плоскостям. И после прохождения дислокации могут взаимно сместиться на различную величину. Эти два обстоятельства учитывают в физике твердого тела введением вектора Бюргерса. Его величина и направление и есть «имя и отчество» дислокации. Так и говорят: дислокация винтовая с вектором Бюргерса в одно межатомное расстояние, направленным по ребру куба. Но на практике все буднично: обозначается вектор Бюргерса буквой \mathcal{B} и равен он, например, a [III]. Означает это следующее: ориентирован вектор Бюргерса по диагонали куба и величина его составляет $a/\sqrt{3}$, то есть равна этой диагонали.

Подведем итог. Пластическая деформация кристаллов осуществляется дефектами — дислокациями. Особенностью их является способность сосредоточить усилие, приложенное к плоскости скольжения на одном маленьком «пяточке», благодаря чему дислокации движутся легко и быстро. Чем-то распространение дислокации напоминает «походку» гусеницы, у которой каждый шаг — это перемещение складки, морщины (вспомните эпиграф к этой части главы!).

Иногда дислокацию представляют себе иным образом. Ковер на полу двигать тяжело. Образуйте на нем морщину и тогда его легко можно передвинуть ногой. В итоге, ковер окажется смещенным на длину складки. То же самое можно сделать и с мокрой клеенкой.

Дислокация — это абстракция, научный вымысел или будничная реальность? Конечно же, реальность! Во времена Тейлора она была лишь теоретической схемой, хорошей идеей, моделью. Но сегодня десяток методов позволяет нам видеть дислокацию так же ясно, как прохожего на улице, наблюдать за ней с помощью электронного микроскопа, рентгеновских лучей и самого обыкновенного оптического микроскопа.

Как не вспомнить Иосифа Уткина, который задолго до наступления нашего торжества над дефектами писал:

„Он усом
не раз и

не два
отмечал
Большой дислокации метки...

Но зачем мы всем этим занимаемся? Ведь нас-то интересует разрушение! А при чем же здесь дислокация? Какое отношение имеют они к трещинам? Такие вопросы, наверное, хотел бы задать мне читатель, обладающий даже умеренным чувством осторожности и скепсиса. Ответ прост. Дело, оказывается, в том, что дислокации держат в своих руках ключ от мира прочности кристаллических материалов. Именно с ними и связан окончательный «диагноз».

ОКОНЧАТЕЛЬНЫЙ ДИАГНОЗ

...Толчок разорвал
напряженные сети молекул...

В. Назаров

Читатель помнит, что механика не смогла решить вопросы о том, с чего началось разрушение и что произошло с атомами.

Пришло время рассмотреть эту проблему с позиций физики.

Не следует думать, что в этом направлении все очевидно и доказано. Здесь накопились свои неясности и двусмысленности. Взять хотя бы основной вопрос, вокруг которого ломались копья и мнения на протяжении многих лет: всегда ли пластическая деформация необходима для появления первой микроскопической или, как говорят физики, зародышевой микротрещины?

Выдающийся советский ученый А. В. Степанов первый выдвинул точку зрения, согласно которой без пластической деформации микротрещина зародиться не может. И десятилетия это мнение господствовало. Оно и сейчас преобладает, но уже не является единственно возможным. Вполне допустим и противоположный взгляд. В противном случае было бы невозможно объяснить факты, наблюдавшиеся в опытах. Это ведь важно и потому, что не должно быть помех способности и желанию людей мечтать, фантазировать и сопоставлять противоположные, а иногда и взаимно исключаящие точки зрения.

Сейчас различают два типа трещин. Прежде всего

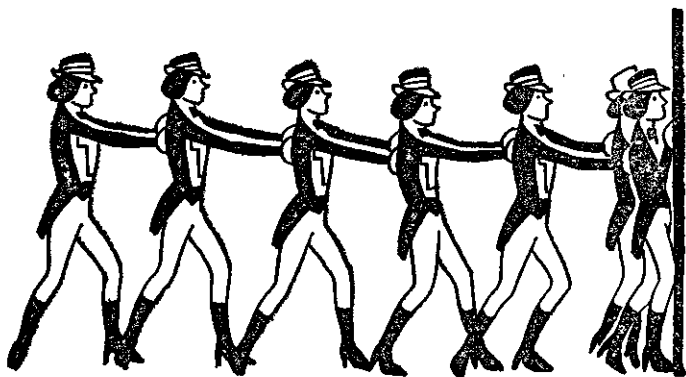
идеально хрупкие, так называемые силовые трещины. Название это отражает следующую мысль: трещины такого рода возникают благодаря механическому силовому расщеплению слоев кристалла. Происходит нечто подобное расслаиванию слюды, отрыванию старых обоев от стены или фотографий от листов альбома. При этом межатомные связи разрушаются как бы непосредственно под действием внешних механических усилий и одна атомная плоскость отрывается от соседней. Отличительная особенность таких трещин — плавный изгиб поверхностей и схождение их в вершине трещины на одно межатомное расстояние. Можно ли считать это объяснение исчерпывающим? Нет, конечно, это лишь образ, помогающий составить себе представление, модель. Не более. Понятным этот вопрос стал бы, лишь когда мы выяснили бы, какие события произошли при этом между двумя атомами. Каким образом разрывались межатомные связи? Что подделывали при этом электроны в пространстве между разрывающимися слоями? Этих вопросов много. Ответов, к сожалению пока нет. Не знаем мы и механизма разрыва кристаллической решетки. А между тем опыт показывает, что силовые трещины существуют. Их можно видеть на значительных участках кристаллов, лишенных дислокаций.

С микротрещинами второго вида — дислокационными — дело обстоит гораздо лучше: мы понимаем, как они образуются. Конечно, далеко не исчерпывающе, но все же понимаем. Начнем с характера дислокаций. Дислокация — дефект, сплошь и рядом не одиночный, а коллективный. К соседям своим она не безразлична и способна сосуществовать с ними, дружить и даже враждовать. Совсем как люди с тяжелыми и противоречивыми характерами. Дело доходит до того, что одна дислокация может поглотить другую. При этом нам ясно, что говорить о «доброй» или «злой» дислокации нелепо, как бессмысленно говорить об «умной» лампочке или «недалеком» книжном шкафу.

Присмотримся внимательнее к тому, как это происходит. Допустим прежде всего, что две краевые дислокации находятся в одной плоскости скольжения и их экстраплоскости лежат по одну сторону от нее. Оказывается, что в этом случае дислокациям предоставляются две возможности. Первая из них — жить, как добрые соседи: в тесноте, да не в обиде. Есть и вторая. Читатель

помнит, что образование дислокации связано в конечном итоге с внедрением в материал экстраплоскости. Это означает, что пространство вокруг дислокации деформировано. По мере сближения дислокаций под действием внешнего давления их упругие поля начинают взаимодействовать, препятствуя дальнейшему схождению. Если же в плоскости скольжения дислокаций много, то напряжения вокруг такого скопления их могут оказаться очень значительными — тесно дислокациям. И тогда может наступить момент, когда они поведут себя как скорпионы в банке — начнут пожирать друг друга. Впрочем, это слово не точное. Не точное прежде всего потому, что непонятно, кто кого съел. Помните, у Ильфа и Петрова были близнецы, «похожие друг на друга как две капли воды. Особенно, первый»... Судите сами, сближаются совершенно одинаковые дислокации, преодолели они сопротивление упругого поля и... слились воедино. Обе их экстраплоскости оказались соседними, а под их крайними атомами возникла пустота. Небольшая, но пустота. Обстоятельный анализ этого явления привел ученых к заключению, что пустота — это самый настоящий зародыш микротрещины.

То, что на этой странице выглядит так просто и естественно, в действительности процесс сложный. Просто две дислокации в одной плоскости скольжения соединиться не могут — они взаимно отталкиваются, как две спортивные машины, обгоняющие одна другую на узком треке. А внешних сил, способствующих сближению, нет. Их срастание возможно только с мощным коллективе примерно из 200—500 дислокаций, расположенных в од-



ной плоскости, да еще ограниченных в своем движении в одну сторону. Физики говорят — скопление дислокаций заперто. Чем? Чем угодно, любым барьером. Это может быть, например, граница зерна, инородное включение достаточно большой величины или какой-нибудь другой мощный дефект. На хвост строгой очереди из сотен дислокаций давит внешнее поле напряжений. Каково же приходится тем считанным дислокациям, которые оказались между толпой и барьером? Да ведь это все равно что попасть в кучу-малу и оказаться прижатым к асфальту. Дислокациям в вершине скопления не позавидуешь! Ведь на них давит вся очередь, а они упираются в барьер. В этих-то условиях дислокации и могут объединяться. Так в вершине скопления возникает зародышевая микротрещина.

Реальна ли нарисованная картина? Лишь отчасти. В вершине скопления трещина может образоваться за счет слияния дислокаций, но скоплений таких в «пятьсот душ» не бывает. Очереди дислокаций в кристаллах обычно гораздо короче. Но трещины все же на них образуются? За счет чего? За счет многих параллельных очередей дислокаций «ломающихся» в соседние «запертые двери». Эти очереди взаимодействуют друг с другом и когда появляется первая зародышевая трещина они «всем скопом» начинают нагнетать в нее дислокации. А как помнит читатель, каждая дислокация вносит в трещину свое пустое пространство под экстраплоскостью, вследствие чего растет трещина.

Есть другая возможность избежать огромного числа дислокаций внутри их скопления. Она заключается в том, чтобы преодолеть взаимное отталкивание, «неприязнь» дислокаций при ограниченном их числе. Для этого надо перейти от медленного нагружения к динамическому. Нужно разогнать дислокации и сблизать их на большой скорости. Тогда, обладая запасом кинетической энергии, дислокации «разменяют» ее на потенциальную энергию и прорвутся сквозь упругие барьеры, ограждающие другие дислокации. В результате при значительно меньшем числе дислокаций в скоплении можно ожидать их слияния с образованием микротрещины. Расчеты показывают, что скорости дислокаций при этом должны быть почти звуковыми (в стали, например, 3—5 км/с).

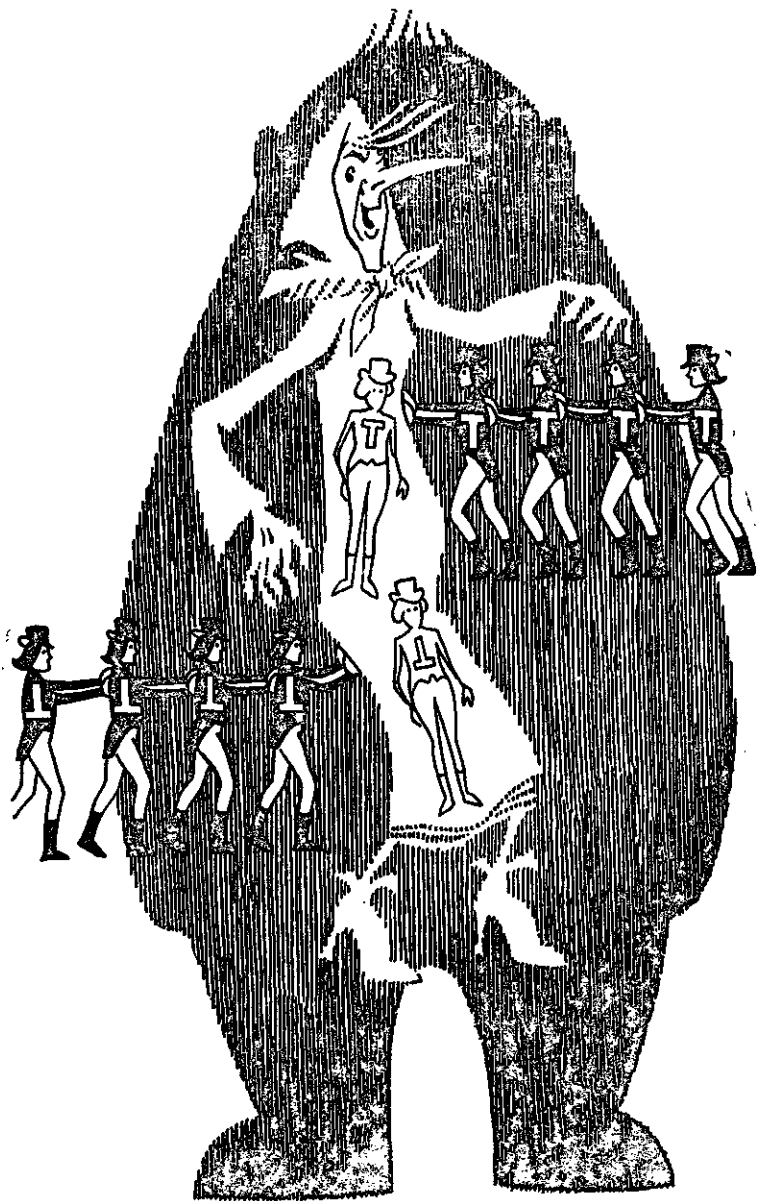
До сих пор предполагалось, что взаимодействуют дислокации одного знака, то есть их экстраплоскости нахо-



дятся по одну сторону от плоскости скольжения. Могут «конфликтовать» и дислокации разных знаков. Ситуация по-своему здесь очень благоприятствует объединению дислокаций. Дело в том, что упругие поля разноименных дислокаций тяготеют друг к другу.

Вот по параллельным и близкорасположенным плоскостям навстречу друг другу застопорились два дислокационных скопления с противоположными знаками. По существу роль каждого из них теперь двойка. Во-первых, для противоположного скопления это барьер. Во-вторых, это «нажимающий» клин, спрессовывающий две свои головные дислокации. В итоге ситуация оказывается более благоприятной для слияния дислокаций и проходит оно при относительно небольших скоплениях. Да и трещина растет быстрее — ведь у нее теперь двое «кормящих родителей».

Пусть читатель обратит внимание, в какой неразрывной связи выступают здесь дислокации и зародышевые микротрещины. На стадии, когда последняя представляет собой лишь две соединившиеся дислокации, трещина от них практически неотделима. Пластичность и разрушение как бы сливаются в единый неразрывный процесс как явление природы,



Словами Б. Ахмадуллиной:

Где дождь, где сад — не различить.
Здесь свадьба двух стихий творится.
Их совпадение разлучить
не властно зренье очевидца.
Так обнялись, что и ладонь
не вклинится...

Не остается в стороне при этом и тепловое движение, сотрясающее кристаллическую решетку и приводящее к постоянным колебаниям атомов в узлах решетки. Вибрирует и линия дислокации — на ней возникают и исчезают микроскопические волны. В каждый момент времени такая волна представляет собой перегиб линии дислокации в плоскости скольжения. Это означает, что на небольшом участке, кроме основной экстраплоскости, возникает маленький участок другой, параллельной первой. На нем дислокация как бы продвинулась вперед. Процесс этот, как говорят физики, носит статический, то есть случайный, характер. Самонадеянно и неверно было бы заявить, что вот на этой именно дислокации, да еще в этом ее месте возникнет перегиб. Зато всегда можно предсказать вероятность того, что в некотором объеме на достаточно надежном числе дислокаций такой процесс происходит. Пожалуй, это похоже на то, что вы не в состоянии предсказать, встретите ли через минуту на ближайшем перекрестке мужчину ростом 1 м 80 см. Вместе с тем статистика сообщает, как в каждой стране мужчины распределяются по своему росту. Еще недавно, например, у нас из каждых 10 000 мужчин в возрасте от 25 до 35 лет один-двое имели рост 190 см, трое-четыре — 187 см, восемь-десять 185 см, триста—182 см. А средний рост большинства составлял 168 см. Поэтому, если поставить вопрос так: «Какова вероятность того, что на ближайшем углу достаточно многолюдной улицы нам встретится мужчина ростом 180 см, то можно и «угадать».

Примерно также обстоит дело и с перегибами на дислокациях.

А между тем ленинградские физики А. Н. Орлов и В. И. Владимиров показали, что подобные, на первый взгляд ненадежные, соображения ведут к вполне надежным результатам. Оказалось, что когда на двух сблизившихся под давлением дислокациях возникают перегибы термического происхождения, облегчается слияние дис-

локаций и возникновение зародышевой микротрещины. И если ранее для образования такой трещины теория требовала совершенно фантастического количества дислокационных скоплений 200—500 штук, то термическое возбуждение кристаллической решетки и линий дислокаций уменьшает эту цифру в пять раз. А скопления 40—100 дислокаций — реальность.

Колонна дислокаций, или дислокационное скопление — одно из основных «боевых» построений дислокаций. В таком строю силы их как бы умножаются потому что к внешнему давлению—напряжениям — прибавляются еще собственные упругие поля дислокаций. Такая система обладает высокой «пробивной» способностью. Но представим себе следующую картину. Уперлось скопление в некий барьер, да настолько прочный, что пробить его невозможно. Внешние напряжения нарастают, а десятки дислокаций умножают его. В вершине этого дислокационного «зубила» обстановка становится критической... Но вот напряжения достигают предела прочности. Мы знаем, что в этом случае материал должен разрушиться. И действительно, под углом в 70° по отношению к скоплению «вспыхивает» трещина. Процесс этот облегчается, если барьер атакуется не одним, а несколькими скоплениями одновременно. Оказалось, что для достижения напряжений, равных теоретической прочности, таким же инструментом, как краевые дислокации, являются дислокации винтовые. Только в этом случае трещина возникает прямо в плоскости скольжения дислокаций, то есть в плоскости самого скопления.

Удовлетворила бы физиков нарисованная картина? Нет. И вот почему. Механизм «накачивания» напряжений в вершине скопления безусловен и созревание окрестностей материала в районе барьера к разрушению сомнения не вызывает. Но совершенно непонятно, как же все-таки возникает первичный, изначальный разрыв связей в кристаллической решетке размером ну хотя бы в два межатомных расстояния? Описанному механизму уже 25 лет, но до сих пор он не помогает ответить на поставленный вопрос. Поэтому его зародышевая трещина носит, я бы сказал, странный, не вполне естественный характер, условия для ее появления есть, а «спускового механизма» нет.

„Странный гость, говорю вам, неведомый гость.

Он прошел через стенку насквозь, словно
гвоздь,
кем-то вбитый извне для неведомой цели...

(Б. Ахмадулина)

В этом смысле неопределенным является еще один механизм образования микротрещины. Он предложен бизиками: советским — В. Н. Рожа-нским, и американским — Дж. Гилманом и заключается в следующем. В полосе скольжения скопились дислокации, запертые каким-то барьером. По мере накачивания дислокаций в эту полосу внешним источником плоскость скольжения изгибается под действием множества экстраплоскостей дислокаций, расположенных над ней. При этом происходит явление, подобное осыпанию лака с модельной обуви. При нанесении на кожу лак сцепляется с ней. В процессе работы кожа постоянно изгибается. Но механические свойства ее и лака различны. Поэтому различны и напряжения в коже и слое лака. При некачественном наклеивании рано или поздно лак начнет отслаиваться от кожи и осыпаться. Условия «вскрытия» материала по плоскости скольжения здесь вполне понятны. Но как это получилось, с чего это началось — не ясно!

Один из возможных ответов на этот вопрос предложили сотрудники Института кристаллографии АН СССР В. Л. Инденбом и М. Х. Блехерман. Они обратили внимание на то, что самое слабое место в скоплении дислокаций... сама дислокация. Оказалось, что сердцевина дислокаций — ее ядро — в определенных условиях может раскалываться. Вообще нужно заметить, что природа явлений в ядре краевых дислокаций сложна и недостаточно изучена. Окрестности края экстраплоскости приносят в будущем еще много неожиданностей. Одну из них и заметили В. Л. Инденбом и М. Х. Блехерман. Сердцевина дислокации — материал с нарушенной сплошностью. По некоторым соображениям следует считать, что вдоль кромки экстраплоскости идет пустой канал.

Напряжения в ядре дислокации чрезвычайно велики и вычислить их прямым расчетом сегодня еще невозможно. Стало быть, собственно механические свойства у ядра дислокации почти наверняка хуже, чем у матрицы ненарушенного кристалла. Имеется при этом в виду сопротивление материала на разрыв и сдвиг. И, как это ни странно, разрушение может стартовать прямо из ядра, служащего в данном случае исходным зародышем

микротрещины. Вопрос лишь в том, как начнет расти микротрещина. Было установлено, что в пластичных кристаллах она распространяется по плоскости скольжения. В хрупких же кристаллах сближение дислокаций ведет к перестройке их ядер и вскрытию трещины прямо вдоль эстраплоскости. А что при этом происходит с дислокацией? Она самоуничтожается, совершая своеобразное хакари!

В нашем научном багаже три механизма зарождения трещин с вариантами. Исчерпаны ли этим возможные случаи? Нет, конечно, их довольно много. До сих пор дислокации, образующие трещину, двигались по одной и той же плоскости скольжения. Между тем в кристаллах они способны перемещаться по различным плоскостям. Чего же можно ожидать от таких дислокаций, когда они сходятся вместе? Теория говорит, что они решительно взаимодействуют друг с другом. Настолько решительно, что, исчезая, сами дают жизнь новой «молодой» дислокации, расположенной в плоскости спайности, то есть как раз в той плоскости, в которой легче всего протекает разрушение. Поскольку обычно скольжение развивается по множеству плоскостей, на плоскости спайности создается много дислокационных «отпрысков», сливающихся вместе и образующих трещину. Этот механизм, предложенный английским физиком А. Коттрелом, напоминает двух лыжников, скатывающихся с горки и сталкивающихся вниз. Представьте: их лыжи наехали одна на другую, перекрестились и перепутались. В таком положении лыжники — дислокации — дальше скользить не могут. Особенность заключается в том, что до своего объединения две скользящие дислокации являются инструментами пластической деформации. А вот родившаяся дислокация — уже инструмент разрушения. Что-то вроде ситуации, когда два человека, столкнувшись в дверях троллейбуса, зацепились друг за друга: пуговица пальто одного из них попала в ячейку «авоськи» другого. Естественный итог такого столкновения — оторванная пуговица или разорванное пальто... В большинстве случаев это — гордиев узел: разорвать его можно, только разрубив. Но... Коттрелл доказал, что иной раз «склеившиеся» дислокации, казалось бы, полностью потерявшие «свое лицо» и даже исчезнувшие, можно разделить. В нашей «троллейбусной» ситуации это означало бы следующее: неторопливо ос-

вободить пуговицу, что возможно далеко не всегда. На языке дислокаций это звучит так: диссоциировала, то есть распалась на две исходные скользящие дислокации, превращающиеся в трещину. Как сказал американский поэт У. Дж. Смит, «... здесь назад означает вперед» потому, что ушел кристалл от разрушения, вернулся к своему монолитному существованию, к прочности.

Целая группа механизмов разрушения связана с существованием границ в кристаллических материалах. В металлах — это границы зерен, в монокристаллах — границы субзерен. И в том, и в другом случае речь идет о стенках дислокаций. В монокристаллах стенки эти довольно просты. Грубо говоря, строй этот представляет собой краевые дислокации, стоящие почти «в затылок» друг другу. Экстраплоскости каждой из таких дислокаций кончаются на границе и все вместе они создают разворот одной половины кристалла по отношению к другой. Чем выше плотность дислокаций в границе, тем больше экстраплоскостей «умирает» на ней, тем больше развернуты кристаллы. Границ таких в кристаллах великое множество и образуют они сложные пространственные картины совершенно произвольного вида. Границы плохо видны, если смотреть на кристалл изда-лека. Но если приблизить его к глазам и повертеть под падающим световым лучом, то можно заметить отблеск



от различных участков кристалла. Это и есть наиболее крупные отдельные его субзерна. Что касается огромного числа мелких субзерен, то они едва заметны.

Между тем при деформировании кристалла дислокации движутся в нем по различным кристаллографическим направлениям и периодически пересекают границы. Что происходит при этом?

Если разворот смежных субзерен не слишком велик, то есть плотность дислокаций в границе мала, полоса скольжения может легко и безболезненно пройти сквозь границу. Однако по мере роста угла между смежными кристаллами межзеренная граница становится прочнее. Теперь уже нужно приложить определенные напряжения для ее прорыва дислокациями извне. Наступает наконец такой момент, когда межзеренное сочленение превращается в мощный барьер, ограничивающий движение всех дислокаций, упирающихся в границу в полосе скольжения. О том, что происходит дальше, известно из работ англичанина А. Стро и француза Ж. Фриделя. Под давлением «толпы» дислокаций напряжения в районе столкновения дислокационного скопления и границы быстро нарастают, и вот...

Перегородок тонкоробость
Пройду насквозь, пройду как свет.
Пройду, как образ входит в образ
И как предмет сечет предмет.,

(Б. Пастернак)

Граница разрушается, как стенка старого дома, в которую уперся нож бульдозера. При этом часть ее остается на месте, а часть смещается. В разрыве и возникает трещина. Она как бы замыкает границу.

Группа ленинградских ученых возглавляемая В. А. Лихачевым, обратила внимание еще на одну возможность взаимодействия полос скольжения с дислокационной границей, имеющую более мягкий, эволюционный характер. Представьте себе, под скрежет тормозов круто поворачивающая машина оставляет на асфальте темную полосу — тонкий слой материала шин, схватившийся под действием давления и вызванной им силы трения с поверхностью дороги. Круто разворачивающаяся дислокация тоже оставляет свой след. Когда полоса скольжения переходит из одного кристаллита в другой, изгиб траектории на границе ведет к тому, что в ней оседает так называемая разностная дислокация. Она и

представляет собой «остаток» дислокации, застрявший в межзеренном сочленении.

Дислокацию, преодолевающую границу между двумя зернами, можно уподобить лыжнику, «взмахивающему» на бугорок. Если его скорость велика, он за бугорком пролетит какое-то расстояние, как с трамплина, по воздуху. Для того чтобы он плавно съехал с бугорка, скорость его должна быть достаточно низкой: тогда сила тяжести успеет прижать лыжника к поверхности бугорка. Если дислокация, движущаяся по плоскости скольжения, выходит на межзеренное сочленение, то, находясь на нем, она должна повернуться на угол разориентировки смежных зерен и пойти по новой плоскости скольжения. Но это означает, что она обязана изменить свой вектор Бюргерса, что возможно только, если на границе появится еще одна дислокация, вектор Бюргерса которой по правилу сложения векторов замкнет треугольник между векторами исходной дислокации и дислокации, перешедшей во второе зерно. Грубо говоря, роль этой дислокации заключается в том, чтобы заставить скользящую дислокацию «облизать» границу и перейти с плоскости скольжения одного зерна на плоскость скольжения другого. Если граница атакована большим числом полос скольжения, возникает множество разностных дислокаций. Слияние их друг с другом ведет к появлению трещины в границе. Могут эти дислокации образовать и собственную стенку. Тогда, как показывает теория, на краю стенки может также возникнуть зародышевая трещинка, как в механизме Стро — Фриделя.

В. Л. Инденбом, а потом и американские физики Е, Дэш и М. Марцинковский нашли еще один вариант появления трещины. Под действием полосы скольжения, упершейся в межзеренную границу, в последней возникает ступенька. Это происходит примерно так же, как если бы нож бульдозера давил на вязкую стенку из сырой глины. Расчет показывает, что в окрестностях такой ступеньки возникли бы огромные внутренние напряжения (это и неудивительно — ведь процесс происходит в монолитном материале), настолько большие, что рано или поздно вместо ступеньки образовалась бы микротрещина. Поскольку она заняла бы место ступеньки и играла бы «примирительную» роль (ведь с ее появлением напряжения бы естественно снизились), ее называют аккомодационной. Иначе говоря, трещина — опор-

тунист, приспособляющий обе половины кристалла и две части сдвинутой границы к сосуществованию.

Вряд ли можно в коротком рассказе изложить все, что известно о зарождении микротрещин. Но не рассказать о двойниках и их спорной роли непростительно. Уж очень это необычный, экзотический дефект. Дислокация микроскопична и невооруженным глазом не видна. Другое дело двойник — он может быть размером, скажем, в половину большого кристалла. На монокристаллических материалах, например на висмуте, кальците, цинке и даже стали, двойники имеют форму полосок и хорошо видны. Как правило, обычная сталь всегда содержит двойниковые прослойки в большом количестве. Это связано с происхождением двойников — они легко возникают при динамическом нагружении. А поскольку при изготовлении сталь многократно подвергают различного рода ударам и деформациям при высоких скоростях нагружения, двойников в ней невероятное количество. В каждом зерне их может быть несколько десятков. Но размер зерна исчисляются сотыми долями миллиметра. Следовательно, по сечению куска металла в 50 см можно насчитать около миллиона двойниковых прослоек и ни один из этих двойников не равнодушен к прочности. Огромная армия двойниковых прослоек в стали — постоянное напоминание нам:

Все знать должны, все знать должны,
Что мы живем в реальном мире.

(А. Межиров)

И напоминание это очень важно.

Дело в том, что нет в металле другого дефекта, в объяснении которого так много неопределенности. И ни один дефект, пожалуй, не умудряется быть одновременно столь полезным и столь же вредным, как двойник.

Но пришло время рассказать о том, что, собственно, представляет собой этот дефект. Буквально — это область переориентированной кристаллической решетки. Причем на вполне известные углы. Возьмем, к примеру, кристалл. Часть его зажмем в тиски, а на вторую будем давить. При определенном усилии кристалл повернется и займет зеркально отраженное положение по отношению к первоначальному.

Интересно, что тело двойникового кристалла имеет ту же кристаллическую решетку, что и «материнская» часть, и при том совершенно неискаженную. Другими

словами процесс двойникования только разворачивает кристаллический материал, но не насыщает его дефектами. Иное дело — граница между основной и сдвоенной частями кристалла: она забита дислокациями. Их так и называют — двойникующие. По существу двойникование — это разновидность пластической деформации — формоизменение кристаллического материала.

В реальном кристалле двойникование протекает обычно в виде процесса, сосредоточенного в относительно узких полосах. Так и говорят: двойниковые прослойки. У такого двойника две границы с основным кристаллом. И на каждой — шеренги дислокаций, создающие вокруг двойниковой прослойки поле упругих напряжений. Еще более интенсивное поле возникает в поликристалле вследствие того, что в процессе двойникования внутри кристалла материал смещается при неизменных внешних границах тела. Итак, двойникование способно повышать напряженность металла в его микрообъемах. Это одно из обстоятельств, причем не главных, ведущих к тому, что в некоторых материалах при близком расположении двух параллельных двойниковых прослоек между ними образуются пустоты, имеющие строгие кристаллографические очертания, так называемые каналы Розе I рода. Это самые настоящие зародышевые микротрещины.

Еще интереснее пересечение двойниковых прослоек. В очаге, где оно происходит, кристалл раскалывается на множество мельчайших кристалликов размером в микроны и доли микрона. Это канал Розе II рода — трещина, заполненная раздробленным материалом. Поскольку объем разрушенного материала всегда больше, чем плотного кристаллического, эта зародышевая трещина как бы распирает окружающий ее кристалл и вызывает появление в нем дополнительных микротрещин.

Особенностью двойниковых прослоек, обнаруженной Р. И. Гарбером, является их обратимый характер. Двойник считают образованием упругим. Это означает, что при снятии нагрузки или при нагрузке обратного знака двойниковая прослойка может исчезнуть. В. А. Федоров и автор книги, опираясь на эти представления, показали, что каналы Розе I и II родов тоже обратимы. После исчезновения упругих двойников они могут «залечиваться» и прочности кристалла в этих условиях уже ничто не угрожает.

Однако для двойников это явление исключительное. Значительно чаще они создают трещины определенно необратимые и возможностей у них для этого предостаточно. Например, они могут создавать дислокации и «пускать» их вперед себя. Такие опережающие дислокации от двух двойников способны взаимодействовать и создавать микротрещины.

Двойники не упускают случая создать трещину и другими путями. Так, при пересечении двойника с поверхностью металла, с межзеренной границей, с неметаллическим включением и вообще с любым достаточно жестким макроскопическим барьером можно ожидать появления трещины и далеко не всегда механизм ее возникновения ясен. Зато несомненно другое: двойниковые прослойки опасны и являются потенциальными источниками зарождения микротрещин в металлах.

Значит, двойник, безусловно, вреден, значит, он зло?

Но тут всплывает органическое качество двойника — его невероятная многоликость.

В том-то и дело, что двойник — далеко не всегда зло. Начнем с того, что при нагружении металла двойник играет роль своего рода демпфера. Он довольно быстро включается в игру и, «протекая» по сечению металла, релаксирует, то есть гасит внешнюю нагрузку тем, что осуществляет быстрое пластическое деформирование. Особенно эффективен этот процесс при динамическом то есть очень быстром, нагружении. Дислокации еще только «расшевеливаются», освобождаются от своих атмосфер, отрываются от насыженных мест в кристаллической решетке, а двойник уже побежал. Да еще с какой скоростью. А. П. Королевым и автором этой книги определена эта скорость 2—2,5 км/с. И все время, пока двойник «сломя голову» мчится по кристаллу, он снимает внешнее напряжение, работая на прочность металла. В процессе динамического нагружения стали в течение 20 мкс двойники остаются один на один с внешним нагружением и разряжают его до подхода главных оборонительных сил металла — потоков дислокаций. Таким образом, они принимают первый удар и защищают металл. Все ясно, скажет читатель, двойник — добро. Этот хамелеон-двойник преподносит нам новый сюрприз. Пока он защищает металл, поглощая внешнюю нагрузку, он уже «думает» о будущем. И «мысли» его, к сожалению, «темные». Уже в процессе своего, казалось бы, за-

щитного бега, бега ради жизни, двойники начинают создавать микротрещины, Увы, мы уже знаем, к чему это рано или поздно приведет...

Странный дефект! Ну, а если он уже есть, как с ним живет металл? Может быть, здесь двойникам можно, наконец, доверять? Может быть, они поддержат прочность? Можно ли па это надеяться?

Двойники верны своей природе и здесь. С одной стороны, они способны притормаживать макроскопическую трещину, коль скоро она распространяется в металле. С другой — они охрупчивают металл, понижая его сопротивление хладноломкости. Вот так всегда: с одной стороны... с другой стороны...

ОТРОЧЕСТВО ТРЕЩИНЫ

...Миг между светом и тенью...

В. Брюсов

Теперь мы знаем о первых мгновениях жизни трещины — от приложения нагрузки до появления зародышевой микротрещины. Следующим этапом ее бурного развития является медленное, как говорят, докритическое подрастание. Имеется в виду то, что на этом этапе своей истории трещина не опасна и полностью контролируема. Ее подрастание возможно лишь при повышении существующих напряжений. Это гарантия того, что разрушение не «сорвется с цепи» и не начнет безжалостно, без разбора крушить металл. Все это не означает, что здесь трещина обязательно микроскопически* мала. Нет. Она при этом может быть достаточно большой, например в стали, — в несколько миллиметров. Но длина ее все же не достигает тех размеров, после которых она перестает зависеть от внешних напряжений. На языке механики это звучит так: трещина меньше гриффигсовских размеров и для ее подрастания нужно подводить к ней больше энергии, нежели дает сама трещина.

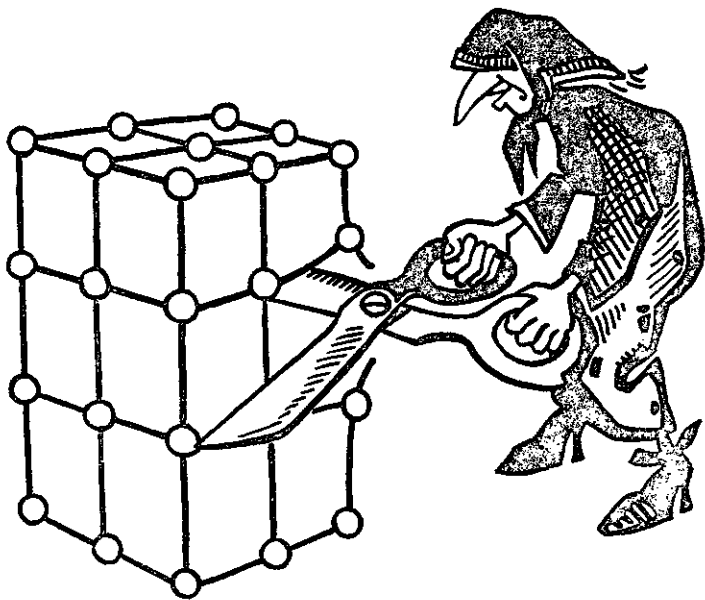
Таким образом, докритическая трещина — устойчивая, «спокойная», я бы даже сказал «флегматичная», словом, неопасная.

Однако рано или поздно эта «спячка» кончится и тогда перед нами возникает другая трещина — хищник. Поэтому всплывает вопрос: как же все-таки такая трещина растет?

Ответить одной фразой на этот вопрос нельзя потому, что трещины бывают разные. Читатель уже знает, что трещины делят на силовые и геометрические. Обратимся к первым.

Силовая трещина отличается своей демонстративной независимостью от пластической деформации. Во всяком случае она это «декларирует вслух». Такая трещина представляет собой разрыв межатомных связей в своей вершине. Сначала между первой парой атомов, затем после концентрирования напряжений — между второй, опять собирается с силами — и между третьей... Так этот разрыв и передается от одной пары атомов к другой, как чеховский мираж из «Черного монаха»... «От миража получился другой мираж, потом от другого третий, так что образ черного монаха стал без конца передаваться из одного слоя атмосферы в другой. Его видели то в Африке, то в Испании, то в Индии, то на Дальнем Севере...»¹

¹ Чехов Л. Я. Черный монах. Соч. Т. VIII. М.: ОГИЗ, 1947. С. 269.





Ну, а что говорит по этому поводу эксперимент. К сожалению, эксперимент молчит. Потому что очень трудно, хотя, вероятно, и возможно, провести его так, чтобы трещина была начисто лишена признаков пластической деформации. Сегодня — это область, где безраздельно царствуют теоретики. И работают они примерно следующим образом. Рисуют на бумаге кристалл, состоящий, скажем, из 100 ил и 1000 атомов — эдакую кристаллическую решетку в десять атомов на десять. Выбирают некоторый закон взаимодействия атомов между

собой и «строят» трещину длиной в несколько атомов. А затем с помощью электронно-вычислительной машины просчитывают, каким образом с приложением внешних напряжений изменится равновесие этого вымышленного кристалла и как трещина будет расти, то есть рвать межатомные связи в своей вершине. В этой области работают и отечественные, и зарубежные ученые. Успехи здесь не слишком обнадеживающие, по крайней мере, по двум причинам. Во-первых, уж слишком условны межатомные силы — в действительности они несоизмеримо сложнее. Во-вторых, уж очень мал кристалл, а для большего у сегодняшних машин не хватает памяти. Поэтому надежность получаемых результатов здесь не очень велика.

Некоторые из результатов этой группы работ привели, например, к совершенно удивительному заключению. Оказалось, что, несмотря на отсутствие изначальных посылок, каким бы то ни было образом связанных с пластичностью, расчеты привели к появлению вблизи трещины... типичной дислокации. Не может ли оказаться, что дислокации, которым «по условиям игры» не место в хрупком разрушении, присутствуют и здесь?

А. Н. Орлов и В. И. Владимиров сообщают об одном механизме подрастания трещин, основанном на существ-

вовании в кристаллических материалах точечных дефектов. Само определение — точечный дефект — используют в физике для обозначения двух состояний. В первом из них атом сорвался из своего положения равновесия, как говорят, за счет тепловой флуктуации. Это означает, что в процессе теплового движения один из атомов подвергся «согласованной» атаке ряда ближайших соседей и оказался «вышвырнут» в междоузлие. Такой атом, потеряв насиженное место в решетке, переходит на нелегальное положение и бродяжничает по кристаллу со скоростью до 1 км/ч. Его называют дислоцированным атомом, или дефектом по Френкелю. Я. И. Френкель, как, вероятно, знает читатель, был великолепным физиком, исторгавшим лавину идей, одной из которых и была идея точечных дефектов. Вторым точечным дефектом, или так называемым дефектом по Шоттки, является вакантное место, оставшееся после перехода атома из «оседлого» состояния в бродячее. Дефект по Шоттки (вакансия или просто «дырка» — все это синонимы) обладает незаурядным темпераментом и способен двигаться с довольно значительными скоростями — до 10 км/ч, то есть во много раз быстрее дислоцированного атома. Читатель может удивиться, как это движется пустое место? Очень просто! Допустим, в некотором узле существует вакансия. На нее «садится» атом из соседнего узла. Естественно, теперь вакансия оказывается там, где был раньше атом. На это место переходит другой атом — тем самым перемещается и вакансия. Так она и путешествует по атомным узлам как тень ушедших атомов. В этом отношении кристалл напоминает неполный зал во время концерта. Если программа интересна, зрители стремятся пересесть поближе к сцене; вакансии — пустые места — все дальше от сцены. Бывает и наоборот...

Эти-то два дефекта и приводят к подрастанию микротрещины. Вот как это происходит. В вершине трещины под совместным воздействием термических флуктуации и приложенных напряжений атом вылетает в междоузлие, переходит в статус дислоцированного и диффундирует, то есть медленно, зигзагообразно, как частица в броуновском движении, мигрирует в районы, удаленные от трещины. Процесс этот повторяется неоднократно и вместо атомов в вершине образуются пустые места. Это означает, что трещина подросла.

В случае, когда подрастание трещины определяется вакансиями, конечный результат оказывается тем же самым, но механизм иной. Теперь к вершине трещины течет поток вакансий. Они замещают атомы в устье трещины, обеспечивая ее рост. Различие в том, что первому процессу будет сопутствовать повышение плотности дислоцированных атомов в окрестностях подрастающей трещины, в то время как при вакансионном механизме этого нет, и в том, что второй процесс протекает гораздо быстрее. Но итог один и тот же. С помощью точечных дефектов трещина способна докритически подрастать. Поскольку точечные дефекты «шустры» лишь при достаточно высоких температурах, эти механизмы могут быть активными только при очень малых скоростях нагружения сравнительно легкоплавких материалов. В противном случае высокая температура окажется совершенно необходимой. В целом этот процесс имеет статистический характер. Это означает, что в масштабе микросекунд активность оттока дислоцированных атомов от вершины трещины и притока к ней вакансий будет пульсировать — ведь это диффузионный процесс. Совсем как у Кэррола: «Тут не было «раз, два, три — и вперед!» Каждый начинал бежать, когда хотел, и останавливался тоже, когда хотел. Таким образом узнать, окончен ли бег, было нелегко...» Но при достаточно длительном времени процесса он протекает усредненно монотонно, равномерно.

И все-таки главными являются не эти механизмы. Большой опыт, накопленный и физиками, и механиками, говорит об одном: докритическое подрастание трещин неразрывно связано с пластической деформацией. Связь эта неслучайная — пластическая деформация не только сопровождает и в подлинном смысле контролирует процесс ранних стадий созревания, но, по-видимому, служит его основной движущей силой. Эта обреченность субкритической трещины с пластической деформацией хорошо проявляется во всех дислокационных механизмах «созревания» трещины.

Все они требуют для подрастания трещины поля распределенных дислокаций той атмосферы, без которой субкритическая трещина «дышать» не может, — ведь подрастать за счет упругих напряжений она еще не в состоянии. Поэтому она нуждается в весьма высокой плотности дислокаций — примерно 10^{10} их на 1 см^2 . Но

и этого трещине мало. Она весьма разборчива и для своего продвижения вперед требует не любых дислокаций, а только одноименных. Физики говорят, что одним из условий докритического разрушения является пространственное разделение дислокаций, то есть такое положение, при котором в некотором объеме существуют дислокации только (или преимущественно) одного знака. Не слишком ли все это сложно для трещины *vulgaris*, то есть трещины обыкновенной?

Дело заключается в том, что основным методом воздействия дислокаций на трещину является их самопожертвование— дислокации, «вливаясь» в полость разрушения, увеличивают ее. Сама дислокация после этого исчезает. Возникающая трещина расположена при этом так, чтобы приносимая дислокациями «пустота» располагалась по основанию трещины-клина под экстраплоскостями дислокаций. Поэтому-то и небезразлично, какого знака будет дислокация: положительная содействует росту трещины вниз, отрицательная — вверх. Ясно, что если нужно обеспечить устойчивое подрастание трещин, необходимы дислокации одного знака.

Есть ли названия у механизмов роста докритических трещин? Есть, вот они. Механизм Орована, первый из них, опирается на отдельную полосу скольжения, подошедшую к уже существующей трещине и подкармливающую ее сваливаемыми в трещину дислокациями. Оказалось, однако, что дислокаций, атакующих с единственной полосы скольжения, мало. Е. Паркер послал к трещине пачки скольжения, то есть системы из большого числа параллельных линий скольжения.

А. Н. Орлов усложнил картину, рассмотрев продвижение докритической трещины вблизи барьеров, сдерживающих работу дислокационных источников. Это привело сразу же к скачкообразному распространению трещин на самых ранних стадиях их существования. «Испортился характер» микротрещин, стал неровным, почти взрывным и тем самым сделал докритическую стадию немного более опасной.

Но если уж говорить начистоту, природа очень помогла нам тем, что у трещины существует период докритического роста. Представьте себе, что его не было бы. Сегодня не вызывает никакого сомнения, что в металлах и любых кристаллах всегда существует большое количество зародышевых микротрещин. Тем не менее материа-

лы обладают определенным иммунитетом по отношению к ним — живут себе с зародышевыми микротрещинами и свой долг по отношению к конструкциям и, следовательно, к человечеству выполняют. Зарождение и подрастание трещин, таким образом, тревожно, но нестрашно. Почему? Потому, что трещины эти докритические, и для того, чтобы они перешли в опасную стадию, неизбежно должен быть пройден медленный путь докритического подрастания.

Будь иначе, твердь на пути своем
Такие действия произвела бы,
Что был бы вместо творчества —
разгром.

(Данте)

Таким образом, докритический период — великое счастье для человечества — отсрочка разрушения, предоставленная нам природой. Время для спасения конструкций от аварий.

АКТИВНОЕ И ТВОРЧЕСКОЕ СОВЕРШЕННОЛЕТИЕ

Происходило все мгновенно...

Л. Озеров

Мы только что кончили разговор почти на оптимистической ноте. И, казалось, для этого были все основания — металл-то не разрушился. А те трещины, которые в нем были или образовались в процессе деформации, представлялись нам если не «милыми», то во всяком случае и не слишком страшными. Самое большее, что мы себе позволяли, — это академически благодушный вопрос:

Что же там за этим летом,
в мире ТАМ, в стране ПОТОМ?..

(Р. Казакова)

Между тем, наша ошибка была почти стандартна. Для все нас смерть — событие далекого будущего. А ведь еще Сенека говорил, что большая часть смерти уже наступила: то время, что за нами — в ее владении. Поэтому все, что происходило при зарождении трещины и медленном докритическом ее подрастании было не только преамбулой, но, что гораздо страшнее, фундаментом наступающей катастрофы.

По мере подрастания докритической трещины в окружающем материале протекает пластическая деформация, ведущая к упрочнению металла. Особенно актив-



на она в вершине медленно и как бы неуверенно ползущей трещины. Помимо этого, продолжается процесс создания новых трещин и рост основной из них осуществляется среди моря многих мелких. Это вводит в игру совершенно новый процесс — пожирание магистральной трещиной других, небольших трещинок, благодаря чему подрастание трещины ускоряется. Докритическая трещина то медленно семенит, поглощая дислокации своей вершиной, то совершает небольшие прыжки, заглатывая другие, поменьше. И все же пока еще скорость роста мала — лишь несколько миллиметров в час. Конструкция пока что жива и на вид здорова. Но поток энергии из ее напряженного массива плывет к трещине и обменивается на процессы необратимой деформации, готовящие металл к неизбежному. Все это время конструкция сопротивляется внешнему нагружению, несет свою службу.

Но вот процесс достиг такой стадии, когда объем металла вокруг трещины за счет пластической деформации упрочнился до предела. Это сразу же «благоотворно» сказалось на трещине. Во-первых, она теперь движется в материале с огромным числом дислокаций одного знака. Во-вторых, кристаллиты материала пришли в движение как льдины во время ледохода — они разворачива-

ются в вершине трещины; подставляют свои уязвимые кристаллографические направления атакующему разрушению. Количество мельчайших трещин стало настолько большим, что магистральная «хватает» их направо и налево, все более темпераментно прыгая при этом из стороны в сторону. И хотя говорят, что двумя ключами нельзя открывать одну дверь, здесь дверь, охраняющую прочность металла, открывают едва ли не тремя ключами одновременно. Все это означает: трещина приближается к критической ситуации.

Наконец, трещина выросла до графитсовских размеров. Значит, начиная с этого мгновения вся поступающая из напряженной конструкции упругая энергия осваивается трещиной и только ею. Кончились активные прежде процессы деформирования окружающего объема, насыщения его дислокациями, разворот зерен и прочие. Теперь они если и протекают, то только в непосредственной близости от вершины и ее полостей — из главных стали второстепенными. Лишь ничтожной части упругой энергии конструкции достаточно, чтобы скомпенсировать теперь более чем скромные «пластические» аппетиты трещины; основной поток энергии идет на разрыв межатомных связей в вершине. Теперь уже процесс становится либо подлинно хрупким, либо, как говорят механики, квазихрупким, то есть ложно хрупким. Тем самым подчеркивается мысль, что пластическая деформация хотя и существует, но решающей роли уже не играет.

Говоря словами А. Блока, «...Вот срок настал. Крылам бьет беда»... Трещина начинает стремительно разгоняться. Трудно себе это представить, что делает она это с оперативностью, которой позавидует даже ракета ПВО. Ускорение трещины достигает 10^8 м/с², что в 10 миллионов раз больше ускорения земного тяготения. Это, например, означает, что за тысячную долю секунды трещина способна развить скорость в 3 км/с. Из вялого увальня в мгновение ока она превратилась в неудержимого спринтера, перелетела из области физики в область чистой механики и... перенесла нас туда. А ведь это не просто — оторваться от привычных нам теперь дислокаций, вакансий и дислоцированных атомов. Это означает вернуться в «будничные» мир макроскопических явлений и процессов. Это означает резкое изменение не только масштабов, но и направления мыш-



ления. Это означает, наконец, совершенную необходимость для нас увидеть романтическое и яркое «в неинтересной» нам механике.

...То, что казалось третьестепенным,
сглаженным, тусклым, плавным, —
вдруг вознесло свои башни и стены
и оказалось главным.

То, что казалось школьным, настольным,
скучным, отжившим, давним. • —
вдруг оказалось краеугольным
камнем...

(#. *Белинский*)

В чем же проявляется господство механики на последнем этапе закритического разрушения? Прежде всего в надструктурном его характере. В стали, например, имеется несколько составляющих—феррит, цементит, перлит. Быстрая трещина как бы не замечает этого — она сечет все эти составляющие, не разбирая. Далее, когда трещина приобретает достаточно большую скорость, исчисляемую километрами в секунду, практически все известные нам материалы и вещества становятся хрупкими. Неудивительно, если речь идет о стали. Но вот плексиглас — вещество не особенно хрупкое, раскалывается быстрой трещиной как орех. Да что плекси-



глас, налейте жидкий кислород в обычную калошу и она будет ломаться, обвисая кусочками резины на тканевой подкладке.

Вы можете возразить: но ведь для этого желательно интенсивное охлаждение? Да, но даже при комнатной температуре можно построить опыт так, чтобы резина раскалывалась как стекло. Просто для этого нужно разогнать трещину.

Первую группу великолепных опытов еще до войны провел ленинградский физик М. И. Корнфельд. Он стрелял в обыкновенную струю воды. И оказалось, что пуля в полном смысле слова раскалывала воду. Последняя рассекалась не столько пулей, сколько возникающими трещинами и разлеталась на «осколки». Следовательно, даже жидкость можно колоть трещинами, если скорость приложения нагрузки достаточно велика. Ясно поэтому, что и сливочное масло можно было бы «рубить» пулей и трещинами. Впрочем, вы это знаете. Достаточно вспомнить, как ломается хорошо замороженное масло под тупым ножом. Таким образом, в механике структура материала уже не так важна — это обстоятельство отступает на второй план. Важнее некоторые макроскопические свойства вещества — его прочность, вязкость, мо-

дуть упругости и другие. Что касается дислокаций и иных дефектов, то они уходят в тень. И тогда разрушение самых различных материалов, металлов, монокристаллов, минералов, аморфных тел и... даже жидкостей происходит по некоторым общим законам, явно и недвусмысленно пренебрегающим физическим строением вещества и опирающимся на чисто упругие его характеристики.

Вот вам и характер трещины. При зарождении и медленном подрастании ею «руководит» физика. Зато в за критическом своем состоянии она подчиняется механике.

Самым ярким доказательством этого являются предельные скорости распространения быстрых трещин. Почти все теоретические исследования в этом направлении выполнены механиками разных стран и их можно разделить на несколько групп. Прежде всего классическими исследованиями Гриффитса показано, что скорость трещины, которую можно было бы ожидать после потери трещиной устойчивости* способна достичь скорости звука. Сразу же скажем, что эксперимент этого не подтверждает. Но вряд ли от этого трещина, разрушающая подчас ценнейшие труды, становится менее страшной.

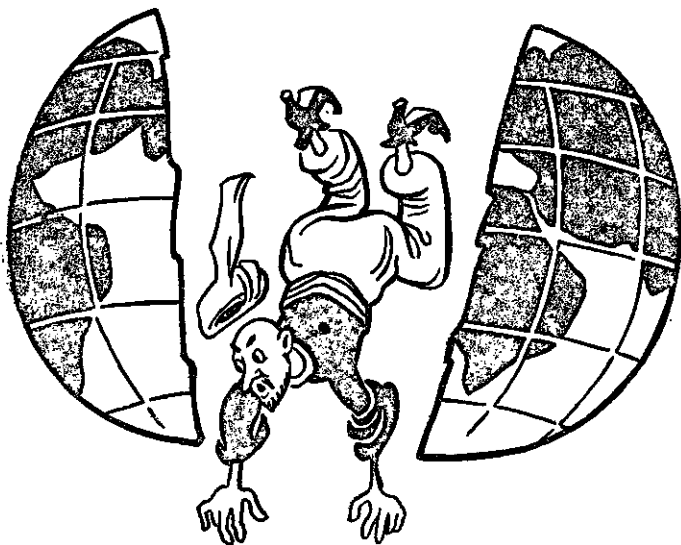
Вторую группу работ начал англичанин Невилл Френсис Мотт. Пожалуй, это единственный известный физик приложивший руку, и к стати с успехом, к за критической стадии роста трещины. Он, а затем Роберт Уэллс и другие более трезво оценили потолок скорости «сорвавшейся с цепи» трещины: они полагают ее в пределах 0,38—0,40 скорости продольных звуковых волн. Для стали, например, это 2000—2200 м/с, а для монокристаллов, алмаза и того больше: 6000—7000 м/с. Вот каков спринтер! Да, пожалуй, не только спринтер, но и необычайно «выносливый» стайер.

Писатель Г. Честертон рассказывает о древней мусульманской легенде. Некий султан повелел построить пагоду, которая вознеслась бы превыше звезд небесных. «...Но Аллах поразил его громовым ударом, от которого разверзлась земля, и он полетел, пробивая в ней дыру, все вниз, вниз, до бесконечности, отчего в ней образовался колодец без дна, подобно задуманной им башне без вершины. И вечно низвергается с этой перевернутой башни душа султана, обуянная гордыней...»

Трещина может поддерживать скорость так же неограниченно долго. Лишь бы разрушаемое тело было боль-

шим и поток энергии из его объема или от прикладываемой нагрузки продолжался пока трещина находится в пути, быть может даже в очень долгом.

Третья группа исследований появилась благодаря первооткрывательской работе Элизабет Иоффе из Великобритании. Было показано, что при скоростях трещины, равных 0,6 скорости поперечных упругих волн, наступит ветвление. Это явление и соответствующая ему скорость были приняты Иоффе за предельно возможную скорость роста трещин. Многие авторы позднее просчитывали идею Иоффе и получили цифры от 0,53 до 0,794 скорости поперечных волн. Для стали получаются значения ритма трещины примерно от 1600 до 2000 м/с. Таким образом, они ниже предельных скоростей по Мотту. Основной «грех» этих работ состоит не столько в не вполне правильном определении скорости, сколько в том, что ветвление не прекращает распространения трещины, а лишь открывает новую дверь разрушению. Дверь эта такова, что после прохождения в нее трещины исправить уже ничего нельзя. Если при быстром, но обычном разрушении конструкция раскалывается на две части, которые все-таки можно как-то соединить, сварить, скажем, то после ветвления деталь превращается в ворох осколков. Их и собрать-то порой невозможно.



...Так и природа, доведя
До совершенства всякое свое,
Искусное подчас, сооруженье,
Вмиг начинает разрушать его,
Швыряя вокруг разрозненные части.

(Дж. Леонарда)

Четвертая группа исследований отождествляет максимальную скорость роста трещины со скоростью рэлеевских волн. Что это за волны? К нашему несчастью, мы с ними хорошо знакомы. Вот произошло землетрясение. В очаге его возникают упругие колебания—продольные, поперечные и поверхностные. Если первые и вторые бегут по толще Земли, то третьи распространяются только по ее поверхности. При этом точки на поверхности движутся по эллипсам. В общем, это те же самые волны, которые возникают на поверхности воды, но их проявления более разнообразны. Например, поверхностные волны могут мчаться по дну океана, между двумя плотно соприкасающимися массивами. Главное их отличие от продольных и поперечных заключается в том, что поверхностные волны очень слабо затухают. Продольные и поперечные перемещаются в объеме и поэтому гаснут обратно пропорционально кубу расстояния. А поверхностные — обратно пропорционально квадрату. Поэтому с расстоянием продольные и поперечные из игры выходят, а поверхностные остаются и несут разрушительную энергию землетрясения, произошедшего где-то на другом конце земного шара.

Вот с этими-то волнами и связывают предельные возможности трещины. Абсолютные значения скорости рэлеевских волн в стали составляют примерно 3000 м/с. Г. И. Баренблатт считает, что если трещина добралась до этого предела, то возникает какое-то резонансное состояние, при котором она невосполнимо теряет свою энергию, хотя и продолжает «систематически» получать ее из деформированного объема. Трещина выступает таким образом в роли мота и транжира, тратя неизмеримо больше, чем получая. Автору этой книги кажется, что механизм здесь иной. Растущая трещина разряжает энергию, накопленную в объеме. Последняя стекает на полость трещины и преобразуется в поверхностные волны. Они-то и транспортируют энергию в вершину трещины. Если снабжение вершины трещины энергией осуществляется поверхностными волнами, то сомнения как будто отпадают и можно ощутить причинную связь

между скоростями рэлеевских волн и трещины. Беда лишь в том, что пока замкнутое кольцо перетока энергии прямо не доказано ни экспериментально, ни теоретически, хотя рэлеевские волны на полостях трещины обнаружить и удалось.

А что говорит опыт о скоростях, которые способна развивать трещина? Прежде всего трещина достигает предельной скорости не сразу. Она сначала разгоняется. Быстро, но разгоняется. Причем тем оперативнее, чем выше приложенные напряжения. Вероятно, можно считать установленной прямую связь между скоростью трещины и потоком упругой энергии, поступающей в ее вершину. На этапе разгона скорость разрушения определяется поэтому условиями опыта—напряжениями, размером образца, скоростью приложения к нему внешней нагрузки и многими другими. Иное дело, когда трещина выходит на предельные скорости. На стали, например, они колеблются от 2000 до 2600 м/с. Это скорости практически не зависят от природы разрушаемого тела и определяются только упругими его характеристиками. Например, на сталях разного состава они близки друг к другу. Хотя пластичности различных сталей серьезно отличаются друг от друга, на скорость звука их значения не влияют. А предельные скорости разрушения в конце концов представляют собой ту или иную долю звуковой скорости. Неудивительно поэтому, что быстрая трещина способна достичь одинаковых предельных скоростей и в стали Ст3, и в высокоуглеродистой стали ШХ15, и в закаленной стали и даже... в стекле. Поведение трещины при критических скоростях обезличивает материалы и потому вызывает в нас внутренний протест. Но ничего нельзя поделывать—таковы законы природы и надо жить в соответствии с ними.

Приняв закон, прими его вериги.
Иль оттолкни — иль всей душою чти:
Не будь ослом, который носит книги
Лишь потому, что их велят нести.

(И. Л. Бунин)

Из всех оценок скорость трещины, достигающая рэлеевских волн, — наибольшая. Разогнать до такого ритма трещину трудно, но можно. Автору удалось его сделать лишь в одном случае—при импульсном нагружении. Надеяться на подвод энергии из объема нагруженного образца не приходилось. Поэтому в непосредствен-

ной близости от возникающей трещины взрывали не-большой заряд взрывчатки. Именно его энергией и определялся рост трещины в первые микросекунды после взрыва. И на стекле, и на стали на непродолжительное время трещина умудрялась развивать скорости до 3000 м/с. Вот уж воистину, как заметил шведский журналист Л. Бьорг, «иной раз благодаря хорошему пинку, мы обретаем крылья». Лишь только волна, возникшая в очаге взрыва, обгонит трещину, стремительный рост приостанавливается и разрушение распространяется со скоростями «моттовскими» примерно 2200—2600 м/с.

Таким образом, как будто с рэлеевскими волнами действительно связаны предельные возможности движения трещины. Недавно это было еще и экспериментально подтверждено Л. М. Лезвинской и автором этой книги. Оказалось, что поток энергии из объема разрываемого металла подтекает не буквально в вершину трещины, а, как это не удивительно, в зону перед трещиной. С ростом скорости поток, снабжающий трещину, распределяется по все расширяющейся области перед устьем. Все большее количество энергии «промахивается» мимо вершины и тем самым устраняется от разрушения. При предельной скорости, равной рэлеевской, почти вся энергия в вершину не попадает, а убегает в пространство.

Длительное время точка зрения о рэлеевском барьере преобладала. Правда, складывалось впечатление, что если бы удалось осуществить энергоснабжение вершины трещины каким-либо другим способом со скоростью, превышающей рэлеевскую, образование трещины можно было бы ускорить и достичь сверхрэлеевских скоростей. Но прямо осуществить это было трудно. Sensацией прозвучали в 1970 году работы зарубежных ученых С. Винклера, Д. Шоки и Д. Каррена. Они направили световой импульс рубинового лазера на кристалл хлористого калия. При этом в очаге поражения вещество превратилось в плазму с температурой в миллион градусов, расширяющуюся со скоростью в десятки километров в секунду. По фронту плазмы возникла трещина. Плазма проникла в ее полость и создала своеобразный клин, разгоняющий трещину. Скорость распространения оказалась удивительной — 60 км/с, то есть в 10—15 раз превысила скорость звука! Почему же это оказалось возможным? Но прежде надо объяснить, почему это было невозможным ранее.

Когда мы прикладывали нагрузку и растягивали образец, трещина получала энергию опосредованно — через материал деформированного образца. А он мог пропускать поток волн напряжений в лучшем случае только со звуковой скоростью. При нагружении же лазером энергия плазмы прикладывается непосредственно к вершине трещины. Отсутствие посредника позволяет накачивать энергию с неограниченной скоростью и, таким образом, разогнать трещину, как показывают расчеты, в 25 раз быстрее, чем скорость звука. Интересно здесь то, что материал перед клином «не предупрежден» о приближении трещины до тех пор, пока не подвергнется непосредственному удару. Речь идет не об обычном разрушении, а о своего рода сверхзвуковом течении твердого тела вокруг горячей плазмы и трещины.

На этом надо бы и закончить этот раздел. Но я хотел бы поделиться с читателем тем чувством, которое охватило меня много лет назад, когда я начинал свою работу. Каждый раз, когда моя кинокамера, хороший и надежный прибор, — приносила новые и новые цифры ошеломляющих скоростей разрушения, каждый раз, когда я читал статьи о сумасшедших скоростях трещины, мне казалось, что мало найдется сил, способных остановить это торжество бессмысленности и хаоса. Но на самом деле учеными разных стран уже был заложен крепкий фундамент в основание науки о прочности.

«УБЕЖДЕНИЯ» ТРЕЩИНЫ

Нет ничего...
Это стремленье
К бегу, к движенью
Сущность всего...

М. Эминеску

Все предыдущее показало нам как бы обреченность детали с трещиной и, я бы сказал, торжество зла. Своего рода апофеозом бессмысленности явилась закритическая стадия разрушения, несущая беду со скоростью в треть космической. На своей завершающей стадии процесс разрушения поражает прямолинейной нелепостью и неудержимостью.

Посмотрим внимательнее в связи с этим на «моральные устои» быстрой трещины. Начнем с того, что не

только при медленном, но и при взрывном разрушении трещина появляется не сразу. Происходит так называемая задержка разрушения. Ее длительность определяется характером нагружения и качеством разрушаемого металла. Для пластичных сталей при очень «нежном» нагружении изгибом она составляет 6500 мкс. При предельно «жестком» взрывном разрушении закаленной стальной полосы задержка всего 10—50 мкс. Природа этого явления сложна и связана в первую очередь с зарождением дислокаций и их движением созданием микротрещины и формированием поля напряжений. Все вместе это, так сказать, «роды» разрушения. Естественен вопрос: зависит ли каким-либо образом последующее распространение трещины от этого первого этапа? Нет! Ибо «мораль» трещины проста — она живет настоящим моментом, идет в том направлении и так, как того требует поле напряжений в данной точке пространства и времени. Она не помнит прошлого. В физике это явление не редкое. Например, когда в какой-то части пространства наложились друг на друга и провзаимодействовали волны любой природы, их дальнейшее движение происходит так, как будто никакого взаимодействия между ними никогда и не происходило. Существует даже специальный принцип суперпозиции, определяющий это явление. Согласно ему в любом сложном акустическом процессе каждая волна, каждый звук сохраняют свою «суверенность» и всегда могут быть выделены, правда, с теми или иными ухищрениями. «Это как ветер и вода, они движут друг друга, но каждый остается самим собой»¹.

Трещина растет в потоке упругих волн, обрушивающемся на нее. Волны подчиняются принципу суперпозиции и заставляют трещину покориться ему. Поэтому в каждый момент своего движения трещина поступает так, как ведет себя «непомнящий родства». Ее поведение диктуется только сиюминутной ситуацией реального поля напряжений. Инерцией и «совестливостью» она практически не обладает.

Ф. Кривин иронически говорит об этом так: «— Помещение должно быть открыто, — глубокомысленно замечает Дверная ручка, когда открывают дверь.

¹ *Ремарк Э. Тени в раю*//Север. 1967. № 9—11.

— Помещение должно быть закрыто, — философски заключает она, когда дверь закрывают.

Убеждения Дверной Ручки зависят от того, кто на нее нажимает⁴. Как будто списано все это с поведения «беспринципной» трещины. Мораль ее проста — она живет настоящим моментом, не помнит прошлого и идет туда и так, как того требует поле напряжений.

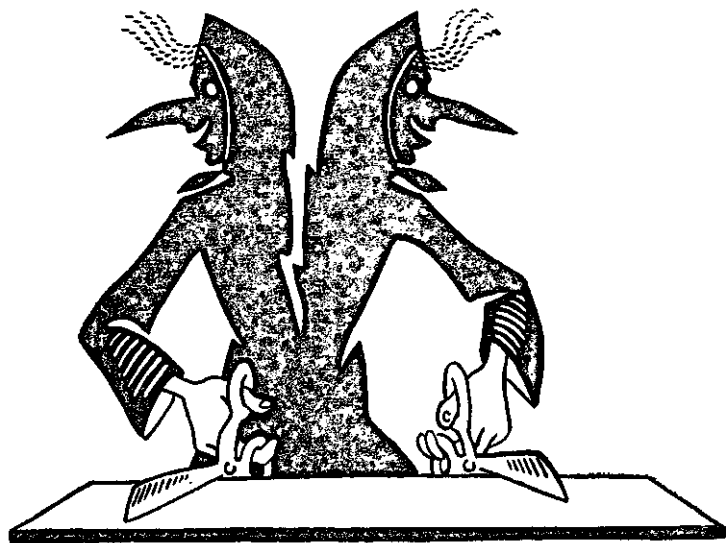
Невероятная чувствительность быстрой трещины к локальным изменениям упругого поля ведет к сложному явлению, называемому ветвлением. Внешне оно проявляется просто. При достаточно высокой скорости, достигающей в стали 1600—2000 м/с, трещина разделяется на две или три. Каждая из возникших трещин способна распространяться дальше и также ветвиться. Но после каждого акта ветвления трещина теряет свою скорость, иной раз до нуля! Затем следует быстрый разгон до пороговых скоростей — ветвление и опять спад.

Почему же это происходит? Да потому, что упругая энергия, идущая на хрупкое разрушение, тратится на компенсацию поверхностной энергии. Если при обычном разрушении возникают две поверхности, то при ветвлении их уже четыре, если трещина разделилась на две, и шесть, если она распалась на три. Поэтому запасы упругой энергии в микрообъемах материала, прилегающего к трещине, быстро иссякают и трещина гасит скорость, а то и вовсе останавливается. Нужно затем некоторое время, чтобы упругие волны принесли новые порции энергии издалека. Число таких циклов неограничено, потому что вследствие огромных ускорений трещина развивает скорость молниеносно и на протяжении считанных миллиметров способна ветвиться многократно.

Рождение вторичных трещин всегда связано с искривлением траектории магистральной. Очередность событий при этом такова. Сначала основная трещина «ныряет» в сторону, выбрасывает ответвление, а затем, как бы оттолкнувшись от него, возвращается на прежнюю траекторию. В результате ответвление оказывается направленным по касательной к искривленному участку траектории. Впоследствии вторичная трещина отклоняется на углы до 30—40°.

Элементарный акт излучения вторичной трещины

⁴ *Кривая Ф.* Сила убеждения. В стране вещей. — М.: Советский писатель, 1961. С. 15



связан, таким образом, с искривлением основной магистральной. Последующее их расхождение обусловлено, вероятно, известной отдачей в соответствии с законом сохранения количества движения. Вместе с тем даже при многочисленных ветвлениях магистральная трещина распространяется сравнительно прямолинейно. Поэтому первичным является искривление трещины, вызванное ее нестабильностью, а излучение — вторичным. И действительно, Элизабет Иоффе показала, что ветвление должно наступать тогда, когда в широкой области перед быстрой трещиной возникают примерно равные напряжения и трещине, в сущности безразлично, куда «бежать». Трещина при этом может легко «заблудиться» и отклониться в сторону. В этих-то условиях испускание ответвленной трещины и способствует спрямлению траектории. Чем-то это напоминает реактивное движение, при котором, выбрасываемое из ракеты вещество может сообщить ей движение в противоположном направлении.

В предыдущем разделе мы говорили, что ветвление открывает совершенно новую дверь в разрушение, новую его страницу.

Необычный это процесс. Иной раз ответвления способны разворачиваться по отношению к основной трещине на 90° и даже идти в направлении, обратном тре-

щине. Особенно часто это наблюдается при взрывном нагружении. Бывает, что трещина растет вдоль растягивающей нагрузки, что почти неправдоподобно. Правда, она в этом случае «влияет», как бы извивается вдоль направления приложенной силы.

Не менее сложны и процессы по фронту трещины. В обычных условиях он довольно полог. То есть трещина ведет наступление на материал примерно одинаково по всему его сечению. Иное дело при ветвлении. С его началом трещина атакует пластину металла двумя колоннами. Фронт ее расщепляется и имеет форму двух лепестков, прилегающих к поверхности. Обе эти трещины на противоположных сторонах образца приобретают при критической скорости значительную самостоятельность, позволяющую им «рыскать» из стороны в сторону и создавать ответвления. Чувствительность их огромна. Они реагируют на малейшие изменения поля упругих напряжений или структуры материала."

Необычайные формы приобретает подчас ветвление в закаленной стали ШХ15. Оно рассекает массив металла на множество крупных осколков. Помимо них, из поверхности разрушения буквально выпадает огромное количество мельчайших металлических щепок сечением иногда в сотые и тысячные доли миллиметра. Эти щепки раскола появляются из-за того, что вибрирующие участки фронта ветвящейся трещины выкалывают их из материала.

Оказывается эта разновидность микроскопических усов встречается при разрушении различных монокристаллов и далеко не всегда связана с ветвлением. Однако в процессе ветвления образование «щепок» носит массовый характер и ведет к появлению усов сколь угодно мелкого размера, возможно до отдельных кристалликов мартенситных игл — тончайших структурных элементов закаленной стали поперечным размером в 10^{-4} — 10^{-5} см. Процесс вибрации фронта трещины, при котором одна или обе поверхностные трещины-лепестки дают ответвления, и является механизмом всего ЯЕления. Механизмом — да, но вряд ли его сердцем!

Что касается подлинных причин ветвления, то единого мнения о них пока нет. Хронологически первой является известная читателю точка зрения Элизабет Иоффе, связывающая наступление разделения трещин с пороговыми скоростями. Есть и другое мнение, соглас-

но которому ветвление наступает в момент, когда напряжения в вершине растущей трещины достигают некоторых критических значений. Это, однако, не всегда подтверждается. Например, на ряде сталей быстрые трещины есть и напряжения в их устье могут быть как угодно большими, а вот ветвления нет. И вообще этот процесс тяготеет к определенным, далеко не любым веществам: на закаленных сталях трещина ветвится, а на термически не обработанных остается монолитной при любых скоростях.

А закаленное стекло? Что происходит с ним при разрушении, читатель хорошо знает. Для этого достаточно представить себе, что будет, если камень попадает в лобовое стекло автомашины. Из точки удара разбегаются трещины радиальные, а кроме того, все секторы между ними раскалываются трещинами поперечными. И те, и другие бегут со скоростью в 1500—1700 м/с и мгновенно превращают большое и монолитное стекло в груды из тысяч мельчайших осколков...

Неудивительно поэтому, что в годы войны на оконные стекла наклеивали крест накрест полоски бумаги. Сейчас для этой же цели на автомашинах используют так называемый триплекс. Два его слоя представляют собой закаленное стекло, а третий (промежуточный) — вязкий пластик, не позволяющий стеклу развалиться при поражении.

Большие скорости, по-видимому, далеко недостаточный критерий для суждения о возможности или невозможности ветвления. Обратите внимание, читатель, на то, что материалы, в которых происходит размножение трещин, являются носителями больших внутренних напряжений. За исключением целлулоида, плексигласа и некоторых других пластиков. Случаи ветвления в ненапряженных материалах не известны.

Процесс ветвления следует связывать с величиной и распределением остаточных напряжений в разрушаемом материале. Можно нарисовать следующий механизм их действия. Быстро растущая трещина разряжает остаточные напряжения в прилегающем районе. Упругие импульсы от поля распадающихся внутренних напряжений, подводимые произвольно к трещине, «ломают» ее установившееся движение. Отдельные участки фронта под действием этих импульсов врезаются в берега трещины, создавая ответвления.

Помните, у Ильфа и Петрова? В учреждении был сторож, который строго спрашивал пропуска. Если пропуска не предъявляли, пропускал и так. В последние годы выяснилось, что в принципе для ветвления не требуется поле внутренних напряжений. И на других материалах, в частности металлах, этот процесс мог бы реализоваться в виде однократного акта при условии подавления пластичности и ужесточения напряженного состояния в вершине трещины. Таким образом, внутренние напряжения, по-видимому, являются стимулятором, но не первопричиной ветвления. Причиной же следует считать нестабильность трещины, наступающую по достижении критических скоростей.

Таковы теоретические соображения о природе ветвления — интересного с научной точки зрения и отталкивающего с практической, инженерной. Это и понятно. Ведь если обычное разрушение оставляет нам какие-нибудь надежды, то ветвление развеивает их в прах и в переносном, и в прямом смысле слова —

Чего же хорошего?
Полный развал!

(В. Маяковский)

БРАТСКИЕ? СКОРЕЕ ВОЛЧЬИ КАЧЕСТВА!

Вы в распре яростной
 так оба беспощадны,
Так алчно пагубны,
 так люто кровожадны,
О братья-вороги,
 о вечные борцы!

Ш. Бодлер

Часто разрушение есть результат роста единственной трещины. Однако не менее редки случаи, когда возникают системы микротрещин, объединяющиеся затем разрывом перемычек. Иной раз оказывается, что монолитная, на первый взгляд, трещина представляет собой совокупность микроскопических щелей, смещенных вдоль и поперек направления разрушения. Опыт показывает, что для большинства материалов реальна именно система трещин, в то время как единый разрыв можно считать лишь известным и очень удобным теоретическим приближением. Удивительного в этом ничего нет. Зарождение микротрещин — механизм дислокационный. А дисло-

кации расположены по всему металлу. Поэтому и возникновение микротрещин протекает по обширным пространствам пластически деформированного материала. Их наблюдали в поликристаллических сталях, металлических монокристаллах ряда металлов, в галоидных кристаллах, в целлулоиде и плексигласе. Не говоря уже о стекле, проходящем при изготовлении довольно сложную обработку, неизбежно приводящую к возникновению систем микроскопических нарушений сплошности.

...Там трещины скрываются коварно
За гладкой напряженностью стекла...

(Дж. Андайк)

Читатель, конечно, и сам встречал такие «столпотворения» трещин. Например, вы хотите сломать тонкий слой прозрачного пластика. Если он достаточно вязок, вам придется сильно его изогнуть, причем вы сразу заметите, как в месте перегиба он помутнеет. Это результат того, что в нем возникает избыток трещин, рассеивающих свет. Когда вы гнете тонкий полированный слой алюминия, его поверхность тоже мутнеет. Это связано в первую очередь с образованием на ней сложного рельефа из-за выхода полос скольжения. Но затем по этим полосам возникают мельчайшие трещины, в конечном итоге и разрушающие металл.

Число примеров без труда можно умножить. Ясно, однако, что образование систем микротрещин до разрушения и в его процессе — не исключение, а правило. На этом основании полагают, что любую разрушаемую упругую среду нужно рассматривать как тело, содержащее множество мельчайших острых трещин всевозможных ориентации.

Любой металл, из которого мы строим самолет, автомашину или корабль, не монолит в полном смысле этого слова. Пройдя прокатные станы, обработку на станках и прессах, он накопил в себе огромное число мельчайших трещинок как память о встрече с инструментом различных сортов и видов.

Сюрпризы такого рода, конечно, не могут радовать специалистов по прочности. Но что делать, ведь не случайно говорят: гони природу в дверь, — она войдет в окно.

Таким образом, всегда или почти всегда реальный металл работает с готовыми или появляющимися на самых ранних стадиях деформирования микротрещинами.

Самое интересное здесь заключается в том, каким образом и когда закончится докритическое вязкое подрастание трещин и начнется вторая, неуправляемая и катастрофическая стадия лавинного их роста. Физические процессы, лежащие в основе такого перехода в системах трещин, н вполне понятны. Ведь речь идет об устойчивости не одной трещины, а огромного их числа. Тем более неясно решение этой задачи в микроскопических условиях, когда одна из микротрещин растет за счет того, что «поедает» многие другие. Да, я не оговорился, трещина — хищница, да к тому же питающаяся себе подобными.

Есть две легенды о Минотавре. Согласно одной из них, у него были бычьи рога, змеиный хвост, львиные лапы и он пожирал свои жертвы. Вторая легенда изощреннее. Вся сила Минотавра, рассказывает Мартина Моно, в ней заключалась не в острых когтях и клыках, а в том, что желая уничтожить человека, он принимал его облик. Люди погибали, сводя счеты сами с собой... Похоже это очень на битвы трещин—они-то ведь братья-близнецы. Отличие, однако, от близнецов здесь немалое—трещины, оказывается, — заклятые враги.

Вопрос в том, какая из сотен и тысяч трещин окажется Минотавром, а какая — жертвой. Любая из них может быть и тем и другим. Это зависит от одного: каким образом она ориентирована и насколько успела подрасти. Главным «канибалом» обычно становится трещина, наибольшая по размерам и перпендикулярная к направлению растягивающих напряжений. Именно она начинает свое продвижение вперед, прощупывая своим упругим полем окрестности. Речь, конечно, идет не о каком-то радаре, которым она располагает. Нет, просто она очень чувствительна к, окружающему полю напряжений. А находящиеся рядом с нею микротрещины, меняют его, заставляя магистральную хищницу это ощущать и реагировать движением своей вершины.

Пока две трещины взаимно удалены, то есть расстояние между ними намного превышает их размеры, они друг друга не чувствуют. Словами А. С. Пушкина: «Все кончено: меж нами связи нет».

Но если расстояние между их вершинами меньше длины одной из трещин, картина меняется. Обе, находясь в пластичном материале, скажем стали Ст3, начинают разворачивать свои вершины навстречу друг другу.



Это происходит и в случае медленного статического нагружения и при динамическом процессе. Скорость разрыва перемычек в последнем случае достигает порой 50 м/с. При их объединении скачком увеличивается длина магистральной. Упругое поле такой трещины становится больше по размерам и она начинает «ощущать» более отдаленно расположенные трещины. Следует очередной «кровожадный» акт поглощения и возможности трещины еще более расширяются. «Съеденные» трещины не всегда и не строго расположены по линии основной. Поэтому ее форма сложная, ступенчатая. Таким образом, объединяя десятки и тысячи своих же сестер-трещин, магистральная достигает, наконец, критических размеров. Теперь уже она способна пренебречь пластическим течением в своей вершине и процесс кооперирования трещин ускоряется. Скорости трещин и разрыва перемычек между ними исчисляются сотнями и тысячами метров в секунду. «Волчий» характер при этом неизменен, а вот механизмы потери равновесия могут стать совсем другими. Например, небольшие трещины около устья магистральной, чем-то напоминающие рыбок-лоцманов у пасти

некоторых видов акул, теперь уже легко возбуждаются мощным упругим полем основной трещины и сами сливаются с ней, образуя быстро растущее целое.

Совершенно понятно, что это уже беда. После начала стремительного роста трещины с повальным объединением всех попадающихся на пути мелких трещинок у конструкции нет будущего. Она обречена. Для практики интересен период докритического стабильного существования металла. Пусть с трещиной! Пусть с целой их системой! Но металл должен служить, сопротивляться внешним силам и нести нагрузку. Он должен жить. И мы хорошо знаем, что он живет. Все без исключения конструкции детали и узлы содержат трещины и в большом количестве, но служат великой прочности! Почему?

По двум причинам. Во-первых, они спроектированы так, что приложенные к ним напряжения всегда меньше тех, которые нужны для подрастания самой «агрессивной» трещины. А во-вторых, и мы об этом уже говорили, металлы имеют определенный иммунитет против трещин. Он создается «прививкой», в роли которой выступает пластическая деформация. Она отодвигает за критический процесс и содействует локализации разрушения вблизи его наиболее острых в вершинах трещин и дефектов. Процессы деформирования, как человек, сглаживающий возможные конфликты, обволакивающий их деликатностью и мягкостью, понижают поле упругих напряжений в вершине трещины и, не давая ей расти, растрачивают накопленную энергию на движение дислокаций. Плохо, если металл хрупок по своей природе. Обладая он даже высокой прочностью, это не спасет его от разрушения, появившись в нем какой-то концентратор напряжений или микроскопическая трещина. Ведь теперь нет амортизатора — пластичности, а напряжения в остром концентраторе настолько велика, что без труда превзойдет изначальные прочностные свойства металла.

Вот поэтому-то и говорят, что чувствительность к надразам высокопрочных сталей всегда выше, чем у низкопрочных.

Долго ли может жить металл с докритической системой трещин? Быть может вечно? Это было бы слишком хорошо, чтобы быть правдой!

Природа позаботилась и здесь о том, чтобы противопоставить плюсы минусам. Один из таких минусов заключается в следующем. Пусть нагрузка на деталь мала

и несоизмеримо ниже, нежели любые пределы прочности. По всем законам механики трещины не должны были бы расти в этих условиях. Но советский физик С. Н. Журков показал, что даже в этом случае разрушение неизбежно. Вопрос лишь в том, когда оно произойдет. Чем больше приложенная нагрузка, тем неотвратимее конец и тем раньше он наступит. Эту закономерность так и называют временной зависимостью прочности.

С какими же физическими процессами связано убывание прочности со временем? Видимо, их много. Здесь и дислокационные явления, если речь идет о кристаллических материалах. Здесь и подрастание трещин за счет вакансий и дислоцированных атомов. Здесь, как считают некоторые физики, происходит и прямой разрыв атомных связей. И уж, безусловно, протекает разрушение за счет медленного докритического объединения трещин. Однако в целом это явление исключительно сложное и до конца пока что не изученное. Главное, однако, заключается в том, что даже при относительно низких нагрузках беспредельно долго прочным материал быть не может.

Что же делать? Прежде всего стремиться к тому, чтобы количество микротрещин в металлах было минимальным. Также важно, чтобы, уж коль они существуют, размеры их были возможно меньшими. Совершенно необходимо предусмотреть какой-то буферный механизм притормаживания трещин. Простейшим является, конечно же, пластическая деформация. Поэтому желательнее, чтобы металл всегда был максимально вязким, без потери в прочности. При выполнении этих условий даже со многими микротрещинами, металл может долго, очень долго служить людям и быть воплощением надежности и прочности.

КОЛОРАТУРНОЕ СОПРАНО

Но будто бы
Трещат при расщепленьи
Мельчайшие
Частицы
Естества!

Леонид Мартынов

Когда-то французский поэт Жан Дипрео писал:

...Змеєю трещина ползет,
Ползет неслышно по стене
В просторном доме...

Прав ли он был? Действительно ли трещина ползет так уж и неслышно? Опыт говорит о том, что трещину к молчаливкам отнести нельзя. На каждом этапе своего существования — от зарождения до стремительного закритического роста — она непрерывно заявляет о себе вслух. При этом она «вещает» едва ли не во всех диапазонах — от неслышимого инфразвука через весь слышимый нами спектр до ультразвука, также не воспринимаемого нашим слуховым аппаратом.

С чем же связана «говорливость» трещины? Прежде всего дело не только в ней. Любое тело, в котором под воздействием внешней нагрузки распространяются упругие волны, способно совершать колебания. А поскольку каждому телу свойственна собственная частота колебаний, так называемая резонансная, то при нагружении, особенно динамическом, еще задолго до разрушения происходит излучение волн в окружающее пространство. Ударьте по пустому ведру или бочке! Щелкните ногтем по тонкому стакану и вы услышите его звучание. Вспомните, как проверяют хрустальную вазу при покупке. По ней слегка стучат карандашом или ложечкой. Если она цела, звук чистый, звонкий, а если в ней есть трещина, возникает дребезжание. Вот как рассказывает о звучании хрусталя писатель Г. Семенов: «...он любил показывать домочадцам свое искусство: жестким пальцем, смоченным в вине или, если вина не было, в уксусе, вел по краешку вазочки, как по струне, и в какой-то момент в воздухе рождался вдруг тонкий и грустный, серебряный голос баккары, который властно витал по комнате и тихо замирал, вызывая на лице у Демьяна Николаевича торжествующую улыбку. Звуки были чище и гуще, чем звуки виолончели или скрипки, и чудилось всегда будто не хрусталь звучал, не он издавал протяжный ветренный гул или звон, а сам воздух наливался звучным пением... Видя новую вазочку, он говорил возбужденно: — «Ты знаешь, она поет, как снегирь... Какой звон!...»¹

Описанное Г. Семеновым звучание создается трением пальца о кромку вазы, возбуждающим так называемые автоколебания хрусталя. Грубо говоря, палец «тянет» участок поверхности до тех пор, пока силы упругости материала не превысят силы трения между хрусталем

¹ Семенов Г. Уличные фонари//Наш современник. 1975. № 5. С. 4 и 29.

и пальцем. Тогда контакт разрывается и освобожденный материал вазы быстро движется, возвращаясь на место. Множество таких процессов и создает звучание. При механическом нагружении детали или конструкции в них возбуждаются и такие, и многие другие виды упругих колебаний. Потому уже на самых начальных стадиях чисто упругого деформирования металл звучит. Слабо, но звучит!

Но вот кончилась упругая стадия и началась пластическая деформация. Еще с древних времен известен «крик» олова, раздающийся каждый раз, когда этот металл деформируют. «Шумят» при деформировании все металлы, но слабее. Например, низкоуглеродистая сталь испускает звуковые волны при растяжении в широком интервале температур от +200 до -196°C . Звук, издаваемый нержавеющей и другими сталями, зависит от степени деформирования. Особенно интенсивно звучание при начальных стадиях формоизменения. Из поликристаллического цинка деформация «исторгает» не только звуковые частоты, но и неслышимые ультразвуки частотой до одного миллиона колебаний в секунду (герц). При увеличении скорости деформирования интенсивность звучания всех металлов растет.

Практически любой процесс деформации — и растяжение, и усталость, и ползучесть — провоцирует звучание металла, однако это всегда процесс слабый, поэтому для регистрации возникающих волн нужны специальные чувствительные приборы. Большинство материалов «звучит» только при деформировании. Но некоторые «не умолкают» и после прекращения действия нагрузки. С чем же связана эта звуковая активность? Ведь казалось бы, ничего не происходит, а металл «возмущается».

Отсутствие внешних проявлений сложности процесса деформирования металлов не означает, что он прост*. В основе акустического излучения металлов лежит элементарное движение дефектов — дислокаций, двойников и других.

Взрыв высокочастотных колебаний в виде огромного числа импульсов длительностью одна—три миллиардные доли секунды (наносекунды) происходит во всех изученных монокристаллах на самых ранних стадиях пластической деформации. Связана эта волновая эмиссия со скольжением дислокаций, происходящим с до-

вольно высокой скоростью — 20 м/с. Чувствительность наших приборов такова, что можно уловить излучение отдельной дислокации или малого их числа. Но для этого нужно, чтобы длина участка дислокации была не меньше 8 мкм.

Существует несколько вариантов испускания дислокацией акустических сигналов. Линия дислокации, распространяющаяся в кристалле, может застревать в нем, зацепившись за какие-нибудь барьеры, но по мере роста нагружения дислокация отрывается от них. Тогда примерно 1 млн. сегментов, закрепленных между «гвоздями в кристаллической решетке», отрывается одновременно и создает акустический сигнал длительностью в 10—30 мкс. Харьковчанин В. Д. Нацик показал, что звук может издавать и дислокация, прорывающаяся через разнообразные границы в кристалле. Дело в том, что, переходя через барьер, дислокация вынуждена перестраивать свое упругое поле. В результате части этого поля как бы отрываются от дислокации и распространяются в кристалле в виде звукового сигнала. Оказалось, что «изрядно шумит» и дислокация, выходящая на поверхность кристалла. Здесь две причины. Во-первых, при этом дислокация исчезает и энергия ее упругого поля, оставаясь «бесхозной», преобразуется в звук. А во-вторых, выход дислокации на поверхность и высвобождение энергии, вызванное ее гибелью, возбуждает колебания атомов на самой поверхности.

Способны создавать шумы и двойниковые прослойки. Особенно когда они перемещаются вблизи поверхности кристалла. Не являются исключением здесь и другие дефекты кристаллической решетки. Если подытожить сказанное, то процесс пластической деформации, прежде всего деформации на ранних, неустановившихся стадиях, является источником акустического «эха» процесса тем более богатого и разнообразного, чем выше скорость деформирования и больше число механизмов, сопровождающих это явление. Таким образом, каждый акт пластической деформации имеет свое звучание, свои «имя и фамилию», выраженные в числе акустических сигналов и их частоте. В конечном итоге это определяется тем, как тот или иной дефект меняет упругое поле кристалла и насколько быстро. Диапазон частот «звучания» зависит от всего этого и может достигать ультразвуковых областей с частотами в несколько миллионов герц-

Если считать, что дефекты подобны певцам, то самая «талантливая» из них трещина: голос ее, пожалуй, наиболее богат. Дело в том, что голос определяется прежде всего двумя параметрами — диапазоном и тембром. У певцов, например, диапазон голоса колеблется в пределах примерно от 80 до 350 Гц (бас) и от 250 до 1300 Гц (колоратурное сопрано). Что касается тембра, то это результат сложения основных частот голоса (тона) с дополнительными большей частоты колебаниями (обертонами), которые и придают голосу индивидуальную окраску. Недаром В. Солоухин писал: «Сто тысяч звуков, миллион оттенков».

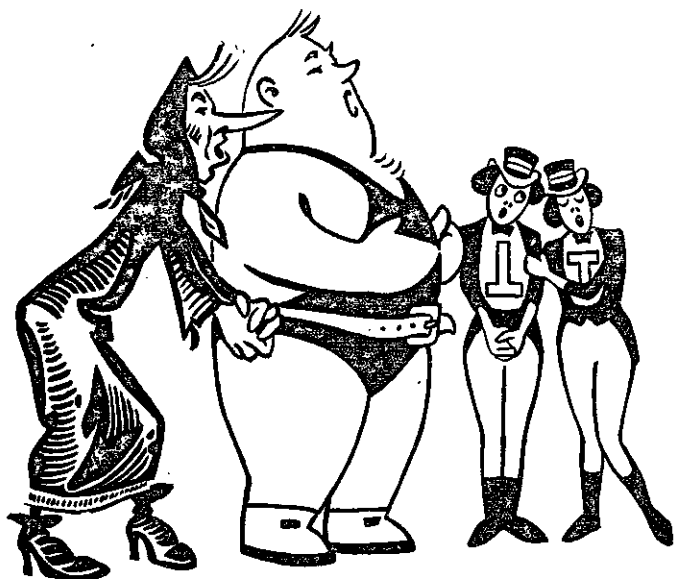
Звуки, лишенные тембра, орнамента, оранжировки, неприятны человеку и не воспринимаются им как музыка. Видимо, всегда мы тяготеем к звуковой гармонии, отражающей все фантастическое разнообразие окружающего мира, его беспредельность — и в пространстве, и во времени, и в нас самих, и в ... частоте.

Среди объектов неживой природы, способных испускать звуковые сигналы, трещина обладает едва ли не самым высоким «голосом». Это связано с тем, что разрушение — процесс, в котором одновременно происходят и упругая, и пластическая деформации; сложное их сочетание сопутствует всем этапам развития явления при зарождении трещины, продвижении и после завершения разрыва. Естественно, что все стадии сопровождаются сложным взаимодействием волновых процессов.

Я думаю, что если бы частоты звуков были пониже, то «пение» трещины можно было бы слушать как подлинную мелодию. Вряд ли это были бы ритмы полонеза М. Огинского, вероятнее всего, нечто современное, в духе поп-музыки. Но все же...

Однако вернемся на землю. Услышать это невозможно, поскольку основной тон звучания трещины лежит в ультразвуковой области. Название этого раздела, таким образом, неточно — трещина «тянет свой мотив» в диапазоне гораздо более высоком, чем колоратурное сопрано.

Поговорим о некоторых типах упругих волн, связанных с разрушением. Прежде всего в большинстве случаев появление трещины предваряется пластической деформацией, а она, как известно, излучает высокочастотные колебания с очень низкой интенсивностью. Эта же составляющая сопровождает и весь последующий рост



трещины, если по берегам ее идет пусть даже совершенно слабое пластическое течение. Но вот появилась первая трещина. Подобно новорожденному, она «заходится» в крике. Поэтому и интенсивность, и частота, и тембр звучания металла моментально изменились:

...И мы должны понять, что это есть значок
Который посылает нам природа,
Вступившая в другое время года...

(Н. Заболоцкий)

Отличие настолько разительно, что акустика в этом случае превращается в первоклассный инструмент определения самых ранних стадий появления трещин. Дело, правда, пока не дошло до определения момента возникновения зародышевой микротрещины в две — пять сто-миллионные доли сантиметра, то есть двух межатомных расстояний, но это вопрос техники. Надо думать, что в ближайшие годы мы вполне сможем его разрешить.

Следующий период докритического подрастания трещины в акустическом отношении процесс довольно вялый — шепот да и только. Он «оживляется» лишь вспяжками звучания в моменты возникновения новых трещин и объединения их. Постепенно подрастая, трещина «рас-

ходится» и с переходом через гриффитсовский размер начинает говорить, да что там — «орать» в полный голос. Она умудряется «вещать» и «пищать» не только в звуковом диапазоне от 3 до 25 кГц, но и захватывает область ультразвука. И хотя основная энергия при этом приходится на волны частотой от 200 до 500 кГц, но полный спектр простирается за частоту 1 МГц. Нет никакого сомнения, что по мере совершенствования методов измерения выяснится: ультразвук — не предел. Видимо, возможности трещины куда больше и достигают они так называемого гиперзвукового диапазона. А это не что иное, как тепловые колебания кристаллической решетки и частоты их от 10^9 до 10^{12} — 10^{13} Гц. И серьезные указания на этот счет имеются уже сейчас. Еще до войны группа немецких акустиков обнаружила на поверхности разрушенных кристаллов круговые борозды. Оказалось, что они возникают из-за распространения по берегам трещины волн Вальнера (названных по имени открывшего их физика). Фронт трещины при взаимодействии с этими волнами отклоняется и образует борозды и ступеньки. А частоты этих волн составляют 10^{10} — 10^{11} Гц. Вот вам и колоратурное сопрано!

Разнообразие исполнительских жанров трещины можно только позавидовать. Если певец «пользуется» только продольными акустическими волнами (воздух-то другие не пропускает!), то трещина, «выступающая» в твердой среде, «поет» и на продольных, и на поперечных. Мало того, она умудряется солировать и на так называемых поверхностных волнах. Правда, соло это очень своеобразное — волны бегут только по поверхности самой трещины. Если она внутренняя, то есть замкнутая, то они «перекатываются» от одной вершины трещины к другой. Так сказать, концерт для собственного удовольствия. Если трещина открыта, то волны эти выбегают на поверхность металла¹. Впервые их наблюдал автор книги, а также И. С. Гузь. Оказалось, частоты волн лежат в пределах до 200 кГц, а максимальная интенсивность соответствует 50—60 кГц.

По отношению ко всем волнам, связанным с разрушением, можно сказать, что их энергия растет при увеличении приложенных напряжений и энергии деформи-

¹ Интересно, что этот класс волн, вероятно, существует и у певцов — тело-то среда сплошная!

рования. Влияет на «шумливость» стали и термическая обработка. Правда, это происходит не прямо, а посредством изменения свойств самого металла.

Но вот настал и последний, финальный момент — трещина пересекла сечение детали и выбежала «сломя голову» наружу. Вот уж, действительно, «сломя голову», потому что она исчезла теперь и вместо одного куска металла мы имеем два. Но вспомним, в каком состоянии находятся две части металла по обе стороны бывшей трещины. Они, естественно, деформированы приложенными силами. После завершения разрушения сопротивление металла исчезло, следовательно, исчезла и внешняя сила. И тогда предоставленный самому себе металл начал восстанавливать свою форму. Если он был изогнут, то распрямляется; если был сжат, растягивается. Здесь и возникают мощные колебания, приводящие к распространению звуковой волны. Поскольку конструкция выступает сейчас в роли разорванной струны, ее частоты умеренны, акустический спектр, сопутствующий разрушению, как правило, сосредоточен на участке звуковых и начальных ультразвуковых частот. Но мощность их велика — ведь в едином ритме содрогается весь кусок освободившегося металла!

Звуки разрушения каждый раз индивидуальность, исключение, свойственное данному процессу разделения твердого тела. Неудивительно: ведь звучание процесса — это картина структурных особенностей и деформирования, и зарождения трещины, и закритического эпизода разделения материала, как бы нарисованная с помощью звука. Поэтому из серьезного анализа спектра звука можно понять, если не все, то многое, произошедшее и происходящее с металлом в процессе его разрушения. Другое дело, что это не просто, и сегодня по акустическому спектру нельзя еще получить полного представления о механических процессах, ибо далеко не все мы знаем и нам удастся услышать эхо далеко не каждого физического процесса. Но это вопрос, безусловно, разрешимый и в ближайшие годы можно ожидать его прояснения. Однако уже сейчас кое-что понятно. Ясно, например: одна ли трещина или сто, уже по интенсивности звучания мы можем это определить. Поэтому «эхо» процесса четко различимо при обычном разрушении, и при ветвлении. Ветвление имеет несколько особенностей. Прежде всего относительно монотонный рост обыкновенной трещины



выглядит во втором случае как скачкообразный, прерываемый эпизодами зарождения ответвленных трещин. Кроме того, из одной трещины при ветвлении возникает настоящая «металка». Вспомните сотни трещин, лавиной расходящихся в закаленном стекле, пересекаемых другими, круговыми.

Все эти различия звуков, издаваемых материалами, как бы проецируются на наши приборы. Анализ данных показывает, что зарождение и разгон трещины до наступления ветвления в закаленной стали сопровождаются испусканием относительно низкочастотных упругих импульсов (40—50 кГц). Необычные акустические сигналы начинают появляться после преодоления трещиной скорости распространения 1900—2200 м/с, то есть с наступлением ветвления. В спектре трещины появляется высокочастотная компонента, состоящая из импульсов длительностью 0,5—2,0 мкс. Каждый из импульсов—визитная карточка самого элементарного процесса разветвления трещины. Ветвление в закаленном стекле происходит, примерно, за такой же промежуток времени — за

1 мкс. В целом, акустический сигнал всего процесса ветвления гораздо мощнее, нежели обычного разрушения, и по нему сразу же можно ясно установить его происхождение. Ибо рост одной трещины — это щебетанье по сравнению с гулом землетрясения при ветвлении.

К слову, нужно сказать, что акустическое отображение разрушения — не единственный процесс, в котором проявляет себя разрыв сплошности. Например, в некоторых кристаллах разрыв сопровождается различными видами свечения в форме импульсов длительностью 1 мкс.

В этих чистых вещах восхищает меня
Сочетанье внезапное звука со светом

(Ш. Бодлер)

При разрушении кристаллов оба берега трещины покрываются разноименными электрическими зарядами — электризуются. Образуется обычный конденсатор. В процессе роста трещины берега раздвигаются, а на языке электротехники это означает рост электрического потенциала. С его повышением происходит пробой промежутка, иначе говоря, возникает разряд, Сопровождаемый электромагнитным излучением и световой вспышкой.

Наряду с этими явлениями вскрывающаяся трещина излучает поток электронов. Да не обычных, а ускоренных напряжением до 15—40 кВ. Взяться этим напряжениям неоткуда. Разве что возникнуть из тех самых зарядов, которые имеются на полостях трещины. И тогда окажется, что заряды эти довольно велики. Они велики и на плоскостях трещины, и в ее вершине.

При росте трещины она способна вызывать излучение электромагнитных импульсов, длящихся микросекунды, повторяющихся через несколько миллисекунд. Отличительная особенность этих явлений в том, что они возникают не только во время роста трещины, но и после его завершения. Это и неудивительно, ведь электрические процессы, лежащие в их основе, продолжают при раздвижении заряженных берегов трещины, все еще «чувствующие» друг друга даже на довольно значительных расстояниях.

Вот, оказывается, какова певица трещина! Она — исполнительница и в звуковом диапазоне, и на языке ультра- и гиперзвука. Но этого ей мало — она- поет и на электромагнитном, и «электронном» диалектах, а еще... на световом жаргоне! Многообещающая исполнительница! Судя по всему, все это для нее не потолок!

ТАКОВА ПРИРОДА ВЕЩЕЙ

...Жаждень узреть и собрать воедино
Все, что известно уму твоему.

Ираклий Абашидзе

Подведем итоги этой главы. Прежде всего нам понятно, что разрушение—процесс неслучайный. Он предопределен самой природой. Возможно, это одно из проявлений второго начала термодинамики, согласно которому всякая физическая система, предоставленная самой себе, рано или поздно распадается.

Если это термический очаг, он потухнет и температуры выровняются. Если это скопление вещества, то со временем оно распылится и равномерно распределится в окружающем пространстве. Если это живое существо, то рано или поздно оно погибнет. Если это металлическая конструкция, она разрушится.

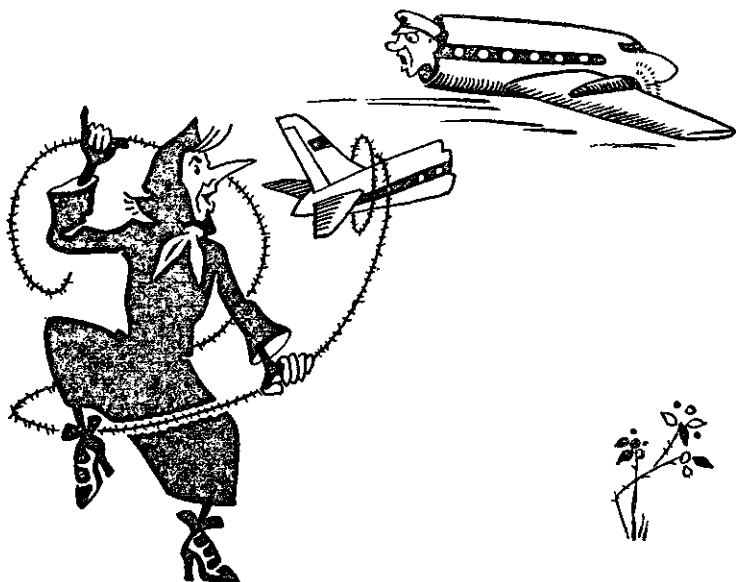
Мы видели, как времени рука
Срывает все, во что рядится время.
Как сносят башню гордую река
и рушит медь тысячелетий бремя.

(В. Шекспир)

Трещина, вероятно, и есть своеобразный инструмент второго начала термодинамики. И действительно, весь наш опыт говорит о преходящем характере прочности и о том, что даже металл, обладающий теоретической прочностью, может быть разрушен внешними усилиями.

Все это, конечно, не означает, что прочности вообще не существует и конструкция развалится тотчас после ее создания. Ведь и живой организм до половины своего бытия успешно сражается со «вторым началом». Поэтому, работая над прочностью, нужно быть оптимистом и понимать, что многое в наших руках. Мы можем отодвинуть любой из механизмов разрушения на более поздний срок. Мы в состоянии затормозить процессы, лежащие в основе разрушения. Поэтому, чтобы уметь с ними бороться, а если понадобится, то и использовать их в наших «корыстных» целях, нам нужно хорошо представлять себе, что же такое разрушение.

Итак, что же такое разрушение? Это смерть материала или конструкции как единого целого, подготовленная прежде всего упругой деформацией, протекающей в условиях статических или динамических нагрузок. В по-



следнем случае она представляет собой распространение в материале упругих волн. Затем это некоторая пластическая деформация, сопровождаемая необратимыми изменениями структур. Осуществляется эта деформация движением дислокаций по кристаллографическим плоскостям. Взаимодействуя друг с другом, дислокации способны образовать микротрещины. С этого и начинается собственно разрушение. Микротрещины могут медленно подрастать. Длительность этого периода иногда исчисляется годами. Это так называемый докритический рост трещины, когда конструкция не потеряла способности сопротивляться внешнему нагружению. Это жизнь со злокачественной опухолью, рост которой почему-то остановился... Но вот барьер перейден — трещина перевалила через критический размер. Поток энергии из напряженного объема хлынул в нее, легко скомпенсировал затраты на пластическую деформацию и стремительно «погнал» трещину вперед. Теперь жизнь металла исчисляется не минутами и даже не секундами. При скорости распространения трещины, измеряемой километрами в секунду, речь идет о милли- и микросекундах. Металл обречен.

Акустический, световой, электромагнитный — вот «языки», на которых вначале монолитный, а затем распадающийся металл-полиглот рассказывает нам о своем состоянии все это время — от упругой деформации до полного разрушения.

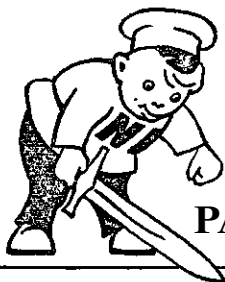
Такова краткая история разрушения. Очень образно «смоделировал» ее на примере погибающего дерева польский писатель А. Минковский:

«...Я увидел, как убивают дерево: с одной стороны топором делают глубокую зарубку, а с другой — пилят вдвоем. Сначала ничего особенного не происходит. Огромная сосна, ни о чем не подозревая, стоит себе спокойно, растопырив игольчатые сучья. Вдруг по ней пробегают озноб. Легчайшая дрожь, вслед за нею тревожный шум ветвей. И спокойствие, нарушаемое только ритмичным повизгиванием пилы. Потом тихий треск лопающихся волокон, шелест кроны: сосна как будто осматривается, испуганная, полная изумления... Треск нарастает, ряд одиночных выстрелов — сосна шатается, напрасно пытается удержать равновесие, в отчаянии трясет пучками игл. Края раны раздвигаются, лесорубы вынимают пилу, отскакивают в сторону. Дерево еще защищается, еще балансирует, как канатоходец, у которого под куполом цирка вдруг закружилась голова. Наконец, сначала медленно, а потом все быстрее, стремительнее хвойная громада с треском рушится, задевая соседние деревья, тяжело ударяется о землю, пружины сучьев ломаются и неподвижно замирают на придавленных кустах. Борьба окончена...»¹

¹ Минковский А. Дороги воспоминаний. — М.: Молодая гвардия, 1967. С. 36.

Как маятник остановив рукою,
Цвет времени от времени спасти?

В. Шекспир



2

РАЗРУШЕНИЕ - ВРАГ



ВОЗМОЖЕН ЛИ ПРОГНОЗ

...Однако эта неопределенность ничуть не омрачила **его радостного настроения.**

Мэлвин Брэгг

9 марта 1934 года мощная балка, предназначавшаяся для термодинамической лаборатории Льежского университета, самопроизвольно раскололась по всей своей 12-метровой длине¹.

2 декабря 1942 года в обшивке цельносварного танкера, находившегося еще на стапелях, без влияния какой-либо внешней нагрузки образовалась трещина длиной 13 метров. Танкер «Скенектеди» водоизмещением 7230 тонн попросту разломился пополам в спокойной воде.

В 1973 году обрушился мост с пролетом 336 метров через реку Огайо у города Уиллинг. Вот свидетельство очевидца: «В течение нескольких минут мы следили с тревогой за колебаниями, подобными качке корабля в шторм. Один раз мост поднялся почти на высоту пилонов и затем опустился: при этом вдоль всего пролета произошло скручивание, и одна половина проезжей части почти перевернулась. Затем огромная конструкция с головокружительной высоты устремилась в реку с ужасным треском и грохотом»².

Совсем недавно, в 1976 году, на глазах многих в центре Вены над Дунаем возник огромный столб пыли, земля задрожала и важнейшая транспортная артерия австрийской столицы, связывающая ее с пригородами — мост Рейхсбрюкке — рухнул в воду. К счастью, катастрофа произошла ранним воскресным утром, когда на мосту почти не было машин и пешеходов (в часы «пик» по Рейхсбрюкке проходило до 18 тысяч машин в час). Однако без жертв все-таки не обошлось. Обломки моста блокировали Дунай, из-за чего в районе Вены скопились сотни грузовых судов и барж³.

Печальной особенностью многих разрушений являются их труднопредсказуемые последствия, что кстати

¹ Остаточные напряжения./Под ред. В. Р. Осгуда. М.: ИЛ, 1957, С. 9, 54.

² Пановко #, Г., Губанова И. И. Устойчивость и колебания упругих систем. — М.: Наука, 1967. С. 349.

³ Мост рухнул от «усталости»?//За рубежом. 1976. № 33. С. 20.

и следует из буквального смысла греческого слова «катастрофа» — переворот, внезапное бедствие, влекущее за собой тяжелые последствия.

Разнообразие видов разрушения трудно себе представить. На морских судах, например, сталкиваются с кавитацией. Это явление связано с возникновением в жидкости разрывов сплошности в виде крохотных пузырьков. Появляющиеся при этом упругие импульсы вырывают из винта корабля частицы металла и быстро разрушают его.

Я привел лишь несколько примеров аварий. Может сложиться впечатление, что их причины необъяснимы. Но это неверно. Тысячи и тысячи разнообразных катастроф, крушений и аварий известны человечеству в прошлом и, к сожалению, случаются в настоящем. Однако в подавляющем большинстве случаев наука обстоятельно проанализировала их природу. Это, правда, не может исправить произошедшее, но служит хорошим уроком на будущее. И, конечно же, каждая конкретная катастрофа, будь то падение моста, разрушение самолета или взрыв цистерны, имеет свои собственные корни. Именно о физических процессах, ведущих к появлению трещины при различных условиях эксплуатации, и пойдет речь ниже.

ПЕНЬ У ДОРОГИ

Печален мой удел.

Каким я хрупким счастьем овладел!

В. Шекспир

«Темной южной ночью на палубе французского научного судна «Жан Шарко», проводившего исследовательский рейс в районе Азорских островов, неожиданно раздался грохот. Встревоженные моряки и ученые, выпавшие на освещенную прожекторами палубу, обнаружили, что взрываются глыбы обсидиана, накануне поднятые драгой с глубины около трех километров. Камни высоко подпрыгивали на палубе, с глухим звуком рассыпались в воздухе и дождем осколков падали на палубу.

Утром, когда улеглось волнение, вызванное ночным переполохом, геологи объяснили странное поведение камней. Видимо, в обследованном районе не так давно

(по геологическим масштабам, конечно) произошло извержение вулкана. Излившаяся магма застыла, испытывая огромное давление воды. Образовавшаяся при этом порода, как пружина, хранила в себе сильное внутреннее напряжение»¹.

При производстве разнообразных металлических конструкций сварка — один из ведущих технологических процессов, позволяющих образовать монолит из одинаковых или различных металлов и сплавов или изготовить пространственно сложное изделие, не воспроизводимое другими методами. Ценный это метод, жизнью оправданный и имеющий большое будущее. Но он не лишен недостатков. Об одном из них мне хочется рассказать.

Дело в том, что сварка сопровождается серьезным повышением температуры в небольшом объеме, в то время как остальная часть детали остается холодной. Такой температурный перепад часто вызывает появление в изделии больших внутренних напряжений. Иногда они настолько значительны, что способны сами по себе разрушить конструкцию. Чаще их величина хоть и «весома», но недостаточна для самопроизвольного разрыва. Однако в процессе эксплуатации внутренние напряжения суммируются с внешними и ведут к внезапным катастрофам.

В одной из своих книг сатирик Ф. Кривин пишет:

«Пень стоял у самой дороги, и пешеходы часто спотыкались об него.

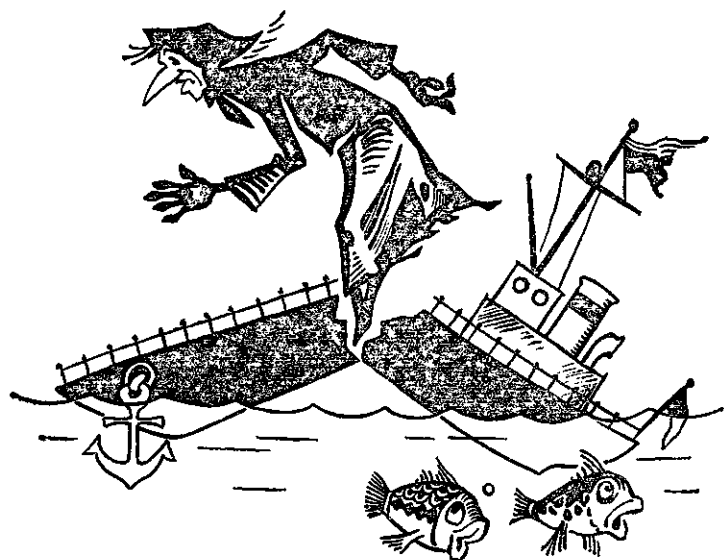
— Не все сразу, не все сразу, — недовольно скрипел пень. — Приму сколько успею: не могу же я разорваться на части! Ну и народ, ни шагу без меня ступить не могут!»²

Роль такого пня у широкой магистральной дороги сварочного производства и прочности играют внутренние напряжения. Вот некоторые примеры³. Из 52 сварных мостов, построенных в Бельгии в 1934—1938 гг., почти одна пятая их часть к 1940 году была выведена из строя вследствие серьезным дефектов. Так, в марте 1938 года разрушился мост через канал Альберта возле

¹ Взрывы в океане//Наука и жизнь. 1971. № 3. С. 38.

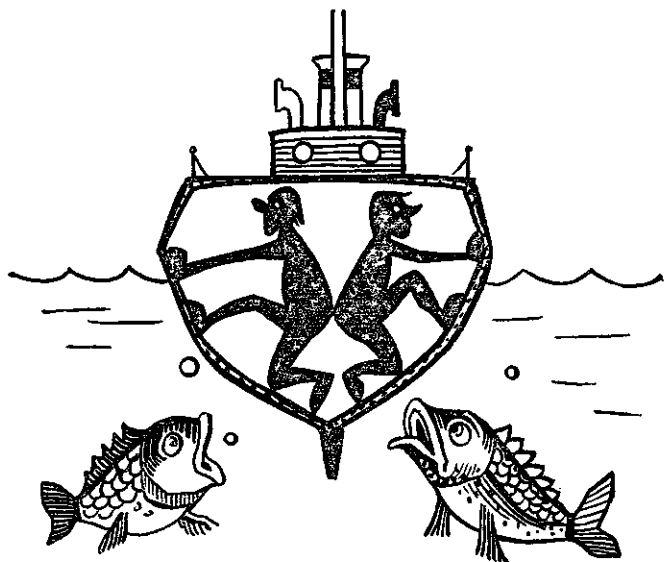
² Кривин Ф. В стране вещей. — М.: Советский писатель, 1961. С. 18.

³ Гипченко М. И. Хрупкое разрушение сварных соединений и конструкций. — Москва — Киев: Машгиз, 1963. С. 8.



Хассельта с пролетом 73,5 м, а в январе 1940 года — сразу два моста через тот же канал с пролетами 61 и 48,8 м. Между 1940 и 1950 годами в Бельгии зарегистрировано 14 случаев хрупкого разрушения элементов мостов. В декабре 1951 года в Чехословакии обрушился временный железнодорожный мост с пролетами 12 м. Одна из наиболее заметных аварий — разрушение автодорожного моста в Квебеке (Канада), случившееся 31 января 1951 года при сильном морозе. Мост обрушился, когда по нему проезжала всего одна машина. И этого оказалось достаточным, чтобы все три пролета длиной 54 метра каждый упали в реку.

Соединенные Штаты Америки построили во время второй мировой войны примерно 5000 торговых кораблей. К апрелю 1946 года более чем в пятой их части обнаружили трещины. С ноября 1942 по декабрь 1952 года образовались трещины более чем на 200 судах. Десять танкеров три грузовых судна типа «Либерти» разломались пополам. На 25 других судах трещины разрушили палубу или днище. Например, в марте 1943 года на небольшой зыби переломился танкер «Эссо Манхеттен» водоизмещением 10344 т. Напряжения в его корпусе были ничтожны. Танкер «Закетс Харбор» ока-



зался перерезанным трещиной сразу же после постройки, прямо на верфи.

Казалось бы, приведенных примеров достаточно, чтобы понять, сколь опасны внутренние напряжения и «спровоцированная» ими трещина? Да, конечно, случаев много и стоимость описанных аварий исчисляется миллионами рублей.

Попробуем объяснить, откуда у термических напряжений такая чудовищная сила?

Начнем с того, что удивляться этому не следует. Ведь ни для кого из читателей не секрет, что толстостенный стакан лопнет, если его быстро наполнить кипятком. Ясно, что в этом случае мгновенно расширяющиеся слои внутренней поверхности стакана вступают в конфликт с не успевшими прогреться холодными внешними слоями. Последние оказываются растянутыми и, если тепло внутри стакана не поглотить металлической ложечкой, погрузив ее в кипяток, произойдет разрыв. Трещина, возникшая на поверхности стакана, «опояшет» его, двигаясь вначале по образующей, затем по днищу, и завершит «разгром» по второй образующей¹. Иногда

¹ *Васильев В.* Почему лопнул остывший стакан с чаем?//Наука и жизнь. 1974. № 11. С. 117.

тонкие стаканы лопаются от кипятка, если их поставить в подстаканник, слишком плотно охватывающий стакан: подстаканник не дает стакану расширяться и чем тоньше стенки стакана, тем легче они разрушаются. Стакан может лопнуть и через длительное время после того, как в него был налит горячий чай. Это бывает, если он конической формы или плотно вошел в подстаканник под действием, скажем, вибрации железнодорожного вагона во время движения. При охлаждении чая металлический подстаканник, сжимаясь быстрее стекла, раздавливает стакан.

Описанное явление есть проявление того, что физики называют внутренними напряжениями первого рода. Говорят, что напряжения эти уравниваются в объеме всего изделия и вызывают его деформирование и разрушение как единого целого.

С подобными внутренними напряжениями термического происхождения мы встречаемся часто и довольно неожиданно. Зимой в сильные морозы в лесу раздаются звуки гулкие, точно выстрелы. Чаще всего они вызваны быстрым разрушением дуба, причем на поверхности коры образуются трещины — морозобоины. Акустически это проявляется в достаточно мощном «выстреле», подобном тому, который мы слышим при изломе почти любого хрупкого тела.

Это и естественно, ведь причина явления заключается в термических напряжениях, вызванных перепадом температур — низкой на поверхности дерева и более высокой в его сердцевине. Разрушение стволов в мороз — явление достаточно общее, и от него страдают деревья многих пород.

Поэт С. Островой подметил интересное явление — еще один вид поражения ствола в результате термических напряжений:

Такой был холод адский,
Что все сучки подряд
выскакивали с треском,
Как пушечный заряд.

Вспомним примеры со стаканом и металлическим подстаканником: роль первого может играть сучок, а второго — сердцевина древесного ствола.

Особенность этих случаев в появлении термических напряжений непосредственно после приложения термического воздействия. Между тем внутренние напряже-

ния, во-первых, могут быть не связаны с температурой, а во-вторых, безотносительно к причине, их создавшей, могут неограниченно долго сохраняться в изделии и детали. В последнем случае их называют остаточными или внутренними напряжениями. Простым примером являются напряжения, искусственно создаваемые в рояле, скрипке, виолончели или гитаре при их настройке, заключающейся, в частности, в натягивании струн. В результате струны оказываются растянутыми, а корпус инструмента — сжатым. Доказательством этого является разрыв струн при особенно темпераментном исполнении. Известны случаи разрушения даже рамы рояля, сжатой натяжением многих струн с силой в несколько тонн.

Не случайны строки Л. Мартынова:

Я чуток,
Напряжен я,
Как рояль...

Отличительной особенностью таких напряжений является, однако, их обычная сбалансированность. Деформируя части упруго напряженной конструкции, остаточные напряжения компенсируются прочностью изделия. В результате вся система, состоящая из двух противоположающихся сил — внутренних остаточных напряжений и силы сопротивления, как бы застывает во временном равновесии. Выходов из этого состояния несколько. Простейший из них «мирный» — постепенное уменьшение напряжений за счет повышения температуры или длительного вылеживания, называется он релаксацией. У струнных инструментов она проявляется в нежелательном, но постоянно действующем удлинении струн (говорят: инструмент расстраивается). Есть и другой способ — «аварийный», при котором либо за счет понижения прочности конструкции со временем, либо под действием внешних нагружающих усилий, либо по обоим этим причинам одновременно равновесие напряженной системы теряется и происходит ее разрушение с выделением аккумулированной упругой энергии. Вот как это выглядит в случае так называемом батавских слезок. Капельки жидкого стекла падают в сосуд с водой. В процессе полета они приобретают грушевидную форму с искривленным тонким хвостиком, как у головастика. Эта стеклянная «запятая» быстро застывает снаружи, оставаясь жидкой внутри. В результате создаются боль-

шие $\text{vнУ}^{\text{т}}\text{Р}^{\text{с*}}$ шие напряжения. В сердцевине «слезки» они имеют ^{ют} сжимающий характер, а в поверхностных слоях — растягивающий. Удивительная прочность «батовских слезок», способность выдерживать удары молотком по утолщенной части, обусловлена как раз сжимающими напряжениями, препятствующими зарождению микротрещин. Но не следует забывать, что корни этой высокой прочности проистекают из внутренних напряжений, уравновешенных и «запертых» в объеме всей «запятой» и, чтобы нарушить эту прочность, достаточно отбить крохотный кусочек хвоста «головастика». Мощные напряжения сжатия, теперь уже не сдерживаемые прочным ремнем растянутого поверхностного слоя, взрывают стекло, превращая прозрачную и красивую «батовскую слезку» в разлетающееся облако мелких стеклянных зернышек.

Подобные процессы нередки и в металлических конструкциях. Так, в феврале 1943 года вблизи Нью-Йорка разрушился сварной сферический резервуар для хранения водорода. Его диаметр превышал 11 м, а толщина стенки 16 мм. Газгольдер, рассчитанный на рабочее давление 5 МПа, не выдержал... 0,35 МПа. Перед аварией температура окружающего воздуха понизилась до -12°C , а затем с одной стороны, сосуд нагрелся на солнце. Этого оказалось достаточным, чтобы разрушение, сопровождаемое взрывом, привело к распаду оболочки на 20 кусков. На нефтеперерабатывающих заводах США за 35 лет (с 1918 по 1953 год) разрушилось 32 резервуара, причем убытки составили полмиллиона долларов.

Чаще всего аварии происходили главным образом из-за низкого качества сварки и высоких термических напряжений в конструкциях. Трещины возникали либо в основном металле вблизи мест скопления сварных швов, либо в стыковых швах, имеющих непровары. В большинстве случаев в результате аварий металл разлетался иногда на расстояние до 40 м. Справедливости ради нужно сказать, что помимо внутренних напряжений, здесь действовали и другие причины: прежде всего плохое качество основного металла и дефекты в самом сварном шве, которые сыграли роль зародышевых трещин. Немаловажным оказалось и охрупчивание металла в связи с понижением окружающей температуры. Об этом явлении речь пойдет в другом разделе.

ХОЛОДА, ХОЛОДА

У природы всегда в запасе какой-нибудь козырь.

Артур Кларк

Гигантские пространства, ранее совершенно пустынные и необитаемые, заселяет человек: Крайний Север и Сибирь в нашей стране, Аляску в США, северные районы Канады, Гренландию, Антарктиду... Многие препятствия встречают покорители этих районов. Одно из них имеет прямое отношение к материалам. Вот бы что произошло, если бы основной конструкционный материал машиностроения — сталь — захворал.

Гигантский состав из сотен вагонов, идущий со скоростью в 70—100 км/ч, рухнул под откос. Причина проста — лопнул рельс. Огромная мостовая ферма через широкую реку внезапно обрушилась вниз вместе с электровозом. Тяжелые грузовики и автопоезда останавливаются из-за массовой поломки деталей. Железобетонные перекрытия цехов длиной в сотни метров падают, казалось, бы без всякого влияния извне. Портальные краны и самосвалы, трубы нефте- и газопроводов, драги для добычи золота и алмазов лопаются как спички. Мощные экскаваторы, в том числе и шагающие, разнообразных грузоподъемных механизмов рушатся, как будто они фарфоровые.

Быть может автор, драматизируя, искусственно раскрасил, а возможно и пропросто придумал эти события? Оказывается нет, может быть даже преуменьшил, затушевал.

Судите сами. Спусковым рычагом, проводящим к разрушению сталей, является понижение температуры. В этом отношении подавляющее большинство сталей подобно нездоровым людям — при малейшем переохлаждении они «заболевают». Для иных, например низкоуглеродистых, «воспаление легких», то есть разрушение, наступает при $(-60) + (-70)^\circ\text{C}$, для других, высокоуглеродистых — уже при комнатных температурах. И совсем хрупок в любых условиях чугун. Между тем климат в некоторых районах нашей страны весьма суров. Отрицательная температура в Норильске, Якутске и на Магадане держится свыше 8 месяцев в году. Минимальная температура, зарегистрированная в Норильске, -57 , а в Магаданской области — 65 , в Устье-Нере

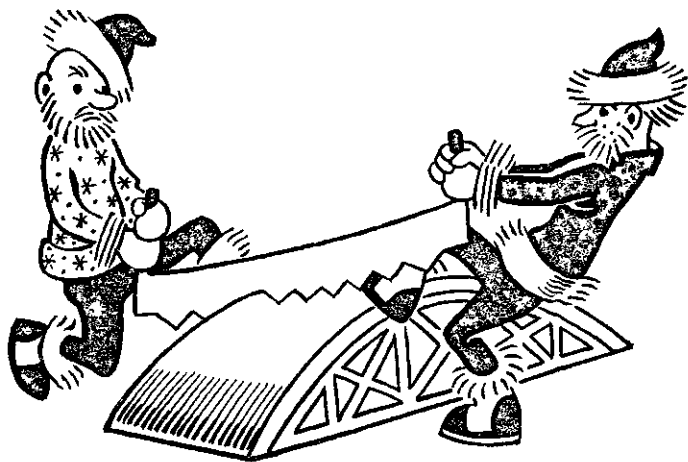


(Якутия) -72°C . В северо-восточных и северных областях среднегодовая температура находится в пределах $(-4) \div (-17)$, а в декабре, январе (-20) -* $(-50)^{\circ}\text{C}$.

При таких условиях металл, не защищенный от морозов и шквальных ветров, подвергается большой опасности¹.

Справедливости ради нужно сказать, что хладноломкость — не всегда следствие природных условий. Чаше она результат технологических процессов, нуждающихся в низких температурах, протекающих, например, в установках, получающих жидкий воздух (-180°C), кислород (-183°C), гелий (-268°C), водород (-253°C), азот ($-195,7^{\circ}\text{C}$), а также в разнообразных холодильных агрегатах. С крайне низкими гелиевыми температурами и особыми свойствами металлов мы вынуждены встречаться в технике получения сверхмощных магнитных полей, основанной на использовании сверхпроводников.

¹ Григорьев Р. С., Ларионов В. И., Новиков Г. А., Яковлев Н. Г. Хладостойкость сталей при статическом и циклическом нагружении. — М.: Наука, 1969. С. 5.



Наконец, все космические полеты протекают в условиях температур, близких к абсолютному нулю. У В. Э. Мейерхольда была забавная присказка: «Кто с коня не падал, кто бабушке не внук, под кем санки не подламывались? — неродившиеся души!» Верно. Но как быть нам? Ведь цена, которую мы платим за хладноломкость, невероятно велика. Иногда из-за этого конструкции на стройках Сибири и Севера месяцами не работают. Наконец, разрушение всегда опасно.

В чем же причина удивительного и коварного явления — охрупчивания металла при низких температурах?

Существуют два ответа. Убедительный — металлурга и металловеда и неубедительный — физика.

Хорошо известно, что хладноломкости подвержены стали с объемноцентрированной кубической решеткой. А большинство сталей с гранецентрированной решеткой, то есть аустенитных, не боится понижения температур. И вообще металлы, а не только стали с атомами, выстроенными по гранецентрированному кубу, почти никогда не ломаются из-за охлаждения, например медь и алюминий. Однако подавляющее большинство металлоконструкций изготовлено из обычных сталей с объемноцентрированной решеткой, потому что они относительно дешевы и беззащитны перед «простудными заболеваниями».

Но сами эти стали подразделяют на две группы: кипящие и спокойные. В процессе изготовления стали воз-

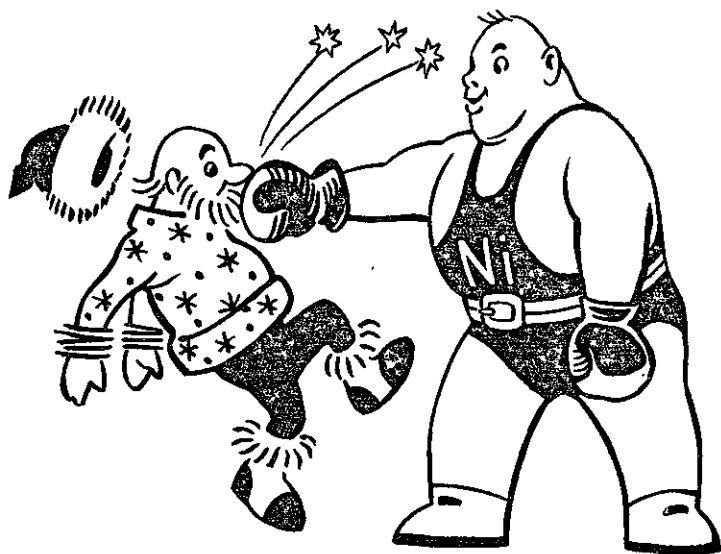
никает вопрос: как быть с растворенным в ней кислородом? Удалять насильственно или предоставить ему возможность выделяться самому? Первое достигается технологической операцией, называемой раскислением. Она заключается в том, что в ковш с жидким металлом вводят марганец, кремний и алюминий, связывающие кислород и переводящие его в соединения, нерастворимые в металле. При последующем застывании такая сталь «спокойна», не бурлит, так как из нее уже не выделяются газы. Что касается кипящей стали, то она раскисляется не полностью и при застывании в изложнице «кипит»: из нее выделяются пузырьки окиси углерода. Выход газов искусственно предотвращают, и окись углерода в виде рассеянных газовых пузырей и раковин остается в металле. При прокатке эти дефекты завариваются. Однако, как показывает практика, «кипящая» сталь более подвержена охрупчиванию, чем «спокойная», и детали, изготовленные из нее хотя и дешевле, но зато и легче разрушаются в зимнее время.

Довольно определенные ответы дают металлурги и на вопрос о влиянии состава стали на поведение ее в морозы. Углерод вызывает охрупчивание, марганец, наоборот, повышает хладостойкость. Благоприятно действие такого раскислителя, как кремний. Очевидным злом, влекущим за собой понижение сопротивляемости стали хрупкому разрушению, являются азот, сера фосфор, водород, кислород.

Издавна известны легирующие элементы, снабжающие сталь надежным щитом от меча хладноломкости. Это в первую очередь никель, молибден, цирконий, титан. Могут быть полезны добавки небольших количеств ванадия, хрома, меди, алюминия. Существуют и так называемые модификаторы — малые добавки, вводимые в сталь. В первую очередь к ним относятся редкоземельные элементы.

Итак, с точки зрения металлурга¹ проблема хладноломкости решена и сводится к следующему. Если температура окружающего воздуха не ниже +20 °С, можно использовать углеродистые кипящие стали при ударных нагрузках. В условиях статического нагружения те же стали способны работать при температурах до (-20)4-

¹ Попов К. В., Савицкий В. Г. Низкотемпературная хрупкость стали и деталей машин. — М.: Машиностроение, 1969. С. 4—12. •



и $(-30)^\circ\text{C}$. Полуспокойные и спокойные углеродистые стали проявляют «терпимость» до $(-30) \text{ и } (-50)^\circ\text{C}$. Но при дальнейшем усилении морозов без легирования не обойтись. Так, стали, содержащие 3,5 % никеля, работоспособны от -70 до -120°C . А углеродистые стали, содержащие 8,5—9 % никеля, даже до -200°C . Что касается более низких температур, то для них нужны уже аустенитные стали, способные противостоять морозам до -253°C , не разрушаясь. Суммируется это коротко. Для эксплуатации металлоконструкций в климатических районах с низкими температурами нужны стали «в северном исполнении», то есть высоколегированные. И хотя они очень дороги, все же вездеход для антарктических условий, сделанный из легированной стали, подвергнутой соответствующей термической обработке, будет гарантирован от внезапных разрушений при любых морозах.

Но достаточно ли этого? Можно ли считать, что тысячелетний опыт прошлого, непоправимые ошибки и невосполнимые потери научили человека бороться с такими разрушениями? Очевидно, еще не вполне. Потому что нужны точные знания.

Не случайно вкладывает в уста Бориса Годунова великий поэт:

Учись, мой сын: наука сокращает
Нам опыты быстро текущей жизни.

Но до глубокого осмысления природы явления хладноломкости, к сожалению, еще далеко. И если бы мне пришлось дать названия всему тому, что знают физики о хладноломкости, я, пожалуй, вместо слова «мнения» употребил бы «сомнения».



Вот, например, одна из точек зрения. Металл способен разрушаться двумя путями: хрупким и вязким. При хрупком осуществляется как бы прямой разрыв межатомных связей. При вязком вначале происходит пластическое течение и лишь затем разрушение. Жизненный опыт будто подтверждает сказанное. Когда вы ударом молотка разбиваете стекло или когда в ваших руках ломается и крошится грифель, глаз не отмечает существования какой-то деформации — вы увидите просто разрушение и все. Но попробуйте разорвать полихлорвиниловую ленту, сломать медную или алюминиевую проволоку. Вы видите и ощущаете большую деформацию еще до наступления собственно разрушения. Причем эта деформация служит буфером, гасящим внешнее усилие, съедающим его энергию еще до разрыва межатомных связей.

Известно мнение, что в этой пластической деформации — ключ к пониманию явления хладноломкости. В отличие от межатомных сил связи, практически не меняющихся в интервале $(+50) \text{ч} - (-50) \text{ } ^\circ\text{C}$, величина пластической деформации крайне чувствительна к температуре у металлов, склонных к хладноломкости. При этом с понижением температуры она ослабевает, что уменьшает ее амортизирующее влияние. В результате внешнее усилие передается непосредственно на устье трещины, где и затрачивается на разрыв межатомных связей.

В действительности, однако, все гораздо сложнее. Деформация напоминает двуликого Януса. Она не только поглощает энергию нагружения, но и сама зарождает микроскопические трещины, способные подрастать еще во время деформирования.

Согласно другим точкам зрения хрупкость стали при низких температурах обусловлена изменением межатомных сил связи, уровень которых падает. Некоторые авторы приписывают хладноломкость особым процессам упорядочения, при которых вращение электронов вокруг своей оси (так называемый спин) происходит преимущественно в определенных направлениях. Некоторые ученые считают, что хладноломкость означает появление какого-то нового полиморфного превращения, то есть перехода кристаллической решетки металла из одной формы в другую... Однако все это лишь гипотезы. Правильны они или неправильны — проверит будущее.

НЕПРИЯТНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

Ломаются зловеще в доме вещи,
как будто их толкнул
капризный невидимка-разрушитель...

П. Неруда

«— Немедленно прекратите стрельбу! — скомандовал военпред и резко склонился над орудием. Даже невооруженным глазом артиллерист заметил на стволе извилистую трещину... Все пять пушек после первых же выстрелов дали ствольные повреждения» К Причина брака скорее всего была в неправильно проведенной термической обработке орудийных стволов.

Ранее мы говорили о вредном влиянии остаточных напряжений. Между тем они действуют на материал не «откровенно» и прямолинейно, но многими, часто завуалированными путями: например, в детали возникает одна или несколько трещин, ослабляющих конструкцию и способных расти под влиянием всех тех же остаточных напряжений. С опосредствованным участием остаточных напряжений в разрушении мы сталкиваемся довольно часто.

В связи с этим обратимся к термической обработке стали — технологическому процессу, применяемому при изготовлении почти любой ответственной детали механизмов и машин.

В основе большинства видов этого воздействия на сталь лежит структурное превращение аустенита в мартенсит. Аустенит представляет собой плотноупакованную систему атомов, расположенных в форме куба, в вершинах и центрах граней которого находятся атомы железа. В отличие от этого, в более твердом и хрупком мартенсите атомы, занимающие вершины и центр куба, менее уплотнены. В итоге объем, приходящийся на единицу массы в аустените, меньше, чем в мартенсите. Этот факт позволяет понять причины, приводящие к возникновению мощных напряжений при охлаждении стали с высоких температур, при которых она находится в виде аустенита, до низких, когда при достаточно быстром охлаждении она получает мартенситную структуру. Превращение аустенита в мартенсит идет неоднородно и неодновременно по сечению детали. Схематически процесс этот

¹ Подкупник Г. В тылу все спокойно//Урал. 1974. № 8. С. 173.

представляется таким образом *К* Наружные слои изделия приобретают мартенситное строение раньше внутренних, и металл на какой-то промежуток времени становится как бы двухслойным: снаружи мартенсит, внутри аустенит. Когда позднее по мере охлаждения внутренних слоев аустенит в них начнет превращаться в мартенсит и объем недр детали начнет расти, наружные слои мартенсита будут этому препятствовать. В итоге, наружные слои окажутся растянутыми, а внутренние — сжатыми. Это и есть внутренние напряжения. Таким образом, после термической обработки мы получили высокую твердость металла, но использовать ее затруднительно из-за огромной напряженности изделия, и, следовательно, возможного в любой момент разрушения.

Подобные же процессы, но в ином масштабе могут протекать при неоднородном распределении химических элементов по сечению изделия. Например, в условиях так называемой химико-термической обработки, заключающейся в насыщении поверхности металла каким-нибудь другим элементом. При этом в области высоких температур формируется аустенит иного химического состава, с иными скоростями и особенностями превращения в мартенсит.

На эти явления налагаются и внутренние напряжения, имеющие собственно термическое происхождение и образующиеся из-за неодинакового расширения и сжатия различных структурных составляющих при охлаждении и нагревании обрабатываемой детали.

Так или иначе, но термическая обработка стали генерирует довольно мощные напряжения, имеющие зачастую пространственный характер и приводящие к появлению в металле разнообразных трещин. Иногда это одинокие и глубокие трещины в изделиях сложной конфигурации, например во фрезах: иногда внутренние дугообразные разрывы, встречающиеся например, в цементированных сталях, то есть сталях, поверхность которых насыщена углеродом. Встречаются и другие виды разрушений — в форме, скажем, множества мельчайших трещин, покрывающих всю поверхность детали.

Чего уж хорошего, если в ответственной детали сто трещин. Ведь мы знаем: достаточно даже одной! Потому, что невозможно предсказать, как такая деталь по-

¹ *Малинкина Е. И.* Образование трещин при термической обработке стальных деталей. — М.: Машиностроение, 1965. С. 13—17.

ведет себя в напряженном рабочем состоянии. Поскольку дальновиднее предусмотреть худшее, можно ожидать разрушения за счет роста какой-то одной трещины, оказавшейся в наиболее «выгодном» положении. И тогда окажется справедливой печальная шутка, согласно которой у жертвы было обнаружено четыре раны: две из них смертельные, а две другие, к счастью, нет. Одним словом, трещины, возникающие при термической обработке, вредны и опасны.

Но, кроме того, существует ряд побочных причин, увеличивающих тревогу за обработанную деталь. Например, может оказаться, что величина приводящих к разрушению напряжений (создаваемых внешним или внутренним усилием) зависит от времени и убывает с его течением. В результате при длительном воздействии нагрузки прочность стали снижается в несколько раз. В некоторых сталях, в частности быстрорежущих, появление поверхностных трещин провоцируется так называемым обезуглероженным слоем, то есть поверхностной пленкой металла, из которой по тем или иным причинам «ушел» углерод. Стали, подвергаемые термической обработке, очень чувствительны к любым концентраторам напряжений (различным надразам) на их поверхности и внутри материала. Это и понятно. Такой концентратор создает свое упругое (силовое) поле, суммирующееся с остаточными напряжениями и ведущее к преждевременному разрушению. Не последнюю роль играют и разнообразные избыточные фазы в стали, особенно расположенные по границам зерен. Часто они играют решающую роль в образовании трещин после закалки. Словом, серьезных причин много. Но бывают и несерьезные, приводящие тем не менее к серьезным последствиям.

Термическая обработка, в частности закалка стали, повышает ее механические свойства и поэтому совершенно необходима машиностроению. Но вместе с тем она вводит в металл трещины, смертельно опасные для конструкции. К счастью, есть многочисленные методы, позволяющие исключить появление трещин и сохранить тем самым преимущества, которые дает термическая обработка металла. Методы эти не всегда просты, но...

Одна закона грубая скрижаль
равна для человека и металла:
нужна борьба, чтоб сталью стала сталь...

(Я. Белинский)

Вы, вероятно, помните, что так называемые внутренние напряжения и есть ложка дегтя, которая портит бочку меда при термической обработке стали. Именно они и ведут к появлению трещин. Следовательно, первейшей задачей является гашение напряженного состояния детали. Сделать это можно несколькими путями. Вот один из них. Помимо структурных напряжений, возникают и другие — термические. Они появляются при более высоких температурах, когда металл еще очень пластичен, а фазовые переходы еще не начались. Очевидно, при достаточно высокой скорости охлаждения эти напряжения могут привести к пластической деформации детали и разрядиться, то есть стать не опасными.

Со структурными остаточными напряжениями, как правило, дело обстоит наоборот — быстрое охлаждение при довольно низких температурах вызывает лишь многие трещины. Поэтому целесообразно при температурах ниже начала перехода аустенита в мартенсит вести охлаждение бережно и очень медленно. Такое «нежное» обращение со сталью осуществляют зачастую, закаливая ее не в воде, а в масле, где она «остывает» с меньшей скоростью. Ясно, что во всех случаях внутренние напряжения будут определяться той исходной температурой, с которой начинается закалка. Поэтому рекомендуется эту температуру выбирать максимально низкой.

Надежным методом снятия внутренних напряжений является отпуск, то есть повторный нагрев после закалки, во время которого металл и его структурные компоненты несколько лучше приспособляются друг к другу. Что-то вроде встряхивания пассажиров в переполненном троллейбусе: все кое-как разместились, «притерлись» и едут в тесноте, да не в обиде.

На языке термической обработки это означает, что термическое «встряхивание» структурных элементов ведет к снятию внутренних напряжений.

Когда-то Александр Грин сказал, что действительность большей частью завязывает и развязывает узлы в длительном темпе. Закалка не такова — за ничтожные секунды проходит фазовый переход, возникают мощные остаточные напряжения, трещины и следует неизбежное разрушение. Поэтому важно не затягивать с проведением отпуска, помня, что с течением времени прочность напряженной детали падает. Поэтому отпуск и осуществляют немедленно после закалки.

МЕТАЛЛ УСТАЛ...

Что замок, что харчевня — все тщета,
И все растопчет времени пята,
Под этой ногой не устоит
Ни зданье, ни железо, ни гранит.

Ш. Петефи

Человек устает, и это нас не удивляет. Силы металла тоже ограничены. Но если человек может устать при выполнении любой работы, то «усталость» металла — это его реакция на вполне определенный вид нагружения — многократно повторяющееся приложение нагрузки одного и того же или противоположных знаков. Как же проявляется усталость в неживом материале? Вначале он пластически деформируется, а затем разрушается. Но ведь то же самое происходит при обычном нагружении?

Как будто и события те же и составляющие его элементы — пластическая деформация, микротрещины, разрушение — почти такие же. Однако явление это серьезно отличается от разрушения, вызванного действием однократно приложенной нагрузки. Попробуем, читатель, хотя бы поверхностно разобраться в этом вопросе.

Прежде всего металлы окружающего нас мира испытывают постоянные воздействия пульсирующих нагрузок. Железный каркас здания принимает на себя непрерывную микроскопическую вибрацию почвы — ведь по земле, никогда не прекращаясь, струится поток слабых упругих волн. Это результат сейсмической активности нашей планеты. Корпус цеха с металлообрабатывающими станками также все время находится в состоянии вибрации. Станина станка из-за контакта резца с деталью дрожит. Вибрируют двигатели, корпуса самолетов, машины. Ясно, что эти колебания должны влиять на состояние металла. Вот только как? Иной раз трагически — самолеты разваливаются в воздухе. Рельсы, многократно прогибающиеся под тяжестью железнодорожных составов, лопаются. Оси, несущие мощные маховики и колеса, под действием рабочей нагрузки и несбалансированной центробежной силы изгибаются поочередно в различных направлениях и ломаются. А это страшное зрелище — подпрыгивающее на шоссе оторвавшееся колесо тяжелого грузовика. Итак, усталость, почти следует Шекспиру: «Повторность изменяет лик вещей» и порой проявляется драматически.



Каковы же внешние особенности явления усталости с позиции механики? Прежде всего усталостное разрушение протекает с участием пластической деформации, но масштабы ее очень невелики в сравнении с одноразовым разрушением. Особенно опасная черта усталостного разрушения— это способность начинаться и протекать при напряжениях, намного меньших, чем предел прочности или текучести. По существу, напряжения эти не выходят из упругих рамок, но циклическое нагружение так эффективно использует их, что «с успехом» разрушает материал. В случаях, когда напряжения эти значительны, усталостное разрушение наступает раньше. Но если напряжения очень малы, это тоже «не пугает» усталость. Просто для гибели нужно большее число циклов. Металл как бы располагает некоторым моторесурсом — долговечностью. Он способен выдержать определенное число циклов приложения нагрузки. И это число снижается с увеличением приложенных напряжений, что в общем естественно. Ведь усталость человека тоже зависит от тяжести выполненной работы. Чем она больше, тем быстрее мы «сдаем». Но, конечно, масштабы усталости металлов иные. При разумном приложении внешнего нагружения сталь способна выдерживать десятки миллионов актов нагружения. Например, рессора автомобиля! Какое огромное число колебаний она должна «вытерпеть»— на каждом камешке и неровности, чтобы обеспечить безопасность и комфорт движения. А разнообразные клапаны в двигателе, работающие непрерывно,

да еще при высокой температуре! Таким образом, процесс усталости развивается за счет того, что невысокие напряжения как бы «компенсируются» многократным приложением нагрузки. Это и ведет к утомлению и «одряхлению» металла. Не следует думать, что устают только отдельные непрочные металлы. Нет! Это явление общее и подчиняет себе любую, даже сверхпрочную сталь!

Если механические, так сказать внешние особенности протекания усталости достаточно ясны, то с физическим механизмом процесса дело куда сложнее. Начнем с пластической деформации. Отличительной особенностью пластического течения при усталости является его сосредоточенность в меньшем объеме, чем при одноразовом нагружении. И в том, и в другом случаях механизм пластической деформации дислокационный, однако, вместо появления все большего числа линий скольжения при обычном деформировании усталость сопровождается образованием ограниченного количества линий скольжения с последующим их расширением. Это общая фундаментальная закономерность усталости — высокая неоднородность всех процессов по сечению металла. Усталость — процесс, способный «выбирать» самые слабые звенья прочности и сосредоточивать на них свои подтачивающие усилия. При этом свойства основного массива металла могут быть и не затронуты разрушением. Приведем некоторые примеры «коварства» избирательности усталостного разрушения.

Прежде всего оказывается, что концентрация напряжений при усталости ведет к охрупчиванию металла гораздо быстрее, чем в условиях обычного нагружения. При многоцикловом нагружении металл становится более чувствительным к самым разнообразным концентраторам: дефектам на поверхности, надрезам любых видов и сортов, участкам коррозии.

В частности, такими концентраторами всегда являются неметаллические включения. Но при усталости они становятся подлинно опасными, потому что многоцикловое нагружение сразу же сосредоточивает пластическую деформацию вокруг включений и уже на ранних стадиях, когда основной металл еще здоров, зарождает на включении микротрещину. Этому способствует и то, что со временем включение, которое после выплавки металла было прочно «вклеено» в матрицу, отрывается от нее — теряет связь с металлом; концентрация напряжений сра-

зу возрастает и вероятность протекания скольжения и микроразрушения вокруг включения резко увеличивается.

Эта неоднородность деформирования по сечению «утомляющегося» металла и ведет к тому, что общая энергия, затрачиваемая на пластическую деформацию циклично нагружаемого металла, меньше, чем при обычном деформировании. Вот и получается, что неоднородность и избирательность разрушения «спасают» металл в целом и от деформации, и от разрушения. Но все же в его объеме найдутся одно—два слабых места — пожива для процесса усталости. Таким образом, металл может быть выведен из строя сосредоточенным разрушением на считанных участках, уязвимых для зарождения усталостной трещины. Что касается общих мощнейших ресурсов прочности металла, то они остаются неиспользованными. В этом-то и опасность усталости, выискивающей в металле слабые звенья и обыгрывающей их.

В избирательности и заключается основная проблема обеспечения прочности металла, противопоставляемой возможной усталости. Металл должен быть равнопрочным во всей своей структуре. Но для реального металла это невозможно — он неоднороден от рождения. И потому, что он — поликристалл, и потому, что он — сплав, и потому, что в нем разбросаны разнообразнейшие примеси и дефекты. А следовательно, в нем изобилие слабых мест, которые безошибочно находят усталость. Ведь для разрушения достаточно лишь одного!

Каков физический механизм зарождения микроскопических трещин при циклическом нагружении? Прежде всего ими могут быть едва ли не все дислокационные механизмы, рассмотренные в первой главе. Но есть и специфические «усталостные» модели. Одной из них является схема, предложенная японским физиком Эиихи Фудзита. Когда в одной плоскости скольжения сближаются разноименные краевые дислокации, то у одной из них экстраплоскость находится вверху, а у другой — внизу. Естественно, что они соединяются и дислокации исчезают — аннигилируют. А теперь представьте себе те же дислокации, но на разных и очень близких плоскостях скольжения. У основания каждой из экстраплоскостей — • пустое пространство, немного большее, чем между атомами в здоровой классической решетке. Эти пустоты двух разноименных дислокаций сливаются и образуют

зародыш микротрещины. Такой же процесс в этом же районе протекает и с объединением двух пар дислокаций. В результате многих подобных актов зародыш подрастает и становится устойчивым. В дальнейшем он увеличивается благодаря втеканию в него дислокаций с полосы скольжения. И, наконец, превращается в трещину. Фудзита очень остроумно использовал в дислокационной модели то, что усталость чувствительна к различным включениям и выделениям. Он допустил, что из-за многократного путешествия дислокаций по полосе скольжения туда и обратно — нагружение-то циклическое — происходит окисление материала в окрестностях линий скольжения. Читатель может спросить: а откуда же появляется кислород в середине металла? Ответить можно двояко. Во-первых, кислород и другие газы остаются в металле во время его выплавки. Во-вторых, линии скольжения выходят на поверхность металла, а уж там кислорода сколько угодно. И если этот вопрос снять, то гипотеза Фудзиты означает следующее: в полосе скольжения образуются оксиды. А частица оксида — это барьер для дислокаций. А отсюда, как нам хорошо известно, один шаг до трещины.

Есть много вариантов взаимодействия дислокаций, приводящих к возникновению точечных дефектов, называемых вакансиями. Не вызывает сомнения, что в процессе усталости в металле образуется большое количество вакансий. Это явление и порождает разнообразные гипотезы о скапливании вакансий и объединении их в поры или лакуны. Такие каверны могут стать источником разрушения. Простейшим вариантом превращения полости в трещину является ее «сплющивание» под действием внешнего нагружения.

Советские ученые И. А. Одинг и В. С. Иванова считают, что причины зарождения разрушения связаны с огромной энергией упругой деформации, возникающей в некоторых микрообъемах. Тогда первичное разрушение может «вспыхнуть», например, из-за обычного процесса плавления.

При усталости появляются некоторые эффекты, не встречающиеся в случае обычной деформации. Так, из циклически нагружаемого металла вытесняются тонкие пластинки материала прямо по плоскостям скольжения. Явление это называют экструзией. Известен и обратный процесс втягивания металла — интрузия. Вопрос об их

происхождении спорен. Тем не менее некоторые считают, что образование трещины может быть связано с ними.

Если подвести итоги наших представлений о природе усталости, то оказывается, что он еще не очень богат. Но бояться этого не надо. — «Ведь только мудрый человек способен сказать: «Я этого не знаю»... Ибо только мудрый может знать истинные пределы своих знаний»¹.

В этом «нет» и своя прелесть — ведь столько интересного и неизведанного впереди. Конечно, границ для знаний нет. И те, кто сегодня сдает вступительные экзамены в вузы, в свой срок раздвинут границы познанного и решат свои задачи!

Не надо забывать, что проблема усталости — одна из самых важных в современной технике. Нет такой отрасли промышленности, где она не фигурировала бы как обнаженное зло, поражающее разнообразнейшие оси, огромные роторы, коленчатые валы двигателей, лопадки паровых, водяных и газовых турбин. А в авиации? Со времени серии аварий английских пассажирских самолетов «Комета» так называемая малоцикловая усталость — притча во языцех. И неудивительно. Все самолеты при подъеме на большую высоту претерпевают своего рода «раздутие» из-за того, что внутреннее давление воздуха остается почти тем же самым, а внешнее — резко падает. При посадке давления выравниваются. За время жизни самолета таких циклов несколько сотен. И так как в корпусе лайнера есть окна, люки, тысячи заклепок и другие концентраторы напряжений, то может возникнуть трещина, представляющая в этих условиях прямую угрозу жизни сотен пассажиров.

А что такое усталость для глубоководных подводных лодок? При погружении корпус корабля подвергается невероятному обжатию. При подъеме же на поверхность не только люди, но и вся лодка вздыхает с облегчением и расширяется. Повторенный многократно этот процесс тоже должен вызвать усталость металла. И может быть совсем не случайны слова в известной песне: «...когда усталая подлодка из глубины идет домой...» «Усталая» — только ли метафора?

Два последних примера подчеркивают важность и неотложность глубокого понимания всего, что связано

¹ *Крайтон Р.* Тайна Санта-Виттории. — М.: Прогресс, 1970. С. 169.

с усталостью. И поскольку речь идет едва ли не о самых ответственных отраслях промышленности, в проблемы усталости, несомненно, будут вложены и средства, и способности ученых всего мира. А это, конечно же, приведет к решению в целом. Когда это произойдет, сказать трудно. Но, вероятно, в ближайшие десятилетия.

НУЖЕН ОРЛИНЫЙ ГЛАЗ

— Чего Вы добивались?

— Я искал трещину, мой друг.

Агата Кристи

А. И. Куприн рассказывает древнюю историю о том, как царица Савская, желая испытать мудрость царя Соломона, задала ему загадку: «...прислала она Соломону алмаза величиной с лесной орех. В камне была тонкая весьма извилистая трещина, которая узким сложным ходом пробуравила все его тело. Нужно было продеть сквозь этот алмаз шелковинку. И мудрый царь впустил в отверстие шелковичного червя, который, пройдя наружу, оставил за собой следом тончайшую шелковую паутинку»¹.

Скажем прямо, по нынешним меркам решение такой задачи посильно рядовому человеку. Во-первых, действительно, трещина, которую «исследовал» царь Соломон, была относительно широкой по своему сечению — порядка миллиметра. Во-вторых, она выходила на поверхность и была видна невооруженным глазом. В-третьих, трещина образовалась в прозрачном алмазе. Словом, царь знал о ней все. Это, конечно, не уменьшает его остроумия при «продевании» червя-нитки в эдакое хитрое «ушко». Но... ..реальные задачи, стоящие перед специалистами в области прочности и разрушения металлов, куда сложнее.

Начнем с того, что трещины далеко не всегда значительны по размерам. Если бы они были слишком велики, детали как единого целого уже не существовало бы. Сплошь и рядом трещины в полном смысле слова микроскопичны, то есть видеть их можно в микроскоп. Да и то не во всякой. Иной раз нужен не оптический, а электронный. Это значит, что размеры таких трещин исчисляются тысячными, а порой, миллионными долями сантиметра.

¹ Куприн Л. И. Собр. соч в девяти томах. Т. 5. — М.: Правда. С. 40.

Да и червя такого не сыскать, чтобы запустить его в трещину сечением в несколько межатомных расстояний. Но если вдруг мы и нашли бы какое-то живое существо, способное «втиснуться» в дефект, то оно оказалось бы либо в тупике — трещины конечны по своей длине, либо в безнадежном лабиринте. К тому же, далеко не все трещины выходят на поверхность...

Между тем реальный металл — это мир, пронизанный фантастическим количеством микротрещин. Я имею в виду полноценный металл, то есть хорошо выплавленный, прокатанный, термически обработанный с соблюдением всех правил и предосторожностей. Чем-то он напоминает старый потрескавшийся потолок. Трещины на нем образуют сложнейшие рисунки: взгляните в них пристально и воображение приблизит их к любому образу: вы увидите паутинное разветвление железнодорожного узла, фантастических зверей, удивительные лица. Не испугаться ли за прочность металла?

Но мы уже знаем — до поры до времени это не страшно. Трещины-то докритические. Тем не менее под контролем их держать надо. Как же это можно сделать? На прозрачных материалах самые малые трещины, которые видны в микроскоп, порядка нескольких тысячных миллиметра. А если меньше? Тогда можно использовать рассеяние света на неоднородностях, которыми являются микротрещины. Представьте себе, что Вы на хоккейном матче. За пять минут до его начала стадион оживлен, все осветительные устройства включены, но почему-то довольно темно. А дело в том, что световые лучи входят под углом в идеальный, полированный слой льда и начинают отражаться в нем от одной поверхности к другой. Очень много света буквально «запутывается в слое льда» и «выходит из игры» — теряется для освещения. Но вот прошло 5—10 минут. Накал ламп не изменился и новых прожекторов не включали, а явственно посветлело. Что же произошло? Хоккеисты своими коньками изрезали поверхность льда. Возникшие от коньков борозды и отходящие от них внутрь льда трещинки не пропускают свет в глубь слоя льда и рассеивают его в пространство. Вот так же примерно рассеивают свет и микроскопические трещины внутри прозрачного кристалла. Благодаря этому можно изучать трещинки, размер которых близок к длине волны света, то есть равен примерно пяти десятиллионным частям метра. А нельзя ли с помощью

рассеяния света исследовать зарождение самых первых, самых маленьких трещин длиной в одно межатомное расстояние? Нет, нельзя! Это означало бы повторение «научной ошибки» прекрасной поэтессы Марины Цветаевой, которая писала:

Гамлетом — перетянутым — натуго,
В нимбе разуверенья и знания,
Бледный — до последнего атома...

Может ли атом нашего тела иметь цвет? По двум причинам — нет. Во-первых, потому, что мы видим свет, отраженный и рассеянный нами, а не излучаемый телом. А во-вторых, размеры атома в 5000 раз меньше длины волны света. И если бы бегущая световая волна встретила на своем пути одинокий атом или... микротрещину, равную примерно его размерам, она попросту обогнула бы его или, как говорят, дифрагировала бы на нем. Иначе говоря, по существу не заметила бы, подобно тому как большая волна «не замечает» тонкий прут, воткнувший в дно.

Но что же надо сделать, чтобы увидеть настоящие зародышевые микротрещины, да еще в непрозрачном материале? Нужно тоже использовать рассеяние, но таких электромагнитных волн, размеры которых были бы близки к межатомному расстоянию. «Да ведь это рентгеновские лучи» — скажет догадливый читатель. И будет прав. Да, рассеяние рентгеновских лучей позволяет изучать распределение самых маленьких «атомных» трещин в металлах.

У рассеяния рентгеновских лучей есть и незаурядный конкурент — рассеяние электронов. В последние годы электронные микроскопы настолько усовершенствовались, что они способны буквально следить за поведением отдельного атома. Неудивительно поэтому перспективность такого метода для наблюдения самых ранних стадий появления микротрещин. И если у наших предшественников эталоном мастерства считалось, образно говоря, умение «подковать блоху», то в недалеком будущем может случиться так, что нужно будет «подковать» атом. Скажем, чтобы восстановить его сцепление с соседом. Тогда-то и окажется, что нет метода эффективнее и, что самое важное, нагляднее, чем электронная микроскопия.

Ну, а как быть в «земных» случаях? Когда с завода идет поток термически обработанных деталей, на которых не должно быть больших, то есть явно опасных тре-



щин? Здесь наша задача проще, ведь речь идет о трещинах в доли миллиметра и более. Методов определения размеров и, как говорят, лоцирования трещин тем больше, чем большие размеры имеет трещина. Допустим, что вначале трещина довольно мала. Тогда можно применить флуоресцентный анализ. Металл, на поверхности которого возможно появление трещин, смачивают специальным раствором, обладающим двумя ценными качествами. Прежде всего он способен проникать в мельчайшие полости и заполнять их. Это качество «первопроходца» дает уверенность в том, что если трещина существует, то жидкость (которую может смоделировать, например, керосин) наверняка окажется в трещине. Второе свойство раствора — его способность светиться под действием ультрафиолетового света. Деталь смачивали, а затем, спустя некоторое время, раствор смывали с поверхности металла струей воды. Затем освещали ультрафиолетовыми лучами. При этом

Поверхность гладкого металла
Была бесцветнее стекла.

(Ш. Бодлер)

Потому, что керосина на ней уже не было. Присутствие трещины «выдает» задержавшаяся в ней и светящаяся жидкость. Свет этот, правда, очень слабый потому, что в узкой трещине жидкости мало, и потому, что люминофор остается лишь в глубине трещины, как бы на дне глубокого и узкого каньона. Он излучается не во все стороны, а только в направлении, определяемом берегами трещины. Поэтому металл рассматривают в темноте. Ультрафиолетовые лучи мы не видим, а слабое свечение люминофора в трещине замечаем.

На заводах очень широко пользуются магнитным методом. Идея его проста. Допустим, что каким-то способом мы создали в металле магнитное поле. Оно стремится равномерно распределиться по сечению металла. Оно стремится равномерно распределиться по сечению металла. Но если в нем есть трещина, то ни о какой равномерности и речи быть не может. В вершине трещины магнитное поле концентрируется. А если трещина при этом замкнута, то ведет все это к образованию на краях ее у вершин самых настоящих магнитных полюсов. Теперь возьмем литр керосина и насыплем в него мельчайший порошок железа. Размешаем и выльем эту смесь на деталь. Крупинки железа, способные легко перемещаться в жидкости, осядут на деталь, сконцентрировавшись прежде всего у магнитных полюсов. И трещина будет «разоблачена».

Однако безусловным хотя и некоронованным королем дефектоскопии является ультразвук. И вот почему. Метод этот прощупывает трещины самых разных размеров — от долей сантиметров до километров. Нижний предел со временем будет уменьшен раз в сто. Ультразвук всеяден — он найдет любую трещину: и выходящую на поверхность, и прячущуюся в глубине металла. Ему не важно, капитально ли вскрылась трещина или ее берега едва разошлись. Оборудование для его осуществления очень транспортабельно. Поэтому не удивительно, что его широко применяют во всем мире. В любой отрасли промышленности он поможет отыскать дефекты — заводском цехе и в поле у бесконечной нитки нефтепровода.

На чем же он основан? Прежде всего на неспособности ультразвука проходить через воздух и вакуум. Он любит «твердую почву» и способен распространяться лишь по металлу. Поэтому, оказавшись на пути ультразвукового луча трещина, — дальше идти он не может. Уста-

новить это нетрудно. Но мало того, что звук «боится» трещин, он буквально «отшатывается» от них, отражается, как солнечный луч от зеркала, и бежит назад. Поймать его просто. А если мы заметим его путь, то, значит, получим ответ луча на вопрос: что произошло? Ведь, как известно, угол падения равен углу отражения. И тогда специалисты по дефектоскопии уподобляются древним воинам.

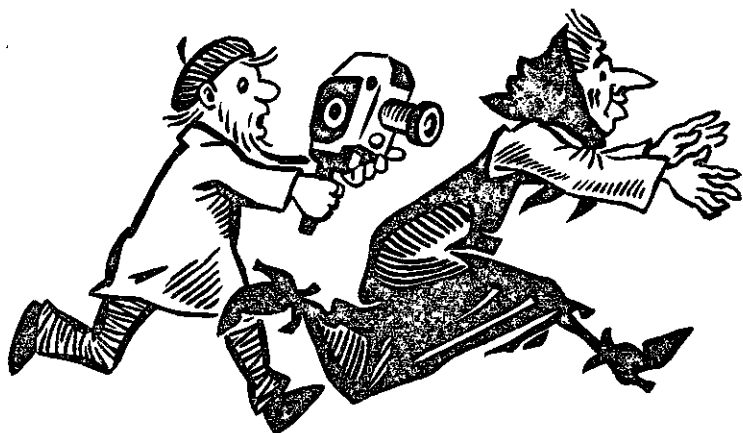
Они уселись в тень скалы
И с помощью своих мечей
Вычерчивают углы
Паденья солнечных лучей

(Г. Мартынов)

А раз так, мы всегда можем установить угол, под которым расположена трещина.

Не так давно на Аляске построили нефтепровод длиной примерно в 1500 км, способный пропускать 60 миллионов тонн нефти в год. Стоимость его должна была составить 7 миллиардов долларов. На нефтепроводах такого типа трубы соединяют сварными швами. Качество сварных швов контролировали самым распространенным и надежным способом — рентгеновским. Оказалось, однако, что 30 % швов содержали внутренние раковины и опасные трещины. Обнаружены были трещины и в H-образных стальных опорах. Несмотря на это, нефтепровод был сдан в эксплуатацию. При анализе аварии выяснилось, что тысячи рентгеновских снимков, предъявленных заказчиком, были, по видимому, фальсифицированными. Но, конечно же, этот случай ни в коем случае не компрометирует рентгеновские методы определения трещин в сварных швах, поковках, термически обработанных деталях и других изделиях.

В чем суть рентгеновского просвечивания, разбирается каждый. Достаточно вспомнить, что все мы проходим периодические осмотры в рентгеновских кабинетах. Все просто. Рентгеновские лучи реагируют в первую очередь на плотность вещества и его способность поглощать радиацию. Поэтому если в металле есть пора, она не поглощает лучи и изображение ее на экране будет светлее. Так же обстоит дело и с трещиной. Огромным достоинством рентгеновского метода является его нетребовательность к качеству металла. Потому-то он и годится для сварки. Другое дело ультразвук. Он невероятно привередлив к поверхности. Ему подавай полированную, а это при массовом производстве, да еще в полевых условиях



тысячекилометрового нефтепровода, немислимо. Поэтому, где сварка, там и рентген. Однако и у него свои недостатки: длительность процесса, необходимость фотолаборатории, опасность радиационного поражения обслуживающего персонала. И все же этот метод применяют. Ведь при гигантских авариях, например на газопроводах, не только подвергаются опасности тысячи человеческих жизней, но и наносится колоссальный материальный ущерб. Поэтому специальные группы исследователей просматривают абсолютно все сварные стыки и если обнаружены трещины, вырезают дефектные места и проваривают все заново.

В шутке из «Крокодила»: «Дефекты, имеющиеся в сварных швах, устранены путем вырубки дефектов и наложения новых» — немалая доля правды. Ведь каким бы качественным ни был сварной шов, в нем всегда, к сожалению, найдется место, если не крупным, то уж мельчайшим трещинам. И зафиксировать их при помощи рентгеновских лучей определенно не удастся. Это не значит, что шов разрушится, но достоверно одно: микротрещины в нем будут.

Как бы ни было трудно фиксировать трещину, но если она неподвижна, это возможно. Иное дело, когда она движется, да еще с бешеной скоростью 1—2 км/с. Ясно, что возможность здесь одна — кино съемка. Да не простая, а скоростная. В простейшем случае это делают так. Световое изображение движущегося объекта, например трещины, падает на быстро вращающееся зеркало. Оно

как бы разворачивает изображение по неподвижной пленке. А чтобы кадр не получился «смазанным», свет направлен через небольшую линзу, как бы останавливающую изображение на одном участке пленки. Линз таких десятки; зеркало вращается с частотой в десятки тысяч оборотов в минуту. Частота киносъемки — миллионы кадров в секунду. На пленке получают изображения, отделенные интервалами в миллионные доли секунды. Этого достаточно для изучения поведения довольно большой трещины, движущейся относительно долго. Ну, а если нас интересуют тонкие особенности разрушения, скажем, на протяжении одной десятой или стомиллионной доли секунды? Тогда покадровая съемка бесполезна из-за своей относительной медлительности, нужны более тонкие дробления времени.

К счастью

Времена полны, не так ли,
Мириадами мгновений?

(Л. Церетели)

Поэтому вращающимся зеркалом просто разворачивают изображение на неподвижную пленку, без промежуточных линз. Теперь уже не до качества и не до объемного изображения трещины. Получают лишь ее тень. Зато скорости регистрации сразу подскакивают в сто раз. И мы уже различаем временные промежутки в одну стомиллионную долю секунды.

Ну, а если и этого мало? Тогда есть еще один путь. Читатель знает, что лазер сегодня превратился в подлинного труженика науки. Помогает он и здесь. Длительность свечения лазера может составлять одну миллиардную секунды. Включенный в определенный момент времени, лазер создает однократное изображение летящего объекта за это время. Так снимают полет пули, снаряда, метеора или ракеты. Если нужны не один, а много последовательных снимков, то устанавливают несколько лазеров, срабатывающих с помощью электроники последовательно через заданные промежутки времени.

Полбеда, как мы видим, если трещина сечет прозрачный материал. А если она растет в стали? Как быть тогда? Сегодня для этого случая существует, пожалуй, один отработанный метод — скоростная съемка в рентгеновских лучах. Проблема заключается в том, что рентгеновские лучи не преломляются и не «соблюдают» привычный для света закон: угол падения равен углу

отражения. Поэтому развернуть рентгеновскую тень движущегося предмета вращающимся зеркалом невозможно.

Поступают так. Устанавливают несколько импульсных рентгеновских трубок со временем испускания рентгеновского луча в одну миллионную долю секунды. Лучи от каждой трубки создают тень объекта и дают изображение на своей пленке. Трубки срабатывают поочередно, и мы получаем пять-шесть отдельных кадров процесса, происходящего внутри металла. Таким способом изучают проникновение снаряда в броню или форму фронта трещины в стали.

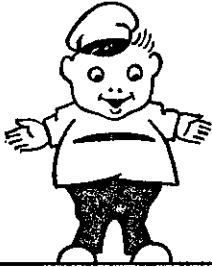
Не слишком ли все это сложно для простой трещины? Нужно ли?

Да, нужно. Хорошо известно со времен Спинозы, что «невежество не есть аргумент». В нашем же отношении к трещине оно было бы попросту преступным.

Достаточно вспомнить те беды, которые может принести с собой разрушение, чтобы стремиться узнать о трещине все: и время, и место ее рождения, и ее «родителей», и условия роста, и характер. Для всего этого нужны и методы, и инструменты.

Забьется под стрелю трещина,
Как пригвожденная змея...

А. Вознесенский



3

**РАЗРУШЕНИЕ,
ОСТАНОВИСЬ!**



МОЖНО ЛИ ВЗЯТЬ ТРЕЩИНУ ПОД УЗДЫ?

Против неугодной силы
силу мы в себе найдем.

И. В. Гёте

Теперь, когда мы твердо убеждены, что разрушение — зло, уместен вопрос: как его остановить? Каким образом можно прервать распространение трещины, «взнуздать» ее?

Чтобы понять, насколько это не просто, вспомним некоторые качества трещины. Прежде всего она стремительна — расстояния, исчисляемые километрами, преодолевает в секунду. При таких скоростях разрушение хрупко и в пластической деформации не нуждается. Поэтому трещина довольствуется ничтожной энергией из разрушаемого объекта. Практически она безынерционна, поэтому способна мгновенно поворачиваться в любом направлении, сулящем ей новую порцию «пищи» — упругой энергии. К тому же трещина обладает удивительным качеством — молодеет с возрастом, то есть способна бежать по металлической конструкции со все возрастающей скоростью. Не страшны ей не только метровые детали, но и многокилометровые нефтяные и газовые трубы. Наоборот, чем больше размеры конструкции, тем больше у трещины возможностей «развернуться». Вот с каким врагом нам предстоит встретиться! И слабых мест у него сразу не видно! Но ведь нам нужны эти уязвимые места! Следовательно, они должны быть!

В связи с этим мне вспомнился эпизод из книжки Роберта Крайтона «Тайна Санта-Виттории»: «Один человек, охотясь на медведя, вышел на большую поляну, и вдруг у него отказало ружье. На поляне не было ни дерева, чтобы на него залезть, ни камня, за который можно было бы укрыться, и тут из леса вышел огромный разъяренный медведь и пошел прямо на охотника. Охотник был на волосок от гибели и едва уцелел, — сказал Роберто.

— Как так — едва уцелел? Что же он сделал?

— Он залез на дерево.

— Но ты как-будто сказал, что там не было дерева?

— В этом-то все и дело, там ДОЛЖНО было быть дерево, оно ДОЛЖНО было там быть».

Вот так, должны быть слабые места и у трещины!

Давайте сейчас их и поищем!



Прежде всего трещина питается упругой энергией нагруженного объема. А нельзя ли ею управлять? Оказыва-ется, с трудом, но можно.

Вершина трещины очень острая. Поэтому концентрация напряжений в ней невероятно высока. А нельзя ли ее затупить? Обезглавить трещину? Непросто это — обстричь вершину у быстрой трещины, но вполне реально.

Хрупкая трещина требует для бега совсем немного упругой энергии. Не означает ли это, что и для ее торможения нужны не слишком большие затраты? Означает. Попробуем в этой главе поискать, пофантазировать: нет ли каких-нибудь барьеров, способных придержать разрушение.

Трещина испускает упругие волны, в том числе звуковые. Значит, она в свою очередь должна быть чувствительна к волнам, падающим на нее извне. Ведь композитор не может быть равнодушен к чужой музыке.

Трещина, даже быстрая, создает в своей вершине дефекты кристаллической решетки. Это, очевидно, означает, что и сама она будет чувствительна к ним. А значит, есть шанс использовать такие дефекты, как барьеры.

Вспомните ветвление трещины. Ведь оно похищало у трещины скорость. А вдруг?...

Таких «изъянов» у трещины много. Надо их только

внимательно «выследить». И тогда окажется, что разрушение не всесильно. Неся людям зло, оно уязвимо само. И мы должны этим воспользоваться. Вы можете возражать мне: но почему же природа сама не позаботилась о предотвращении разрушения? Значит, оно ей выгодно? Может быть и так — природа часто стремится упорядоченное к хаосу. Вместе с тем еще Паскаль, веря в возможности человечества, сказал: «Природа не знает своего величия, но мы знаем».

МАНИКЮР ТОПОРОМ

...И вот — внезапный свет сквозь тени...

В. Брюсов

Каким бы ни было торможение трещин, это всего лишь торможение, а не залечивание их. Поэтому цели его ограничены: срочно остановить разрушение, предотвратить надвигающуюся катастрофу, выиграть минуты, чтобы закончить какой-то производственный цикл, и провести ремонт изделия, например заварить разрыв. Ясно поэтому, что все то время, пока в теле работающего металла существует трещина, хоть и приторможенная, он будет неполноценным, ущербным. И тем не менее даже такой умеренный процесс, как торможение трещины, нужен и полезен, ведь он предотвращает аварию, чреватую отрицательными последствиями, а часто и непоправимыми бедами.

Как же остановить трещину? Очевидно, вырвать у нее звено, без которого она не может существовать. Скажем, не допустить зарождения трещины. В принципе, конечно, это возможно, но практически нет. Дело в том, что зародышевые трещины либо уже имеются в детали с самого начала ее существования, либо сравнительно быстро появляются на самых ранних стадиях эксплуатации вследствие усталости металла. Значит, на этом пути мы вряд ли сможем одержать победу. Другое дело подрастание и закритический рост трещины. И тот, и другой требуют подведения к трещине упругой энергии. А нельзя ли этот поток если не прервать, хотя бы приостановить: превратить его в тонкую струйку?

Есть три пути, позволяющие это сделать. Обратимся к первому из них, самому радикальному. Нельзя ли при первых же признаках опасности моментально разгрузить

всю систему с растущей трещиной? То есть лихо, «топором отрубить» действующую разрушающую силу от скомпрометированного узла и приложить ее к другим запасным пластинам металла. Наверное, в каких-то случаях это и можно было бы сделать. Но при этом возникли бы немалые трудности. Ведь чтобы мгновенно разгрузить систему с растущей трещиной, нужны быстродействующие устройства с невероятной реакцией—в тысячные и меньшие доли секунды. Это еще не все. К сожалению, здесь работает и обоснованно работает принцип: все или ничего. Во что бы то ни стало нужно разрядить, или как говорят физики, релаксировать все упругое поле. В противном случае достаточно хрупкая трещина, «подкрепляемая» энергией с неразгруженных участков, продолжит свой рост. Ей ведь многого и не надо.

Куда более простым и земным было бы следующее. Проектируют, допустим, крыло самолета. Исходят при этом из его прочности в состоянии монолитном. А надо учитывать кризисный случай, когда в крыле появляется трещина. Очевидно, это меняет многое. Концентрация напряжений теперь гораздо больше расчетной, да и остатальной неповрежденный массив крыла, хотя и находится далеко от очага разрушения, вносит свою лепту во зло — ведь он поставляет упругую энергию растущей трещине.

Как бороться с этим? Прежде всего проектировать любую ответственную конструкцию, исходя из ее поведения не только в монолитном состоянии, но и в кризисном. Для этого мало думать об уменьшении концентрации напряжений вокруг заклепок или о понижении напряжений за счет запаса прочности. Надо прогнозировать возможное подрастание трещины и принимать меры для того, чтобы всеми средствами понизить поток упругой энергии, поступающей к разрыву. Как это сделать? Надо, вероятно, разработать целую систему спасения от разрушения. И должна она включать сознательное управление разрушением, которого всегда надо опасаться. Никто не говорит, что просто. Но это необходимо.

Вот один из путей, способных облегчить решение этой задачи. Пусть нам удалось приостановить переход трещины из докритического состояния в закритическое. Означает ли это, что трещина остановлена? Не обязательно. Она может и подрастать, только медленно. Но это значит, что энергия, подводимая к трещине внешней си-



лой и упругим резервуаром, затрачивается на пластическую деформацию в ее вершине. Вариант, конечно, не самый хороший — разрушение-то все-таки идет! Но все же он «лучше» взрывного и неуправляемого закритического разрушения. Потому, что мы выигрываем время!

Как же можно продлить процесс разрушения в целом за счет пластификации? Прежде всего это входит в обязанности конструкционного материала. Он должен быть не только прочным, но и вязким. Если запас пластичности у него велик, это отодвинет момент зарождения трещины. Но и дальше способность металла деформироваться скорее и легче, чем разрушаться, обезопасит его от быстрого перехода вязкой трещины в лавинную стадию «оголтелого» разрушения, «обрушивающегося» со звуковыми скоростями. Все это время, пока докритическая трещина медленно подрастает, пластическая деформация в ее вершине «перемальвает» упругую энергию окружающего пространства, превращая ее в тепло, рассеивающееся в металле и воздухе. Выходит, что пластическая деформация здесь играет роль не только буфера, смягчающего нагружение, но и клапана, выпускающего «лишний

пар и тем самым понижающего давление». И как знать, умей мы открывать этот клапан пошире и в любое время, может и удалось бы остановить трещину легко и просто. Например, мы резко понизили сопротивление пластической деформации в вершине трещины. Как это сделать? А вот так, к примеру: взяли и нагрели окрестности трещины. Чем? Это разговор особый, и мы к нему вернемся. Важно, что с повышением температуры металл деформируется намного легче. Ведь не случайно же его прокатывают и куют в раскаленном состоянии! Ясно, что при этом течение в вершине трещины пойдет намного быстрее. Большое количество упругой энергии будет растратчено, и разрушение отодвинется во времени.

Есть ли какие-нибудь шансы использовать пластическую деформацию на закритическом этапе жизни трещины? Есть, но мало. И вот почему. При высоких скоростях разрушения пластичность подавляется — она просто не успевает осуществиться: слишком мало времени предоставляется дислокационным источникам пока мимо них бежит трещина. Поэтому пластическая деформация сосредоточена по тончайшим кромкам трещины (не толще десятков микрон). Вот, если бы удалось получить такие материалы, в которых дислокационные источники были совершенно свободными, не заблокированными примесями... И если бы удалось сделать их совершенно раскрепощенными и способными генерировать дислокации моментально и в большом количестве... И если бы эти источники начинали работать не при определенном, а при любых, как угодно малых напряжениях, чтобы они могли функционировать и далеко от берегов трещины... Вот тогда бы... Но не слишком ли много «если бы»? Сегодняшняя реальность такова, что надеяться на мощную пластическую деформацию около закритической трещины, к сожалению, не приходится. Следовательно, если и рассчитывать на пластифицирование материалов, то только до появления трещины и на ранних докритических этапах ее роста. Потом это уже бесполезно.

Но неужели так уже все безнадежно? Нет, конечно, возможности есть и немалые. Представьте себе, что на пути трещины мы сознательно, еще при проектировании конструкции, а потом при ее изготовлении расположили мощное упругое поле сжатия. Никаких особенных проблем с его образованием нет. Как изготавливают предварительно напряженный железобетон? Растягивают на

простейших станках арматуру и в таком состоянии заливают бетоном. Когда бетон застывает, он оказывается сжатым, а арматура — растянутой. Трещиностойкость такого бетона, как известно, значительно выше, чем обычного. Примерно таким же образом можно поступить и с металлической конструкцией. Часть ее сжимается, на нее накладывают слой металла и проваривают или приклеивают. Тогда основной металл окажется сжатым, а накладка — стрингер — растянутой. Когда быстрая трещина вторгается в сжатую область; подталкивающая ее упругая энергия растяжения гасится на противоположном упругом поле сжатия, а разрушение, лишенное пищи, останавливается. Таким образом тормозят любые, в том числе закритические, трещины в судо- и самолетостроении.

Иногда на кораблях поступают и по-другому. На предполагаемом пути трещины вырезают паз. А сверху на него наклепывают стрингер. Такой барьер — совершенно непреодолимое препятствие для трещины. Правда, и этот, и предыдущий методы, останавливая трещину» сами вносят в конструкцию дефекты — и сварные швы, и отверстия. Но что же делать? Приходится из двух зол выбирать меньшее...

Осень нам дает урок
Строго, без истерик:
Обретишь,
но прежде —
в срок —
Понесешь потери!

(И. Борисов)

«БУТЕРБРОД» ТОРМОЗИТ РАЗРУШЕНИЕ

...Секунды в бесконечность
превращал...

Эуджен Жебеляну

В предыдущем разделе мы затронули проблему взаимодействия трещины со стрингером и пазом. В действительности, это лишь один из аспектов обширной темы—«поведения трещины у границ. Читатель знает, что материалы, состоящие из разнородных слоев, называются композитами. По существу каждый композит похож на бутерброд. Но в отличие от обычного бутерброда, который должен быть съедобным, бутерброд — композит «обя-



зан» быть неудобоваримым для разрушения. Это заранее задуманный и «спроектированный» враг трещины. Иной раз он может и пожертвовать прочностью какого-нибудь из многих своих слоев, но рано или поздно на эту «приманку» обязательно попадет изловленная трещина. У трещины в этом случае тоже свое «кредо» — она почти всегда равнодушна к границам сред с различными упругими характеристиками. Она может их «любить» или «ненавидеть», то есть проникать через них или не проникать, но она не бывает безразлична к ним.

При встрече трещины с границей возможно несколько вариантов ее поведения. Прежде всего трещина может прорваться через нее, потеряв при этом какую-то часть своей скорости, и распространяться во втором материале. Этот вариант лишь отчасти полезен на практике или совсем бесполезен. Важнее, когда трещина застревает на границе и разрушение останавливается. Возможно и такое; трещина затормозила, упершись в границу. А затем под действием давящих на нее усилий разорвала материал по границе склейки. Это реально, когда трещина идет из мягкой составляющей в более твердую.

Какие же простейшие комбинации сред способны оказать сдерживающее влияние на трещины? Это прежде всего чередующиеся прочные и мягкие слои композита.

Первые — основа, они несут нагрузку, вторые — тормозят разрушение. Композиты такого рода представляют собой, например, основу из легированной высокопрочной стали, содержащей один или два слоя низкоуглеродистой мягкой стали. Особую роль играет метод соединения слоев. Наиболее простой — сварка. Могут быть использованы и современные прочные клеи. Трещина, подходящая к вязкому слою, растрчивает упругие напряжения в своей вершине на пластическое течение. Это неизбежно ведет к торможению или полной остановке. Помимо того, в процессе течения радиус основания трещины растет — она затупляется. А известно, что напряжения в вершине тупой трещины меньше, чем в вершине острой.

Совсем не обязательно, чтобы весь композит был целиком стальным. Металлы — «сэндвичи» могут быть сконструированы, например, из стали и меди. Стальной компонент придает конструкции высокую прочность; медь предохраняет ее от возможного разрушения. Трещина, возникающая в стальном слое, всегда застревает или, как говорят, локализуется в медном.

Вязкость такого биметалла гораздо больше, чем обычной стали.

Какие поистине фантастические возможности открываются при подборе пар: пластик и дерево, монокристалл и поликристалл, стали и смолы. А какие перспективы «в содружестве железа и стекла»!

Совсем не обязательно, чтобы слоев было два. Иной раз их может быть и много. Например, шесть слоев бериллия чередуются с пятью слоями алюминия. В отличие от монолита бериллия, разрушающегося сразу по всему сечению, «сэндвич» рвется слой за слоем и поэтому выдерживает нагрузку выше в 5—6 раз. Особенно хороши «бутерброды» при динамическом нагружении. Это и понятно, ведь при быстром приложении нагрузки большую роль играют упругие волны, не только нагружающие деталь, но и подталкивающие трещины. Вместе с тем границы слоев преломляют, отражают, а порой и рассеивают волновые потоки. Поэтому в слоистой среде распространение волн осложняется, а это на руку прочности*

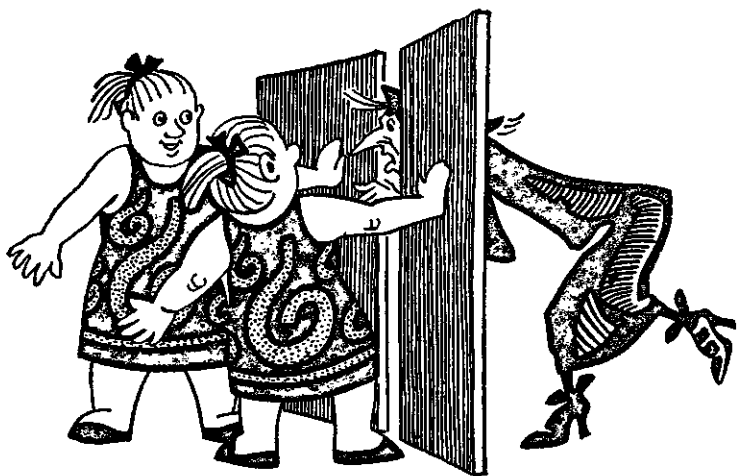
Но барьерные свойства многослойных композитов — только одна из их положительных сторон. Есть и другие, например, если композит перед склеиванием слоев был сжат, то в нем затруднено и зарождение исходной тре-

щины. Более того, тонкие слои высокопрочного металла, входящие в него, как известно, по сравнению с тем же металлом в монолите менее подвержены хрупкому разрушению из-за малых размеров. Важно и то, что в композите они находятся в пространственном напряженном состоянии, которое подавляет разрушение.

Пока что, говоря о границе, разделяющей материалы, мы предполагали ее клеящие и барьерные свойства. Однако ее влияние может быть гораздо более обширным. Так, граница способна создавать по обе стороны от себя области сжимающих напряжений. А мы знаем, что трещина их «боится» и быстро в них останавливается. Этим часто пользуются в судостроении. На некоторых трещиноопасных направлениях накладывают такие сварные швы, даже на однородной стали, чтобы они создавали протяженные упруго сжатые поля. Тем более полезен сварной шов, соединяющий разнородные металлы. Здесь, однако, не все просто и далеко не всякий сварной шов годится для этой цели. Иной из них способен не столько тормозить трещины, сколько ускорять их.

Однако, сознательно управляя полями упругих напряжений в окрестностях границы слоев, можно создавать такие ситуации, когда трещина вынуждена поворачивать под углом к плоскости границы и идти вдоль нее, то есть в неопасном направлении.

Интересные возможности открывают сложные «сэндвичи», в которых трещина растет в направлении слоя, но ее плоскость перпендикулярна плоскости слоев. Здесь начинает работать механизм расслоения композита. Это, конечно же, нехорошо — ведь идет разрушение. С другой стороны, такое множественное образование трещин приводит к быстрому торможению магистральной — уж очень велика энергия многих одновременно вскрывающихся поверхностей. И все-таки сегодняшние композиты, как правило, опасаются трещины, идущей по границам — это уязвимое направление. «Сэндвич» как древний воин стремится подставить свой щит — границу под прямой удар меча. Между тем теория показывает, что трещина, распространяющаяся по склейке, имеет свое тормозящее влияние. Дело в том, что в вершине ее напряжения не постоянные, а пульсирующие. Они как бы много раз меняются в пространстве и во времени. В результате берега трещины, то есть пластины различных материалов, должны перекрываться. Делать это буквально они не



в состоянии. Поэтому речь может идти только о своего рода взаимном вдавливании материала одного слоя в материал другого. К сожалению, экспериментально этого пока еще никто не проверил. Однако явление такое, имея оно место, оказалось бы интересным не только с познавательной точки зрения, но и в сугубо практическом отношении. Ведь оно означало бы отсутствие у трещины широкой дороги между слоями из-за меняющихся напряжений и невероятно сложную пространственно изогнутую траекторию движения от вмятины к соседнему бугру. Остановка за малым — доказать возможность такого эффекта, ведь в него верят далеко не все.

Иной раз границы действуют не только на пересекающую их трещину или на разрушение в них самих. Трещина в многослойном композите может находиться внутри слоя и располагаться параллельно границе. При этом поведение трещины будет непростым. Так, если соседние среды жестче, то трещина стремится распространиться в середине «своего» мягкого коридора. Однако и здесь движение ее неустойчиво, а путь представляет собой плавную волнистую кривую.

По-моему, именно к быстрой закритической трещине относятся иронические слова американского писателя Джоунса: «Пусть это дорога в никуда. Но зато на всем пути зеленый свет». Композитные материалы играют роль красного света, останавливающего трещину не толь-

ко символически, но и непосредственно, физически. Пожалуй, это самый простой и надежный способ прервать разрушение. Правда, не всегда он выгоден и удобен. И из-за относительно высокой стоимости и вследствие того, что далеко не каждую конструкцию можно сегодня изготовить из сэндвичеподобных материалов. Однако там, где это возможно, многослойные материалы надежно стоят на пути разрушения, защищая прочность.

ТРЕЩИНА, ГОРИ ОГНЕМ!

...Паутинка в воздухе прозрачном
Холодна, как трещина в стекле...

Новелла Матвеева

Действительно ли холодна трещина? Да, если она неподвижна. Но было бы неверно сказать так, имея в виду темпераментно растущую трещину. И вот почему. При разрыве связей в вершине выделяется тепло. Кроме того, протекающая на этом участке пластическая деформация в конечном итоге ведет к выделению тепла. При достаточно быстром разрушении скорость этих процессов растет. В то же время теплообмен с массивом холодного металла не успевает осуществиться за короткое время, тепло скапливается в том месте, где оно выделилось. Поэтому-то и можно ожидать вблизи поверхности трещины и в ее вершине повышенных температур. Дело, таким образом, в адиабатическом (быстротекущем без теплообмена) характере процесса разрушения. Читатель знает, конечно, что все адиабатические процессы ведут к неизменному повышению температуры. Например, при вспышке топлива в камере сгорания дизеля, при попадании пули в преграду, при быстром сжатии воздуха в насосе! и т. д.

Итак, принципиально разогрев вершины трещины сомнений не вызывает. Теоретические исследования показывают, что температуры, которых можно ожидать, в стали, например, могут достигать 100—700 °С. На практике, однако, все гораздо сложнее. Зарегистрировать такое повышение температур в опытах с металлами нелегко. Дело не в том, что оно не возникает. Просто его очень трудно зафиксировать. Ведь «ловить» температурные скачки надо в объемах, исчисляемых квадратными микронами и меньше.



И все же не вызывает сомнения, что какой-то нагрев в устье трещины происходит. Но вместе с тем ясно и то, что решительного влияния на процесс разрушения оно не оказывает. А было бы совсем неплохо, если бы оказывало. Представьте себе: быстрая трещина так разогрела свою вершину, что материал стал едва ли не жидкотекучим и хрупкое разрушение прервалось.

Как для нас заманчиво самоторможение быстрой трещины, ведь это подлинное ее самоубийство! К сожалению, трещина — зло слишком самоуверенное и самолюбленное, чтобы «покончить с собой». Поэтому учинить над ним «расправу» — дело наше. И для этого можно использовать тот же самый рычаг — тепло. Но тепло, сознательно привнесенное в разрушение извне.

Действие повышенной температуры на трещину благотворно по многим причинам. Прежде всего потому, что растет вязкость металла, способная погасить скорость разрушения. Кроме того, трещина как разрыв сплошности заметно меняет тепловой поток, распространяющийся в металле от внешнего источника. Это приводит к изменению распределения температур в ее вершине и термическим напряжениям. Вся проблема достаточно сложна.

Попробуем же, не вдаваясь в серьезный математический анализ, необходимый для ее решения, понять простейшую природу влияния разорванного температурного

потока. Суть проста: трещина плохо пропускает тепло. Поэтому на ее берегах различная температура. Но ведь при нагреве металл расширяется. Следовательно, берега трещины расширяются по-разному. И эти два различных тепловых удлинения «встречаются» в единой вершине трещины. Если бы трещина вела себя как биметаллическая пластина, используемая в газовых колонках, то ее берега изогнулись бы. При этом пластина с большим тепловым расширением изогнулась бы сильнее другой, а вся биметаллическая пластина превратилась бы в запятую. Но трещина не тонкая пластина, она лишь часть массивного материала. Следовательно, она стремится изогнуться, а весь материал ее не пускает. В результате в массиве тела с трещиной возникают так называемые термоупругие напряжения. Они сложным образом взаимодействуют с напряжениями, возникающими в результате нагрузки приложенной извне. Эта ситуация при некоторых условиях способна формировать разрушение, но при других — притормаживать его. Задача лишь в том, чтобы эти условия найти и использовать.

Рассмотренный случай привел бы к тому, что трещина отклонилась бы от источника тепла. Может, однако, случиться и обратное. Пусть источник тепла находится далеко от трещины. Настолько далеко, что поверхность трещины не нагревается. Тогда на разрушение влияют только термоупругие напряжения, всегда окружающие источник тепла. Механизм их прост. Источник нагревает близлежащий участок металла и расширяет его в радиальном направлении. Трещина, расположенная по касательной, оказывается сжатой. В этом направлении она уже не может расти и вынуждена «изворачиваться». Но как? Вспомним, что стакан с горячей водой расширяется. Точно так же расширяется материал вокруг источника тепла. При этом по образующей цилиндра с нагретой сердцевиной в материале возникают растягивающие напряжения, стремящиеся его разорвать. Трещина, как известно, большая любительница растягивающих напряжений. Вот она и устремляется к месту нагрева, жадно поглощая свою пищу — поле растягивающих термоупругих напряжений.

Прямой эксперимент показывает, что трещина, распространяющаяся вблизи источника тепла, как правило, резко поворачивает к нему, вклинивается в оплавленную зону и останавливается.

Дополнительные возможности создают и источники отрицательных температур. Здесь трещина отклоняется от зоны охлаждения, а темп ее движения возрастает. Располагая точки нагрева в определенном порядке, скажем шахматном, так, чтобы их поля напряжений перекрывали друг друга, можно произвольно менять траекторию распространения разрушения и «уводить» его в любом заданном направлении. Можно притормаживать движение трещины, полностью его останавливать, а при желании и ускорять.

А можно ли использовать все это для торможения быстрой трещины? Да, можно. И вот как. Прежде всего на пути разрушения, происходящего со скоростью в 1000—2000 м/с, можно создавать стабильные температурные поля. Если трещина идет в направлении повышения температур, то рано или поздно она останавливается. Можно, однако, поступить и по-другому. Не создавать температурных полей заранее, а ждать, когда в этом районе возникнет разрушение или к нему подойдет трещина. И тогда...

Можно ли тогда включить электрическую спираль, нагреть ее и создать температурное и термоупругое поле в металле? Можно. Но к тому времени, когда мы успеем все это сделать, разрушение уже давно завершится. Время здесь измеряется в милли- и микросекундах. Значит, нагрев должен быть молниеносным, импульсным. Сегодня его осуществляют с помощью так называемых взрывающихся проволочек. Через тонкую проволочку или фольгу пропускают мощный разряд электрического тока от батареи конденсаторов. Джоулево тепло, образующееся в тонком проводнике, настолько велико и выделяется за столь короткое время (десятки микросекунд), что проводник «не выдерживает» и взрывается. При этом развивается давление в десятки тысяч атмосфер, температура достигает десятков тысяч градусов. Представьте себе, что такая проволочка взрывается непосредственно перед стремительно распространяющейся трещиной. До этого трещина «бежала», подгоняемая растягивающими напряжениями, легко «рвала» металл.

...Но молнии проволочка каленая
Черную тучу прожгла...

(Л. Озеров)

Вершина трещины сразу оказалась в очаге взрыва, где на нее почти одновременно действовали ударная волна,

термоупругие напряжения и пластичность нагретого, а потому легко текучего металла. В результате за 10—15 мкс трещина растеряла свою скорость, составляющую 1000—2000 м/с, затупилась и застряла. Таким же образом можно и отклонить трещину от ее основного направления, то есть можно управлять ею.

Конечно же, взрыв проводника не улучшает качество металла — он и наклепывает его, и создает в нем микроразрушения. Но трещину он все же тормозит, разрушение останавливает.

Имеем ли мы право на такое привлечение зла для победы над другим, горшим злом? Думаю, что да. Ведь ценой этого локального повреждения мы спасем целую конструкцию! Вот и получается, что в данном случае устарел «тезис» Петрарки:

Огонь огню предела не положит..

Вспомните, для спасения от другого бедствия — лесного пожара—создают встречный вал огня. Почему же не воспользоваться этим методом как «противоядием» против разрушения?

ТРЕЩИНЕ ПОЛЕЗНО ВОЛНОВАТЬСЯ

Стремите, волны, свой могучий бег!

Д.-Г. Байрон

В одном из кинофильмов рассказано, как пытались остановить буровзрывные работы в горном районе, которые могли испортить трещинами ценные монолиты гранита и мрамора. Ясно, что прорастание трещин здесь вызывалось бы упругими волнами, возникшими в очаге взрыва и распространявшимися от него на большие расстояния. Нас это не удивляет/Ведь при каждом взрыве вулкана возникающие волны способны многократно огибать земной шар и приводить, порой, к невероятным разрушениям. Понятно поэтому, что упругие волны способны не только вызывать появление трещин, но и решительным образом влиять на характер их распространения.

Какие же упругие волны существуют? Обычно различают волны продольные, поперечные и поверхностные. Кроме того, их делят на два типа. К одному из них относятся стационарные, то есть подлинные волны с многократно повторяющимися гребнями и впадинами. В та-

ких волнах упругие возмущения, идут одно за другим, никогда не прекращающейся чередой:

...За волною —
волна,
точно всадник —
за всадником...

(М. Квливидзе)

В продольной волне такого «непрерывного» типа вещество сжимается в направлении распространения волны. Допустим, что волна падает нормально к плоскости трещины. Ясно, что она будет сжимать берега и тормозить разрушение. А что произойдет, если эта волна пойдет по одному из берегов трещины, вдоль нее, по направлению к устью? Тогда эта часть материала окажется сжатой и трещина будет отворачиваться от нее. Между этими двумя случаями и лежит бездна углов падения волны на трещину. Меняя их, можно широко изменять характер влияния упругих возмущений на распространение быстрой трещины.

Допустим теперь, что волна по-прежнему продольная, но переносит она напряжения растяжения. Тогда при нормальном, то есть перпендикулярном падении на поверхность трещины возникло бы дополнительное растяжение, а разрушение ускорялось. При распространении такой волны по одному из берегов трещина поворачивала бы в эту же сторону. При произвольном угле падения трещина ориентируется всегда нормально к направлению волны растяжения.

Обратимся далее к поперечным стационарным волнам. В них возникают поперечные сдвиговые напряжения. Поэтому в подавляющем большинстве случаев волны эти так или иначе разворачивают разрушение.

Итак, все стационарные волновые явления активно влияют на движение трещины и способны не только тормозить и ускорять ее, но и переориентировать по своему желанию.

Многokrатно вводя энергию в окрестности вершины разреза, волна способна за длительное время контакта не только изменить поле напряжений, но и самым решительным образом — траекторию разрушения.

Особенно преуспевают в этом поверхностные волны, распространяющиеся в плоскости самой трещины. Мы уже говорили, что они с увеличением расстояния ослабляются меньше, нежели продольные и поперечные. Кро-

ме того, волна, идущая по трещине, как по волноводу, подводит всю свою энергию прямо к вершине в отличие от продольных и поперечных, подходящих к устью трещины лишь частью своего фронта. Следовательно, коэффициент полезного действия поверхностной волны выше. Как же реагирует трещина на появление в своей вершине рэлеевских волн? Если эти волны бегут «ноздря к ноздре» по обоим берегам трещины, разрушение ускоряется в своей плоскости. Иное дело, если волна «струится» по одному из берегов. В ней точки колеблются в плоскости, нормальной к поверхности трещины. При этом каждая из них движется по эллипсу точно так, как перемещаются они в волне на поверхности воды. Ведь никого не удивляет, что море выбрасывает предметы на сушу. Если бы точки двигались только вверх и вниз, этого не случилось бы. Поэтому в рэлеевской волне возникают сдвиговые напряжения под прямым углом к скорости трещины. Опыт, проведенный И. С. Гузем и автором этой книги на трещине, скорость которой составляла 1 км/с, подтвердил разворот на $80-85^\circ$.

Было бы упущением не упомянуть здесь о волнах еще одного вида — изгибных. Они наиболее часто образуются в твердых телах. Именно такого рода нагружению подвергаются различные части летательных аппаратов, стрелы подъемных кранов, детали мостов и машин. Все волны, рассмотренные нами ранее, повышали концентрацию напряжений в вершине трещины. Иное дело изгибные. Они способны понижать напряжения в устье и таким образом тормозить трещины. Вместе с тем, подобно поперечным упругим колебаниям, изгибные волны отклоняют разрушение от первоначальной траектории и разворачивают трещину.

На практике очень часто волновые явления обладают достаточно высокой интенсивностью и способны ощутимо влиять на зарождение и распространение трещины. Так, разрушение авиационных конструкций хвостовых частей самолета часто наступает под действием мощных шумовых и звуковых потоков, возбуждаемых двигателями.

М. Булгаков в романе «Мастер и Маргарита» описывает следующую фантастическую картину: «— Мессир, поверьте, — отозвался Коровьев и приложив руку к сердцу, — пошутить, исключительно пошутить... — Тут он вдруг вытянулся вверх, как будто был резиновый, из

пальцев руки устроил какую-то хитрую фигуру, завился, как винт, и затем, внезапно раскрутившись, свистнул. Этого свиста Маргарита не услышала, но она его увидела в то время, когда ее вместе с горячим конем бросило саженой на десять в сторону. Рядом с нею с корнем вырвало дубовое дерево, и земля покрылась трещинами до самой реки».

Диапазон упругих частот, генерируемых в конструкциях современного реактивного самолета, простирается от инфразвуковых (измеряемых считанными герцами) до ультразвуковых (исчисляемых миллионами герц). Последствия страшны: выходит из строя обшивка руля высоты, что является прямым следствием шумов, создаваемых струей ракетного ускорителя. В американской печати отмечалось, что длительное время в ракете «Титан», построенной в США, появлялись подобные разрушения, также связанные с мощными шумами.

Для англо-французского сверхзвукового самолета типа «Конкорд» максимум звуковой интенсивности приходится на диапазон 100—1000 Гц. При этом в хвостовой части фюзеляжа преобладает участок спектра 100—250 Гц. Интересно, что при испытании самолетных конструкций применяют громкоговорители большой мощности со специальными рупорами; на «подопытные» объекты воздействуют звуком тысячи и тысячи часов — до полного разрушения металла. При этом используют то обстоятельство, что трещина реагирует на множество колебаний различных частот и особенно на резонансную частоту, зависящую не только от особенностей самой конструкции, но и от длины трещины. Оказалось, что эти резонансные частоты и находились в области особой чувствительности 100—250 Гц.

Все эти примеры интересны не потому, что шумы способны разрушить даже металл. Как раз наоборот, мы стремимся выяснить, как использовать упругие волны различной природы для сознательного управления траекторией быстрой трещины. Как с их помощью затормозить разрушение? Годны ли для этого стационарные, упругие волны? К сожалению, на практике их не используешь. И вот почему. Представьте, что перед нами какая-нибудь металлическая конструкция. Ее покой чутко охраняют своеобразные сторожа — акустические, электромагнитные или другие приборы. Но вот внезапно в каком-то ее месте возникла трещина. Она немедленно

подает голос и датчики «службы безопасности» ее засекают. Привлекая небольшие вычислительные устройства, они определяют не только местонахождение трещины, но и направление, и скорость движения. Затем подают импульс — «сигнал бедствия». По этому сигналу должны сработать миниатюрные взрывные устройства и послать упругие волны на устье трещины. Большим ли запасом времени располагают эти устройства? Да его почти что и нет. Всего-навсего 1—5 мкс. За это мгновение много периодов волн не пошлешь. Значит, это должен быть упругий импульс, а не периодическая волна. Он обрушивается на трещину в заданном месте под определенным углом.

Что же происходит при этом с трещиной? У нее должно остаться лишь две «возможности»: либо остановиться, либо изменить траекторию в том направлении, которое нужно нам. Конечно, хорошо прервать разрушение. Ведь это означает исключение катастрофы, бесценный выигрыш времени для ремонта и восстановления несущих свойств конструкции. Но разве остановленная трещина не начнет расти вновь? Может и начать, но ей надо разогнаться, а для этого получить немалую порцию энергии извне. Желательно, чтобы концентрация напряжений в вершине остановленной трещины была уменьшена до предела. Этому помогает следующее. Когда заряд тринитротолуола взрывается, он выбивает в материале небольшое отверстие, порядка нескольких миллиметров. Напряжения, создаваемые вокруг него, таковы, что проходящая мимо трещина в результате атаки ударных волн заворачивает на очаг взрыва и останавливается на нем. Это очень удобно, потому что теперь радиус при вершине трещины огромен и расти при напряжениях, существующих в детали, она больше не сможет.

Другой вариант в этом отношении, пожалуй, лучше. Допустим случилось так, что волны развернули трещину в обратном направлении или «завили» ее в окружность или спираль. Такое разрушение не сможет прогрессировать потому, что напряжения в его вершине будут определяться кривизной его траектории, а не острой вершины трещины. Образец с такой трещиной окажется не менее прочным, чем совершенно целый. Он может успешно послужить еще некоторое время.

Что же происходит с металлом, когда на нем взрыва-

ется заряд тринитротолуола или другого взрывчатого вещества? Конечно, возникающие при этом упругие волны остановят трещину, однако, они неизбежно повредят конструкцию, внесут в нее новые отверстия, зародышевые микротрещины и многие другие дефекты. И все же другого пути нет, ведь вся конструкция находилась в состоянии агонии. Не останови мы трещину, разрушение было бы неизбежным.

Быть может прав был испанский поэт Луис де Гонгора и Арготе: «...и только адом побеждают ад».

ТРЕЩИНА И ШАХМАТЫ

Соверши доброе дело: столкни зло со злом.

Виктор Жемчужников

Мы уже говорили о том, что трещина не любит одиночества. Как правило, в металлах существует великое множество трещин, образующих огромные «коллективы». В отдельности каждая из них может быть малозначительной. Но едва ли не каждая мечтает стать «генералом», то есть магистральной. И тогда она расправляется со своими собратьями двумя способами: поглощает их при своем росте или, снижая напряжения в окружающем пространстве, заставляет их «схлопываться», а то и вовсе исчезать. Нечего сказать — милое и кроткое существо!

В этой главе мы попытаемся рассмотреть все возможные методы, все идеи и соображения, наконец, даже самые мимолетные упоминания о том, как же все-таки справиться с разрушением. Поэтому не будем беспечны и подберем все зернышки, все крупички надежды, сопутствующие этой проблеме.

Коллектив трещин, конечно же, ослабляет тело. Разумеется, было бы лучше без трещин, чем с ними. Но коль скоро отсутствие их в металле, к сожалению, исключено, посмотрим, нет ли каких-либо возможностей расположить их так, чтобы обращенное друг против друга их взаимное зло было как-то погашено. Не окажется ли внутреннее взаимодействие в такой системе трещин маленькой компенсацией за большое несчастье? Вопрос сводится таким образом к следующему: больше ли ослабляет тело коллектив трещин, нежели одиночная трещина? Не может ли оказаться, что система из многих

трещин окажется «скованной» и неспособной быстро разрушить конструкцию. Наконец, не «заинтересована» ли прочность в том, чтобы уже если иметь врагов, так много? Тогда они помешают друг другу справиться с ней.

По-видимому, надежды эти совсем не случайны. Когда-то академик Я. Б. Зельдович предсказал, что при шахматном расположении трещин должно наблюдаться их взаимное упрочение.

Теоретики-механики взялись за решение этой задачи и в последние 20 лет получили очень интересные и наглядные результаты. В. В. Панасюк и Л. Т. Бережницкий нашли, что выстроенные в хвост друг за другом трещины ослабляют тело, понижают его прочность. Поэтому такие системы крайне опасны и их надо всячески избегать. Заключение, полученное для случая неподвижных трещин, в еще большей степени справедливо для трещин растущих потому, что такие разрезы очень легко объединяются.

Совершенно другое дело — системы из параллельно расположенных трещин. Их рассчитывали В. З. Партон и В. В. Панасюк со своими учениками. Прежде всего оказалось, что определенное взаимное расположение трещин приводит к стабилизации, то есть устойчивости каждой из них в отдельности и системы в целом. И связано это с интенсивным взаимодействием упругих полей трещин друг с другом. Поэтому при малых расстояниях между трещинами, когда они теснейшим образом слиты, эффект упрочнения оказывается наибольшим. При этом прочность тела с системой трещин, безусловно, выше, чем с одиночной трещиной.

Интересно, а подтвердилось ли предположение академика Я. Б. Зельдовича? И да, и нет. Действительно, система параллельных трещин предпочтительнее, чем одиночная. Однако, что касается шахматного порядка их расположения, как наиболее оптимального, то здесь появилось «но»... Выяснилось, что этот порядок не обеспечивает максимальных прочностей. Гораздо прочнее металл, в котором трещины выстроены параллельными рядами и располагаются строго одна над другой. Вероятно, таких рядов может быть много, но они расположены не в шахматном порядке, а скорее как солдаты, выстроенные в каре.

Ну, а если в системе трещин расстояние между ними

велико? Тогда взаимодействие трещин мало, а прочность такого объединения еще ниже, чем у одиночной трещины. Поэтому такое скопление, конечно, нежелательно.

Подобные соображения помогли ученым ФРГ разработать прочный керамический материал для изготовления турбинных лопаток. Основой этой керамики являются оксиды циркония и оксиды алюминия. После прессовки их спекают при 1500 °С. В результате последующего быстрого охлаждения возникают чрезвычайно мелкие трещины диаметром в миллионные доли сантиметра. Эти-то микротрещины впоследствии и гасят напряжения от ударных нагрузок и препятствуют зарождению больших трещин в керамике.

НАДЕЖДА-МОЙ КОМПАС ЗЕМНОЙ

Свет— и ничего другого...

Б. Окуджава

Дорогой читатель! В первой половине книги мы посеяли семена нашего понимания природы разрушения. Теперь, когда они взошли и уборка в разгаре, нам нельзя потерять ни одного зернышка, ни одного колоска надежды на усмирение трещины. Ведь это не просто наша прихоть, а насущная потребность мира машин, механизмов и конструкций, от которых зависит наше существование, а порой и наша жизнь.

Крупницу оптимизма можно отыскать и в таком, казалось бы, безысходном процессе разрушения, каким является ветвление. Множественный распад трещин превращает некогда монолитный металл в грудку осколков и не оставляет никакой надежды «выцарапать» из этого безжизненного хаоса что-то полезное. Однако если ветвящаяся трещина одна, а в металле она часто бывает одиночной, то тогда...

Тогда нам нужно вспомнить, что после каждого эпизода ветвления трещина моментально теряет свою скорость, а иной раз и вообще останавливается.

Нельзя ли использовать это обстоятельство и влиять на ветвление каждый раз, когда это нужно?

Но прежде всего, когда это выгодно? Тормозить трещину таким образом в закаленной стали, например, явно нецелесообразно. Затормозившись после ветвления, трещина моментально разгонится вновь в таком мате-

риале. Уж очень хрупок металл и велики ускорения разрушения из-за больших внутренних напряжений. Совершенно другое дело обычная незакаленная сталь. Или сталь, прошедшая после закалки отпуск. В ней внутренние напряжения относительно малы. Вязкость металла велика и энергия, необходимая для разгона трещины, на один—два порядка выше, чем в закаленной стали. Поэтому, если в такой стали осуществить насильственное ветвление, то потерявшая скорость трещина не сможет восполнить запас своей кинетической энергии за счет внутренних напряжений металла. С другой стороны, трещине понадобится много энергии для разгона, которую она вынуждена будет черпать из резервуара упруго нагружающей системы. А для этого нужно немало времени.

По существу мы использовали известный безжалостный принцип самбо: падающего — толкни, нападающего — тяни. Для остановки быстрой трещины мы заставили ее размножиться и создать вместо одного разрушения целый куст. Конечно же, при этом мы заплатили невероятную цену: чтобы остановить надвигающуюся катастрофу, мы заложили основы для двух новых в будущем. Но это в будущем. А сегодня... Сегодня в нашем арсенале методов торможения появился еще один.

Этот метод, каким бы спорным и сложным он не оказался впоследствии, открыл еще одно окошко в весенний мир надежды, хотя дело обстоит далеко не просто.

Быстрая трещина представляет собой систему неустойчивую. Её склонность постоянно «рыскать» из стороны в сторону, ее «беспринципность» — безынерционность — обостряются по мере возрастания скорости распространения. При режимах, близких к ветвлению, эти процессы делают трещину «легко ранимой», уязвимой по отношению к любому динамическому воздействию извне. Совсем не обязательно, чтобы оно было большим по мощности и силе. Ведь когда система неустойчива, нетрудно вывести ее из равновесия. Для возникновения ветвления достаточно даже слабое воздействие.

Поэтому проблемы ветвления связаны не с тем, будет оно тормозить трещину или нет. Это бесспорно. Главное заключается в том, как это сделать. Простейший путь — взаимодействие трещины с импульсом сжатия.

Когда-то в античной трагедии развязку, которую трудно

было решить обычными традиционно человеческими средствами, драматурги осуществляли методом, известным под названием *Deus ex machina* («Бог из машины»). Буквально это означало вмешательство кого-нибудь из богов, прибывших на сцену с помощью механического приспособления. В роли такого *Deus ex machina* способен в нашем случае выступить упругий импульс сжатия, направленный нормально или под углом к трещине. В этом единоборстве импульс всегда побеждает, потому что нестабильной трещине многого и не надо и «укус пчелы» — импульс — почти с неизбежностью изменяет траекторию трещины и ведет к мгновенному ветвлению.

Таким или каким-либо другим импульсным методом нетрудно нарушить стабильность быстро и катастрофически растущей трещины, заставив ее тем самым разветвиться и потерять скорость. Проведенный несколько раз последовательно такой процесс на расстоянии в несколько миллиметров и сантиметров позволил бы остановить любую трещину.

Ну что ж — остановили мы разрушение. Но в металле — целая метелка трещин.

Что же ждет эту конструкцию в будущем? Ведь ее «жизнь» — искусственно созданное нами существование, продленный эпизод. Это жизнь, в которую разрушение проникло настолько глубоко, что надеяться на нее нельзя — конструкция «едва дышит».

К счастью, в этом случае мы располагаем одним весомым аргументом, позволяющим утверждать, что все-таки шансы на «спасение» есть и немалые. Дело в том, что для разгона трещины надо затратить энергию на пластическую деформацию в ее вершине. Оказалось, что при малых скоростях пластичность велика, но с ростом скорости она быстро падает (примерно обратно пропорционально квадрату скорости). Поэтому, если трещину посредством ветвления притормозить или остановить, усилия для ее дальнейшего продвижения будут нелинейно велики. Тем более что в одном районе уже будет не одна трещина, а две-три. Для их роста теперь понадобится энергия, во много раз превышающая ту, при которой росла одиночная трещина до ветвления. Такой энергии в системе может не оказаться, и тело с метелкой трещин окажется достаточно прочным, чтобы выдержать некоторое время до создания условий, пригодных для ремонта конструкции. Конечно, мы предпочли

бы монолитное крыло самолета, а не систему трещин. Но что же делать, коль скоро разрушение началось? Для предотвращения беды, видимо, все средства хороши. И мы в этой ситуации мало чем отличаемся от неизвестного генерала, победная реляция которого звучала так: «У нас не оказалось белого флага и мы вынуждены были победить».

НЕПРАВИЛЬНОСТИ ДЕЙСТВУЮТ ПРАВИЛЬНО

**И зло в тесноте сражений
Побеждается горшим злом...**

М. Волошин

Все методы и средства, которые мы рассматривали до сих пор как инструменты торможения разрушения, объединены одним — они макроскопичны. Кроме того, по существу мы совершали насилие над металлом, останавливая в нем трещину упругими волнами, температурными и упругими полями, наконец, другими трещинами. Единственным исключением были композитные материалы. Мы «дали им право высказаться», чтобы услышать «мнение» самого материала. Но, конечно же, оно было неполным, потому что обычные металлы не приняли участия в дискуссии. Между тем их «взгляды» далеко небезразличны нам. Ведь у кристаллов есть свои возможности торможения трещин. Свои резервы. И немалые. Что же может противопоставить кристаллический материал трещине? Свою прочность? Да, но это слишком собирательный и потому ничего не выражающий термин. Свою пластичность? Безусловно! — но уж слишком это общо.

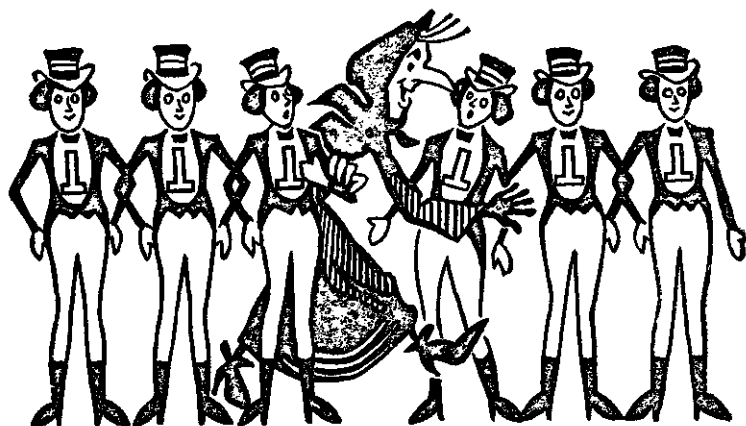
Подлинное, «искреннее самовыражение» металла в его отношении к разрушению проявляется в тех реальных барьерах, которые он может выставить на пути разрушения. Образно говоря, каких солдат, какие полки и дивизии способен противопоставить металл наступающей колонне вражеских трещин? Этим войскам самообороны металла являются шеренги и скопления его дефектов. Состоит эта армия из солдат — дислокаций. Именно они, эти воинские группировки металла, должны принять на себя первый удар зарождающейся, а потом растущей трещины.

Итак, внутренние дефекты материала — вот основная



надежда его на прочность. Обратимся к королеве дефектов — дислокации. Мы помним, что существуют дислокации-сестры—краевые и винтовые. Опыт показал, что отдельная краевая дислокация и трещина совершенно безразличны друг к другу.

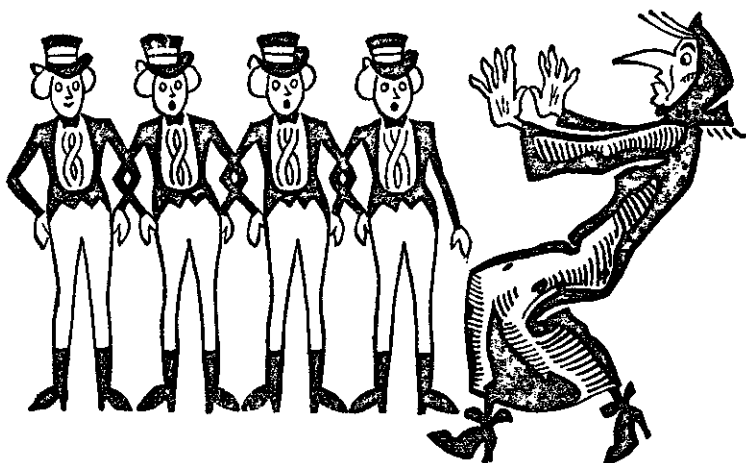
Они взаимно холодны и тогда, когда трещина пересекает краевую дислокацию. Совсем по-иному складываются отношения разрушения с винтовой сестрой. Дело в том, что эта дислокация закручивает кристалл в спираль. Значит, каждая кристаллографическая плоскость превращается тоже в спираль. Не избегает этой судьбы и плоскость разрушения. А там, где есть спираль, появляется и порог, соединяющий части плоскости с различным уровнем. Как говорят физики, при взаимодействии трещины с винтовой дислокацией возникают ступеньки. Но это — лишняя поверхность, а следовательно, дополнительная поверхностная энергия. Для образования ступеньки трещина вынуждена заимствовать упругую энергию из «банка», председателем и учредителем которого является разрушающая сила. Значит, преодоление трещиной винтовой дислокации требует дополни-



тельных усилий, хотя и очень малых. Если на пути раз* бойницы-трещины встречается одна винтовая дислокация, то она, конечно, не сможет оказать достойного сопротивления. По-иному обстоит дело, если дислокаций легионы. Тогда они превращают парадное шествие трещины в судорожные скачки с ухаба на ухаб. Для преодоления сопротивления миленьких, но многочисленных противников трещина вынуждена тысячи раз обращаться в «банк» за субсидиями. Между тем возможности «банка» ограничены. И запасы валюты — энергии — у него скудеют. При достаточно большом числе винтовых дислокаций рано или поздно наступит момент, когда банк обанкротится и трещина, в мгновение ока, потеряв свою ретивость, остановится — она ведь всегда живет в кредит.

А много ли для этого нужно дислокаций? К сожалению, неисчислимо много — миллиарды, миллиарды и миллиарды. Далеко не всегда такое количество их имеется в распоряжении металла. Поэтому слишком надеяться на этот вариант торможения трещин в металле не следует, хотя свою положительную роль он, безусловно играет.

У нас могло сложиться впечатление о «трусости» краевой дислокации — ведь она «уклоняется» от боя с трещиной. Да, но только потому, что мы потребовали от нее сражаться определенным видом оружия, скажем, на рапирах. Между тем она сильна в другом: ее коронный номер — «классическая борьба». Каждая краевая

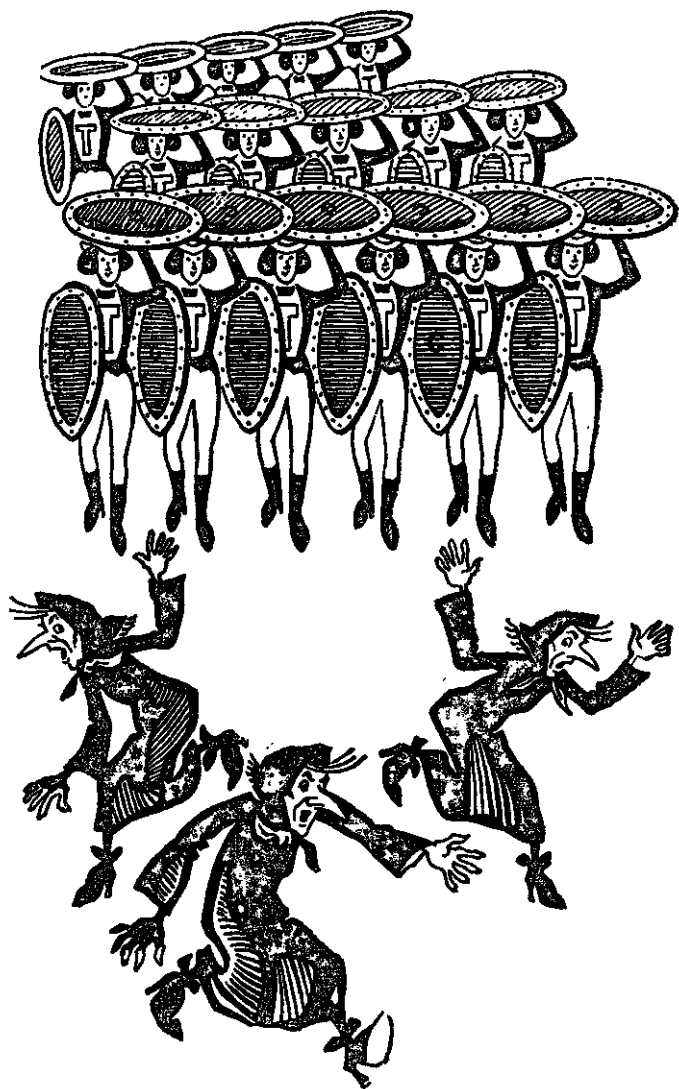


дислокация создает в окружающем ее пространстве упругие поля сжатия и растяжения. Первого трещина боится, второе любит. Поэтому, если краевая дислокация повернется к трещине своим щитом — полем сжимающих напряжений — трещина вынуждена будет приостановиться. Однако, так же как ее сестра — винтовая дислокация, краевая с таким хищником как трещина в одиночку не справится. Совсем по-другому протекает «раунд» с трещиной, когда краевые дислокации объединяются, противопоставляя опасности свою коллективную силу. Тогда они способны создавать обширную линию обороны, на всем протяжении которой существует мощное поле сжимающих напряжений. Обойти его трещине не удастся, она вынуждена взаимодействовать с ним, серьезно притормаживая. Помните А. Межирова?

Встали в ряд. Поперек дорога
Перерезана. — Тормози.

Какие же объединения дислокаций имеются в виду? Прежде всего, дислокационные границы.

Хорошо известно, что простейшая такая граница — это вертикальный ряд краевых дислокаций. Расстояние между дислокациями, стоящими в затылок друг к другу, тем меньше, чем на большие углы развернуты кристаллы по обе стороны границы. Сплотившие свой ряд дислокации напоминают строй римских воинов — черепахи. Сплошной массив из щитов с частоколом копий встречает враг. Примерно так же окружают себя дисло-



кации стеной полей сжатия, слившись в один ковер. Да еще в два ряда. На расстояниях в 1000 мкм образуется поле внутренних напряжений, возникших при кристаллизации различно ориентированных зерен, а вблизи самих дислокаций — собственное упругое поле, простирающееся всего на несколько межатомных расстояний.

Даже такая однородная граница между субзернами в монокристаллическом материале способна влиять на медленную трещину. Но задержать быструю она не может. Зато в поликристаллической стали зерна развернуты столь капитально, что иногда представляют собой множество подобных рядов. Если угол, составляемый соседними зернами, достигает 30° , такая граница непобедима, пробиться через нее трещина не в состоянии.

Параллельные ряды «римских черепашек» останавливают трещину, идущую с любой скоростью и питающуюся любой упругой энергией. Если граница имеет винтовую природу (граница скручивания) и «сооружена» из винтовых дислокаций, то она еще прочнее. Понятно: ведь помимо того, что работают упругие поля дислокационных стенок, любой прорыв сопровождается возникновением ступеней, а это — дополнительные потери энергии. Поэтому уже 20-градусная винтовая граница — барьер совершенно непреодолимый для разрушения.

Вот как обстоят дела, когда мы проводим опыты в лаборатории с единственной границей между двумя кристаллами. Физики называют такую пару бикристаллом. Но в повседневной практике все сложнее — ведь сталь в конечном итоге неизбежно разрушается трещиной. А реальная сталь — это десятки и сотни тысяч, кристаллов. Каким же образом происходит «разгром» детали? Как

...Сквозь леса из кристаллов
он держит свой путь
напролом?..

(В. Шефнер)

Прежде всего разориентированы эти тысячи кристаллов по-разному. Огромное их количество едва развернуто по отношению друг к другу. Многие — на большие углы. Для такого опытного разрушителя, как трещина, возникают неограниченные возможности. Допустим, в этот момент ее противник — малоугловая граница. Прорыв происходит относительно легко, а раскол выходит на широкоугловую. Удар, еще атака... Прорыв не удал-

ся. Но трещина находится под непрерывным давлением внешних напряжений. Если она медленная, то у нее есть время для «артподготовки». Она начинает деформировать металл в своей вершине, насыщает его дислокациями, меняет его структуры, разворачивает кристаллиты перед собой и в конечном итоге прорывается через изувеченный материал. Если времени у нее нет, она поступает по-другому. Быстро разворачивается и идет к другой границе кристаллита, более удачно ориентированной. Мы уже говорили о «беспринципности» трещины — огромной ее маневренности и способности легко менять свою траекторию. Именно это она и делает. Своеобразный метод проб и ошибок. Быстро «накапливая» опыт, который по выражению восточного мудреца чаще всего — дитя ошибки, трещина находит уязвимое место в обороне поликристалла и прорывает одну его границу за другой. Конечно, трещина не только не существо, но даже и не вещество; поэтому говорить о каком-то гуманоидном опыте можно лишь в риторическом смысле. Физически это выглядит примерно так. Встретившись с барьером и не пробив его, трещина вынуждена развернуться и перейти на ближайшую по углу плоскость спайности кристалла. Происходит что-то вроде того, как если бы вы слишком сильно нажали на перо. Оно бы изогнулось, потеряв устойчивость. Так же изгибается и трещина, но на вполне определенный угол. Теперь уже она давит на другой участок границы. Иногда в удачном для нее месте произойдет прорыв. В неудачном — очередной разворот. Трещина как бы прощупывает различные участки границы, пока не находит самый уязвимый. В конечном итоге статистика (муза итогов!) оказывается иногда на стороне торжествующего разрушения. Уж очень прочен стальной массив. Много в нем малоугловых лазеек для трещины.

Вот бы перекрыть их! В этом отношении немалые надежды подают нам точки, где сохраняются воедино границы трех зерен. Они оказываются крепкими орешками для любой, в том числе и для предельно быстрой трещины. Причин этому несколько. Прежде всего тройной стык — это три «вертикальных» ряда дислокаций, сошедшихся в одну точку. Надо сказать, что до сих пор мы не знаем, что происходит в этой самой точке. Какovy там перемещения атомов, что произошло с кристаллической решеткой? Поэтому нельзя сказать что-либо определенное

о природе взаимодействия трещины с самим тройным стыком. Зато ясно, что происходит при малейшем удалении от геометрической точки стыка. Тройной узел окружен двумя сортами напряжений. Термическими и упругими — от собственно дислокаций в стенках. И те, и другие гораздо больше, чем у простой границы. И что немаловажно, они простираются значительно дальше. Например, поля напряжений от дислокаций занимают в 10 раз большее пространство, чем у обычной стенки. Неудивительно, что напряжения эти, начиная действовать раньше, вызывают больший эффект торможения. Но это не все. Поле напряжений в окрестностях узла настолько сложное, что трещина, привыкшая в обычном монокристалле к расположению только по плоскости спайности, здесь «теряет свое лицо». Она распадается на множество мельчайших трещинок, способных размещаться даже не в спайности! Она вынуждена круто разворачиваться, описывать криволинейные пути, ветвиться. Словом, от монолитной трещины мало что остается. В этих условиях трещина, испытывающая, по выражению О. Мандельштама, «голод по рассеченному пространству», превращается из хищника в жертву. Она напоминает впервые оседланного дикого мустанга, взмыленного, мчащегося в облаке пыли по кругу. Он еще надеется разорвать удила, но уже навсегда потерял свободу. В нем еще буйствует сила разрушения и зла, но он уже неспособен обрушить ее на людей.

Неудивительно поэтому «повальное» торможение трещин на стыках трех зерен. Вот только относительно редко «напарывается» трещина на сам стык. Чаще, гораздо чаще она проходит стороной и не испытывает на себе его влияния.

Однако дислокации могут выстраиваться не только в затылок друг к другу. Они не прочь стоять и шеренгами «плечо к плечу», словно бы крепко взявшись за руки. Так, они расположены в плоскостях скольжения. Экстраплоскости всех этих дислокаций направлены зачастую в одну и ту же сторону. Иначе говоря, они могут быть одного знака. В этом случае по одну сторону плоскости скольжения преобладают напряжения сжатия, а по другую — растяжения. Ясно поэтому, что если трещина подходит к полосе скольжения со стороны сжатия, она обязана притормаживаться. В противном случае может и ускориться. Однако, пройдя такую полосу, трещина

опять попадает в область сжатия... Опыты показывают в целом благоприятное тормозящее влияние полос скольжения любой ориентации на трещину. Разрушение, как и в случае межзеренных сочленений, теряет монолитность и распадается на множество мельчайших трещинок, поворачивает вдоль полосы и распространяется параллельно ей. А в отдельных случаях способно даже поворачивать назад! Чтобы прорвать полосу скольжения, трещине совершенно необходимо занимать и тратить упругую энергию.

Трещина гибельна лишь для одной или нескольких полос скольжения. Системы, содержащие десятки и сотни полос, ее не боятся и способны остановить. Особенно устойчивы пачки, состоящие из пересекающихся полос скольжения. Здесь образуются настолько мощные поля сжимающих напряжений, что даже закритическая трещина часто не в состоянии их преодолеть.

В 1934 году советские физики Н. А. Бриллиантов и И. В. Обреимов обнаружили в кристаллах NaCl области с очень большим разворотом кристаллической решетки и назвали их иррациональными двойниками. Вокруг этого термина разгорелась дискуссия, потому что выяснилось: с двойникованием эти дефекты не имели ничего общего. В. Л. Инденбом и А. А. Урусовская доказали, что «двойники» Бриллиантова—Обреимова связаны с пластической деформацией. Дислокационные процессы лежат в корне этого дефекта. Выяснилось, что из-за неоднородности напряженного состояния поперечное сечение кристалла деформировалось неодинаково. В результате множественных сдвигов образовался взаимный разворот смежных областей кристалла на углы в несколько градусов. Возникающая при этом дислокационная структура в некотором отношении подобна структуре, образующейся при одновременном сдвиге по различным пересекающимся плоскостям скольжения. И опыты, и расчеты показали, что вокруг и внутри полосы Бриллиантова—Обреимова существуют весьма мощные поля сжимающих напряжений. Мы уже знаем, что это дает надежду на тормозящие свойства дефекта. Интересна и такая деталь. Полоса «умудряется» тормозить трещину не только перед собой, но (в случае прорыва) и за собой: что-то вроде приема древних греческих воинов — лечь на землю и, прикрываясь щитами, пропустить вражескую конницу. А затем ударить ей в тыл. Физический же смысл

этого явления здесь понятен. Полоса Бриллиантова—Обреимова создает сжимающие напряжения как впереди себя, так и позади. Неудивительно поэтому, что полосы эти почти не имеют себе равных по влиянию на трещину. Если одна из них задерживает быструю трещину на 20—30 мкс, то две-три останавливают разрушение при любых скоростях его распространения. Говоря о дефектах, способных остановить раскол, нельзя не упомянуть так называемый сброс. Термин этот геологический и означает он смещение одной части поверхности земли по отношению к другой. Причем смещение идет по высоте, и по простиранию, то есть вдоль поверхности. Металло- и кристаллофизики переняли этот термин и придали ему следующий смысл: плоскости скольжения кристалла должны превратиться в плавно изгибающуюся ступеньку.

Как же осуществить это на практике? Очень просто. Пусть на одной половине плоскости скольжения скопятся дислокации одного знака. Тогда плоскость изогнется выпуклостью в сторону «торчащих» экстраплоскостей. А на второй половине плоскости скольжения пусть столпятся дислокации противоположного знака. Очевидно, там кривизна будет противоположной. Так образовались две полочки сброса. Теперь остается соединить их наклонной плоскостью без дислокаций и сброс «готов». Размеры сбросов в кристаллах типа цинка исчисляются миллиметрами. В обычной стали они намного меньше — измеряются десятками и сотнями микрон. Углы разворота материала в полосах сброса могут быть довольно значительными и достигать 30—40°. Плотность дислокаций в сбросе очень велика — до 10 млрд. на 1 см².

Как же взаимодействует такой S-образный сброс с трещиной? По-вражески. Еще на далеких подступах он задерживает трещину, «выставляя» против нее поля сжимающих напряжений. Эти же поля действуют и в сердцеvine сброса. Из-за их чрезвычайной сложности трещина, проникшая в ядро сброса, движется ступеньками, распадается на мелкие трещинки. Часто она останавливается и создает перед собой вторичные дочерние трещины. Потом, объединяясь с ними, проскакивает вперед и так далее. Словом, это не развернутое шествие, а тяжелая работа, требующая большого запаса упругой энергии и времени. Итак, сброс — это серьезное препятствие на пути трещин — и медленной и быстрой.

Пора подвести итог. Что же общего во влиянии на

разрушение со стороны отдельных дислокаций, полос скольжения, межзеренных сочленений, полос Бриллиантова—Обреимова и сброса? Ведь дело не в отдельных, может быть иногда и случайных фактах, событиях, результатах экспериментально. Важно ответить на вопрос: в чем их корень? Корнем этим являются дислокация и ее упругое поле. Причем не растягивающая и сдвигающая его компоненты, а только поле сжатия. Именно оно в первую очередь и сражается с трещиной. Немалую роль играет и сама линия винтовой дислокации.

Следовательно, первые «бойцы», встающие на пути трещины и способные оказать ей сопротивление, — это дефекты кристаллической решетки. Поэтому металл с высоким сопротивлением разрушению должен содержать определенный набор этих неправильностей, расположенных к тому же определенным образом.

Читатель может задать каверзный вопрос: а как же быть с носителями предельной прочности — усами? Или с монокристаллами, начисто лишенными дислокаций?

Боюсь, что ответ будет неутешительным. Образование в таких материалах дислокации или зародышевой трещины затруднительно. Но что касается роста в них уже существующей трещины... Он пойдет очень быстро и легко. Практически разрушение бездислокационных монокристаллов, уж если оно началось, протекает как у весьма хрупкого тела. Это неудивительно, потому что такой амортизатор, как пластическая деформация, отсутствует. Вот уж действительно, в поисках высокого сопротивления растущей трещине нам следует уподобиться персонажу сатирика Ф. Кривина — Жабонугу:

Каждый ищет, где лучше, а Жабонуг ищет, где хуже. Дайте ему соленую воду, дайте ему самую холодную воду или даже горячую воду, и это как раз ему подойдет.

Потому что все ищут, где лучше, а когда все ищут, где лучше, тогда там, где лучше, становится хуже всего. Чтобы найти, где лучше, надо искать, где хуже, — он это понимает, мудрый, опытный Жабонуг»¹.

Вот почему в изобретении способов высокого сопротивления, которые можно было бы противопоставить существующей и растущей трещине, нельзя ссылаться на традиционные бездислокационные материалы с прочно-

¹ Кривин Ф. Самбо. Туда, где хуже//Крокодил. 1974. № 22. С. 14.

стью, близкой к теоретически достижимой. Ибо это было бы решением только одной очень важной, но частной задачи — сдерживания зарождения первичной микротрещины. Но если трещина каким-то образом уже появилась, то теоретическая сверхпрочность мало поможет в борьбе. Ведь концентрация напряжений в вершине такой трещины при отсутствии пластичности легко достигает значений теоретической прочности. Поэтому такая трещина и распространяться будет легко. Чтобы справиться с ней, нужны совершенно иные качества кристалла, в частности необходимы дефекты. В этом несовместимом противоречии прекрасного и ущербного, совершенства кристалла, с одной стороны, и его одновременного несовершенства — с другой, и заключается одна из проблем современного конструирования металлов и сплавов.

И РАЗРУШАЯ, МОЖНО СОЗДАВАТЬ

**И он дерзнул на все — вплоть до небес,
Но разрушенье — жажда созиданья.
И, разрушая, жаждал он чудес —
Божественный гармонии Созданья.**

И. Бунин

Мы уже с вами, читатель, обсуждали, как быть с разрушением, которое нужно остановить. Речь шла о том, чтобы прежде всего обнаружить его с помощью чувствительных приборов, использующих «шумливость» трещины, например акустических датчиков, способных воспринимать ее «пение» в акустическом диапазоне электрических или магнитных устройств, рассчитанных на определение электромагнитного излучения раскола и многих других. Полученные сигналы обрабатывались вычислительными устройствами и подавали команду на взрывы микрозарядов. Возникающие при этом упругие волны обрушивались на устье трещины и тормозили или разворачивали ее. Картина идеальная, но к сожалению, имеющая по меньшей мере один крупный недостаток. Дело в том, что появление трещины, даже на довольно ранних стадиях разрушения, обнаружить можно; но вот точно определить, где она находится и куда движется, совсем не просто.

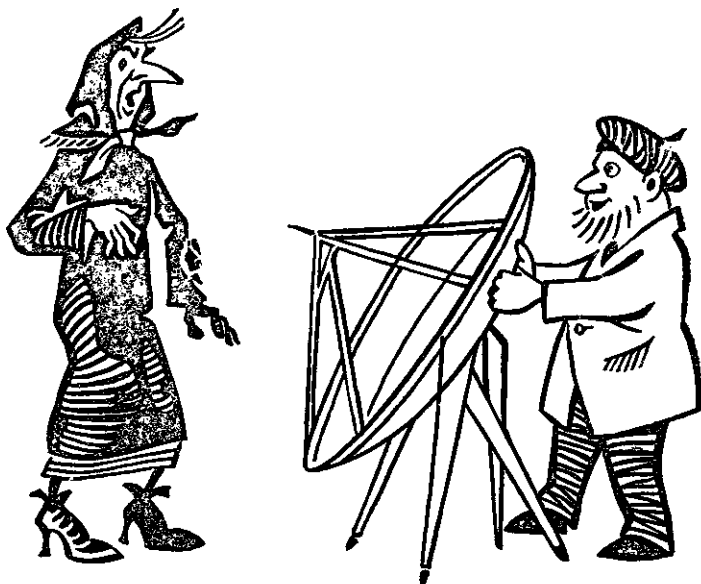
Задача эта очень похожа на перехват современного сверхзвукового самолета. Радары дальнего обнаружения

засекают его достаточно далеко от цепи, затем передают радарам, расположенным в непосредственной близости от защищаемого объекта, а те в свою очередь наводят на самолеты противника истребители-перехватчики или зенитные ракеты ПВО.

Только с трещиной все обстоит гораздо сложнее. И вот почему. Вражеский самолет может быть «засечен» за тысячи километров от цели. Поэтому ПВО имеет, если не час, то во всяком случае десяток минут для подготовки отпора. В случае с трещиной все время разрушения может составлять сотые и тысячные доли секунды. А то и меньше. И за ничтожные временные промежутки нужно не только установить местонахождение трещины, но и определить направление и скорость ее движения. Если этого не знать, то удар импульса упругих волн окажется совсем бесполезным или придется на полости уже пробежавшей и завершившей разрушение трещины. А между тем он должен попасть точно «в скулу» трещины, в самую ее вершину. В этой игре с бегущей трещиной ставки очень высоки, а трудности совершенно необычайны и потому, что трещина может возникнуть в любом кристаллите практически мгновенно, и потому, что времени невероятно мало.

Времени настолько мало, что сегодня еще нет вычислительных устройств, способных обработать сигнал, проходящий с датчиков, следящих за трещиной. Поэтому абсолютно точно вычислить местонахождение быстрой трещины пока почти невозможно. Все осложняется еще тем, что разрушение иногда растет судорожными скачками и способно быстро менять направление. Поэтому нельзя что-нибудь прогнозировать. Движение самолета и «неторопливее», и плавнее.

Лучше обстоит дело с усталостной трещиной. Подрастает она медленно, разумно, скачками, следующими один за другим. Траектория ее не меняется, как в дурном сне. Поэтому американские физики применили простейшие методы триангуляции к трещинам, растущим в ядерном реакторе. Использовали они для этого акустическое «эхо». С помощью одновременного определения звукового излучения трещины тремя различно расположенными датчиками было найдено точное место нахождения очага усталостного разрушения. Интересно, что исследования проходили на большом удалении измерительной аппаратуры от самого реактора (до 90 м).



Ясно, что усталостное разрушение — наиболее заман*
чивое и реальное приложение автоматических методов
торможения трещин. Здесь в полном объеме могут быть
использованы огромные возможности современной вы-
числительной техники — времени для этого достаточно,
ведь скорости протекания процесса незначительны.

Поэтому, словами Ф. Петрарки, с высокой точностью

Отправив только что стрелу в полет,
Стрелок искусный предсказать берется,
Придется в цель она или не придется,
Насколько точен был его расчет.

Но усталость — это лишь один из видов разрушения.
И если в будущем мы и сумеем с ним справиться, то
остается пока еще великое множество случаев, когда
разрушающая трещина стремительна.

Что же делать тогда? Как определить, где она нахо-
дится. А нельзя ли вообще этого не делать? Нет ли пу-
тей, которые позволили бы избежать этой процедуры?

Оказывается в некоторых простейших случаях такие
пути есть. Допустим, что мы ориентировочно знаем хотя
бы направление, по которому может побежать трещина.
Тогда поперек этого направления, вдоль всей конструкции

выстраиваем своего рода забор — натягиваем и приклеиваем тончайшую проволочку, электрически изолированную от металла. Растущая трещина разрывает эту проволочку одновременно с металлом конструкции. И если по этому датчику был заранее пропущен слабый электрический ток, можно получить сигнал о местонахождении трещины в данный момент. Но этот метод далеко не всегда удобен и потому, что дает лишь одну координату трещины, и потому, что очень трудно так приклеить проволочку к металлу, чтобы разрушались они абсолютно одновременно. Обычно проволочка запаздывает и рвется после прохождения трещины уже тогда, когда вершина давно ушла вперед и берега раздвигаются.

Выходит, что лоцирование разрушения — наиболее трудная задача во всей проблеме: ее надо либо решать немедленно, либо обходить. Помня студенческую поговорку, что «умный в гору не пойдет», попробуем отыскать боковую тропку. Начнем издалека.

Проводится периодический осмотр ферм большого моста. На одной из стальных балок обнаружена трещина.

Ее опасность понимают и поэты. Недаром А. Межиров пишет:

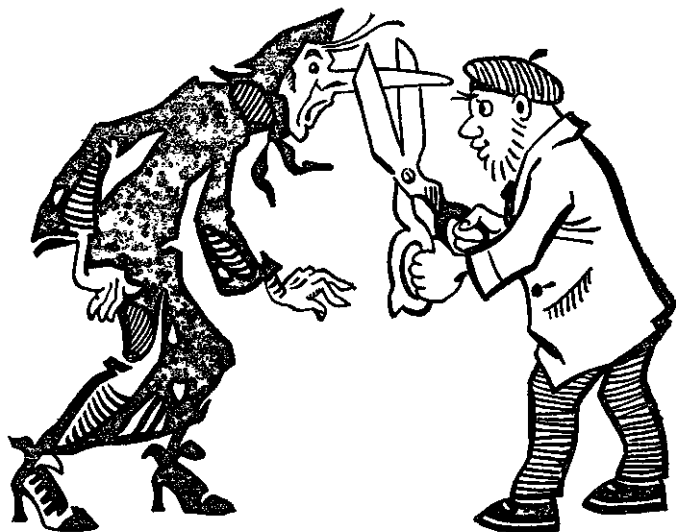
Если выбьет заглушку-пустяк,
Хуже — если на корпусе — трещина.

Что прежде всего делает ремонтная бригада? Высверливает в устье трещины отверстие. Зачем? Чтобы снизить концентрацию напряжений и приостановить разрушение. Спустя некоторое время, эту трещину заварят совсем, да еще сверх того на поврежденное сечение положат «заплатку» из стали.

Так, что же, — для борьбы использовать простую дрель — высверлить вершину закритической трещины?

Но всякому здравому человеку ясно, что не сыскать такого Левшу, который изловчился бы сделать это за микросекунду — другую. К тому же, и в считанные микросекунды трещина не стоит на месте, а умудряется пробегать путь длиной от нескольких миллиметров до сантиметра. Ясно, что никакими традиционными механическими способами обезглавить или даже «подстричь» трещину не удастся.

И все-таки, это возможно, но совершенно иными средствами. Предположим, что мы располагаем методом, с помощью которого можем нагреть устье трещины. Тогда материал в окрестностях вершины должен



расширяться. Но окружающая матрица металла воспрепятствует этому. Иначе говоря, очаг, в котором разрываются межатомные связи, окажется сжатым тем больше, чем выше температура нагрева и значительнее перепад между нею и температурой окружающего пространства. Понятно, каким образом возникающие термические напряжения повлияют на разрушение: они станут мощно его тормозить.

Но здесь человек может достичь и большего. Допустим, мы не остановились на достигнутом, а продолжаем нагревать металл и доводим участок при вершине трещины до температуры плавления. Жидкий металл вытечет, в устье образуется отверстие. Упирающаяся в него трещина будет надежно остановлена. Во-первых, потому, что напряжения по контуру отверстия в сотни раз меньше, чем на трещине. Во-вторых, поверхность его раскалена, следовательно, сжата окружающим холодным металлом.

А как осуществляется все это на деле? Нам, к примеру, нужно предохранить от катастрофы большой лист металла, растянутый какими-то совершенно произвольными силами. Поставим неподалеку батарею конденсаторов большой емкости. В ней запасен значительный электрический заряд. Посредством быстродействующего

включателя подключим батарею к защищаемому металлу.

Другим элементом антиаварийной системы служит рецептор — датчик, внимательно «прислушивающийся», не появится ли трещина. Он может быть любым, в частности звуковым. Здесь, однако, пришлось бы потребовать от него быть глухим ко всем звукам, кроме тех, которые издает трещина. В этом ему можно помочь. Любые случайные возбуждения, как правило, имеют низкочастотный спектр — слышимый. Другое дело трещина — она «работает» в неслышимой, ультразвуковой области. Вот и надо научить датчик реагировать только на ультразвук, а на остальные не обращать внимания.

Но это лишь один из принципов датчика. Имеет он и другой, не менее важный, который можно выразить латинским изречением: «*Semper paratus*», что значит «всегда готов». Датчик все время должен находиться в состоянии «боевой готовности», как радары, управляющие самолетами-перехватчиками и ракетами ПВО. Металл служит, спокойно «несет свой крест» — датчик настороже. И так все время, пока работает конструкция — и днем, и ночью, и в холод, и в жару.

Но вот «Смерть проснулась около полудня». Появилась и побежала в металле трещина. Вечно бодрствующий рецептор только этого и ждал — он сразу же услышал ее и подал сигнал включателю, отделяющему электрический заряд конденсаторов от конструкции. Тот немедленно открылся, и поток электрической энергии в виде короткого электрического импульса большой мощности хлынул в защищаемый металлический лист.

И тут проявились удивительные качества высокочастотного электрического тока. Он стремится распространяться не по массиву металла, а по тонкому поверхностному его слою. Это явление так и называют скин-эффект¹. Импульсу этому не надо знать, где находится трещина, — он ее сам мгновенно обнаружит. Ни к чему ему и сведения о скорости разрушения — все равно скорость эта ничтожна в сравнении с быстротой распространения электромагнитного сигнала или света. Словно бы широкая сеть поиска накинута на конструкцию. Мгновенно сосредоточивает она на трещине едва ли не всю энергию разряжающегося конденсатора. Дело прежде

¹ Skin — кожа, шкура (англ.).

всего в том, что трещина — это поверхность. Но не менее важно, что она рассекает живое сечение металла, по которому течет высокочастотный ток. Он обтекает трещину сначала по одной ее стороне, затем ныряет в острую вершину, потом бежит по другому берегу. Самое интересное происходит в острове трещины. Радиус быстрого разрушения ничтожен и плотность тока «всплескивается» до огромных значений, причем тем больших, чем более хрупким и опасным было разрушение. Огромный ток выделяет в крохотном пространстве устья трещины титаническое количество джоулевого тепла. Металл за считанные микросекунды разогревается, расплавляется и испаряется. Из вершины трещины буквально фонтанирует поток вещества — от частичек и капелек металла до плазмы; острейшая вершина превращается в оплавленное по краям отверстие в доли миллиметра и целые миллиметры. Получается совсем как в персидской пословице: «Вы покажите нам отверстие, а мы из него сделаем ворота». Эти-то ворота — непреодолимый барьер на пути трещины. Прорваться сквозь них она не в состоянии. Таким образом, разрушение безнадежно проигрывает безжалостному термическому разгрому, как это ни странно, несущему металлической конструкции добро. Совсем как у М. Волошина

И зло в тесноте сражений
Побеждается горшим злом.

Счастливым отличие этого метода от других способов торможения трещины заключается в том, что металл с остановленной трещиной может служить долго. Причина в том, что возникшее отверстие полностью парализует любые попытки трещины подрасти. Тем более что не составляет труда сделать это «сверление» каким угодно большим.

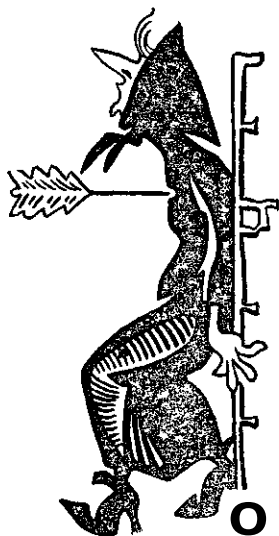
И жизни ключ выиграл из разрушения...

И.-В. Геме

4



РАЗРУШЕНИЕ - ДРУГ



ОСТРЫЙ НОЖ

Тут целый мир, живой, разнообразный...

Ф. Тютчев

Какие бы плохие события не происходили на Земле, в этой главе мы будем говорить только о хороших. Поэтому и на трещину посмотрим через «розовые очки». И тогда окажется, что часто она полезна.

На поверхности и в глубине нашей планеты — обилие гигантских трещин и трещиноподобных оврагов. Нередко их используют в народнохозяйственных целях, например при проектировании каналов, при выборе места для открытых горных разработок.

Альпинисты знают, как важны мелкие трещины при подъеме по гладкой скале — есть за что зацепиться! Пользуются ими и растения, способные жить в неудобных горных местах, на самой круче.

А разрушение? В повседневной жизни с его благотворными последствиями мы сталкиваемся буквально на каждом шагу.

Возьмем хотя бы такой трудоемкий процесс, как обработка почвы под посев. Плуг, пахущий землю, лопата, вонзающаяся в нее, мотыга, кетмень — все это инструменты созидания через разрушение!

А экскаваторы, «перелопачивающие» поверхность нашей планеты? А многочисленные горнодобывающие комбайны, разгрызающие ее, а многокилометровые буры, сверлящие нефтеносные скважины?

Разрушение, разрушение, разрушение... Но полезное, несущее нам благополучие, процветание и добро в самом широком смысле слова.

Это то, что «лежит сверху». Но сколько мелких, незаметных на первый взгляд, но таких интересных ролей играет разрушение на гигантской сцене нашей планеты. Оказывается, например, что в своем саду вы можете вырастить опята. Для этого, в частности, на пеньке старого дерева нужно топором насечь побольше трещин...

Итак, трещина, к которой мы привыкли, как к символу беды и непоправимости, подчас трагической, может быть поставлена на службу человеку. Помните, как писал С. Надсон:

...С тобою связь
Нам закрепить давно пора:



Я гений зла, я мрака князь,
А ты — ты Дон-Кихот добра...

Вспомним работу стекольщика. Вначале алмазом он надрезает стекло. Затем, легко постукивая под надрезом, создает в нем трещину. Положив стекло на стол так, чтобы надрез точно соответствовал кромке стола, он нажимает висящую часть. При этом трещина пробегает по концентратору напряжений, разделяя лист стекла на две части. На стеклодувных фабриках стеклянные сосуды от трубки отделяют по-другому. По словам известного советского специалиста по стеклу Н. Качалова, «...отделение или, как говорят стекольщики, «отшибание» сосуда производится при помощи прикосновения к соответствующему месту мокрой железной полосой. От резкого местного охлаждения в стекле возникает опоясывающая трещина, при легком постукивании по которой происходит отделение отформованного сосуда от выдувательной трубки»¹.

Физики-экспериментаторы используют для этой же

¹ Качалов Н. Стекло, — М.: Изд-во АН СССР, 1959, с. 73.

цели паяльник. Им разогревают стекло непосредственно перед надрезом. При этом в очаге нагрева материал расширяется и рвет стекло по надрезу. Затем паяльник ведут перед трещиной, создавая тем самым в ее вершине растягивающие напряжения. Направлением трещины мы можем «руководить» как угодно.

Обратим внимание на то, что, о каком бы методе разделения стекла мы не говорили, всегда речь идет о трещине, используемой в качестве режущего инструмента. В этом же качестве «трудится» трещина и при обработке драгоценных камней.

Ж. Бержье¹ пишет, что с доисторических времен люди пытались выведать друг у друга промышленные секреты, в частности секреты обработки камня. Это очень сложная техника, которую современные исследователи с большим трудом открыли вновь лишь частично. Не менее сложен, например, способ раскалывания одним ударом прямоугольной кремниевой пластины на четыре куска для выделения желвака. Эта работа требует очень большой сноровки. Шпионы охотились за этими секретами и, вероятно, похищали их не раз за 10 или 20 тысяч лет назад.

О том, что колоть кристаллы непросто, знает каждый кристаллограф и кристаллофизик. Между тем, почти при любом исследовании кристаллического материала его раскол имеет преимущества перед разрезкой. Он проще и удобнее. Но дело не только в этом. Когда вы режете кристалл, вы сильно искажаете его поверхность, насыщаете ее примесями. После этого для исследований она уже не годится. Другое дело раскол. Если делать это умело, то быстро бегущая трещина почти не изменяет поверхность раскола и она становится великолепным, стерильно чистым объектом исследования, не говоря уже о том, что нас часто интересует поверхность разрушения как непосредственный свидетель процессов, происходящих при разрушении. Не случайно поэтому известный американский физик Джон Гилман начинает одну из серьезных своих статей практическими указаниями, как именно колоть кристалл. Он пишет: «При попытке получить скол было испорчено много кристаллов. Однако после того, как эксперименты были проведены на не-

¹ Бержье Ж. Промышленный шпионаж. — М.: Международные отношения, 1971. С. 33.

скольких тысячах кристаллов, накоплен некоторый⁹ опыт. Следует отметить, что это не устраняет из практики скола кристаллов элемента искусства, но оказывает существенную помощь».

КЛИНОК НАДЕЖНЫЙ БЕЗ ПОРОКА...

Честь науке — ей дано уметь
Выводить нас из недоумения.

М. Светлов

Кто-то сказал, что острый язык — это единственный инструмент, не теряющий своих режущих свойств при постоянном пользовании. Хочется оспорить эту мысль и указать еще на один инструмент такого рода — трещину. Пусть, например, на машиностроительном заводе возникла необходимость разрезать металл большого сечения, диаметром в полметра. Конечно, что можно сделать разными способами, например на станке или на мощной пиле. Однако потребуются много времени, энергетических затрат и окажется, что немалое количество металла превращено в стружку. Вот для таких-то случаев и выгодно использовать трещину. Во-первых, она не боится прочных сталей и сплавов. Наоборот, чем прочнее материал, тем чувствительнее он к концентрации напряжений, тем легче режется трещиной. Во-вторых, ни один резец не сделает это быстрее трещины — она молниеносна. В-третьих, энергоемкость хрупкого разрушения ничтожна. В-четвертых, при всей своей безжалостности трещина не съедает металл и не превращает его в стружку. И еще одно уникальное преимущество имеет трещина перед инструментом: ее не нужно затачивать. Вершина хрупкой закритической трещины в процессе разрушения не затупляется. Напротив:

Ржавеет сталь,
Мертвеет плоть сердец,
Но встретив на пути сопротивление,
Самозатачивается резец...

(Я. Белинский)

Все это заманчиво. Но вряд ли просто. Как известно все, что в науке было на поверхности, давно подобрано. Речь идет не просто об укрощении разрушения. Нет, о дружбе с трещиной. О сознательном использовании ее разрушающих качеств на благо человечества. Между



тем не надо забывать о «вздорном» характере трещины, ее беспринципности, поклонении богу напряжений, способности мгновенно менять направление движения и многих других малопривлекательных качествах. Словом, друг она ненадежный. И с ней надо постоянно быть настороже.

Это мы осознаем. Но какие же основные требования следует предъявить трещине, прежде чем попытаться использовать ее для резки металлов в машиностроении и металлургии? Прежде всего нужно, чтобы разрушение зарождалось возможно раньше, чтобы пластическая деформация, ему предшествующая, была предельно малой. Это важно для получения низкой энергоемкости всего процесса разделения и сохранения формы разрезаемого металла. Кроме того, трещина должна быть «поплушной», она должна расти точно по заранее заданной нами траектории. В противном случае игра не стоит свеч. Ведь если трещина будет вильять, сохраняя требуемое направление лишь ориентировочно, потом для получения

хорошей поверхности придется обрабатывать деталь на металлорежущем станке. А этого нужно избежать.

Первый вопрос, возникающий перед нами: насколько быстро или медленно должна расти трещина? Слишком медленное разрушение не годится: потому, что процесс будет непроизводительным, и в большей степени потому, что при низких скоростях слишком велика пластическая деформация металла, а следовательно, энергоемкость разрушения. Поэтому, хотелось бы видеть трещину быстрой, но не слишком! Оказывается, при умеренных скоростях разрушения (1000 м/с) поверхность скола достаточно ровна. Однако при больших скоростях, превышающих 1500 м/с, трещина начинает судорожно прыгать из стороны в сторону. На сколе появляются крупные изогнутые борозды и сложная система ступеней. Кроме того, одни части поверхности разрушения оказываются повернутыми под большими углами (до 10—12°) по отношению друг к другу. С дальнейшим ростом скорости дело становится еще сложнее — при скорости 1800 м/с начинается ветвление. Поверхность разрушения, изобилующая дефектами и неровностями, да еще содержащая ответвления трещины, не пригодна для машиностроения.

Поэтому нетрудно сформулировать требования к режиму распространения трещины при холодной ломке металла. Скорость трещины должна быть возможно большей с целью понижения энергоемкости раскола. Она вместе с тем не должна быть чрезмерной во избежание появления сложного рельефа на поверхности разрушения* Предпочитают диапазон от 1000 до 1500 м/с. Здесь и энергоемкость низка и трещина еще достаточно устойчива. Это первое требование к трещине, важное для того, чтобы «жизни ключ взыграл из разрушенья».

Но это лишь начало. Совершенно необходимо, чтобы трещина была устойчивой, то есть чтобы ее траектория была такой, какая нужна нам. Между тем это не просто — уж слишком велика чувствительность разрушения, в частности к волнам различной природы. Хорошо, если эти упругие волны специально «организованы» нами для управления трещиной. Совсем иное дело, когда они появляются случайной способны исказить заданную траекторию распространения трещины. Например, у границы образца поведение трещины часто становится необычным. Это связано главным образом с изменением на-

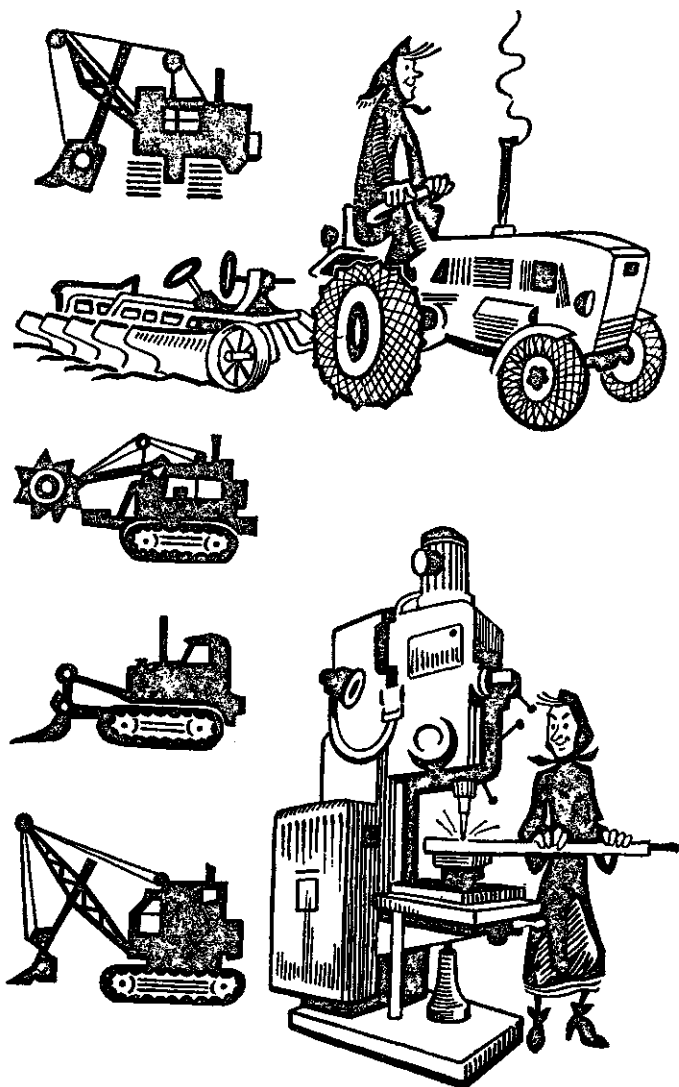
пряженного состояния и происходит по двум причинам. Прежде всего у границы образца составляющая упругих напряжений, перпендикулярная свободной поверхности, отсутствует. Остаются растягивающие напряжения, параллельные границе. Под их влиянием трещина старается распространиться ортогонально к кромке образца, под каким бы углом вначале она не двигалась. Но такому ходу вещей препятствует другой процесс. При разрушении по металлу движутся многочисленные группы упругих волн. Природа их различна и падать на поверхность образца они могут под любыми углами. Следовательно, и отражаются они произвольно. Потому взаимодействие их с трещиной в такой степени многовариантно, что предсказать его с достоверностью очень трудно. В самом деле, в достаточно хрупких материалах трещина далеко не всегда выходит на поверхность под прямым углом. Нередко вблизи границы она способна совершать крутые пируэты, и не один. Особенно это проявляется при быстрых трещинах, потерявших равновесие и потому крайне чувствительных к различным, даже маломощным упругим импульсам. Такие трещины, возникшие, например, при ветвлении, способны с приближением к границе круто разворачиваться.

...взвивается, как гнев, но в перехлесте,
свернувшись, как спираль, на полпути
пружинит, разжимаясь в быстром росте...

(Р.—М. Рильке)

Иной раз трещина развивается, не выходя на поверхность тела. Но как только нагрузка достигает некоторых критических значений, она совершает мгновенный разворот и «выползает на свет». Столь необузданное и темпераментное ее поведение у поверхности заставляет принимать специальные меры. Суть их такова: если не предполагается сознательное использование отраженных волн, следует попробовать все возможные способы, чтобы исключить их влияние на растущую трещину. Иначе все надежды на устойчивое распространение трещины будут разрушены. И вместо гладкой поверхности раскола мы получим криволинейную и произвольно холмистую.

Что еще может помешать трещине быть такой, как ей «хочется»? Прежде всего внутренние остаточные напряжения, особенно если они меняются от точки к точке. На современном прокате, например, они не слишком



опасны. Сложнее переход трещины из зерна в зерно стали, создающий мелкую шероховатость раскола. Чувствительна трещина и к структурным составляющим. Здесь, однако, спасительно то, что с ростом скорости трещина становится всеядной и при 1000 м/с способна одинаково

успешно расти и по ферриту, и по перлиту. При таких скоростях трещина становится хрупкой и режет любые компоненты стали.

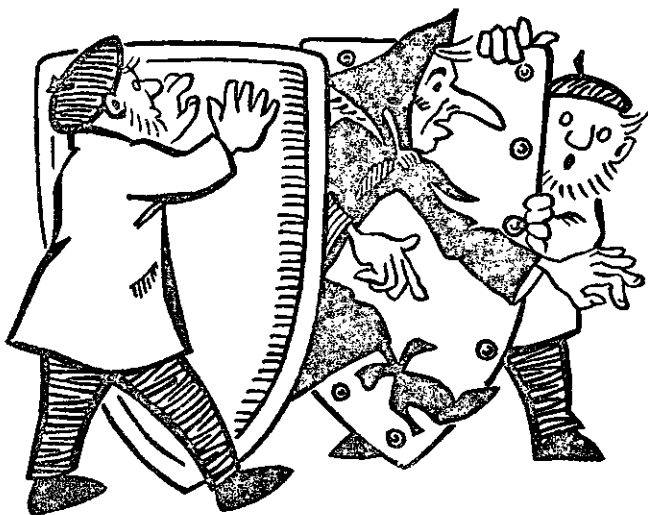
Ухудшают поверхность раскола дислокации, межзеренные границы и другие дефекты в стали. Однако с этим, пожалуй, ничего не поделаешь — это естественные ограничения метода. Можно считать, что самые мельчайшие неровности на сколе проката не могут быть меньше размера зерна в стали.

Очень важно вести холодную ломку металла так, чтобы не создавать в нем серьезной пластической деформации. Важно это только для того, чтобы металл можно было ломать легко, без больших затрат энергии. Нельзя допускать, чтобы деформация меняла структуру стали. Между тем опасность такого рода всегда есть, когда деформация велика. При этом могут возникнуть системы из многих микро- и макротрещин.

И если трещин много, то разрушение идет либо одновременно из многих центров, либо осложняется вследствие взаимодействия основной разделяющей магистральной трещины с другими. И в том, и в другом случае поверхность разрушения получается ушербной. Во избежание этого магистральной трещине намеренно дают «фору»; на прокат заранее наносят концентрацию напряжений. Он обеспечивает зарождение трещины там, где нужно, и облегчает ее подрастание до критических размеров. При этом другие трещины заранее обречены; они обязательно «проиграют» магистральной.

Мы уже знаем, что трещина неустойчива. И побуждений для этого у нее достаточно. Здесь и влияние структуры, и поля напряжения, и ветвление, и разнообразные волновые процессы и многое, многое другое.

Поэтому, если мы хотим использовать трещину в качестве инструмента и притом надежного, нужно создать такие условия, чтобы лишить ее подобных побуждений. Это совсем не исключает всех упомянутых ранее, часто случайных причин нестабильности разрушения. Нет, это означает лишь, что совершенно необходимо создать условия для стабилизации растущей микроскопической трещины, для чего есть два способа. Первый предполагает создание некоторого внешне наведенного макроскопического поля над всеми случайными упругими полями и эпизодами, которое, грубо говоря, подавляет все другие поля и обеспечивает однородное напряженное состо-



яние во всем районе распространяющегося разрушения.

Второй способ деликатнее. С его помощью не нужно накладывать эдакое суперполе на весь разрушаемый металл. Это ведь далеко не всегда удобно. Зачем деформировать весь массив, когда трещина пойдет лишь по какому-то небольшому его району. Не лучше ли в этом случае создать лишь узкий деформированный коридор, своего рода «волновод», обеспечивающий продвижение трещины в необходимом направлении и по определенной траектории. Такой метод потребует меньше энергии, а результаты не изменятся. Какие же есть фундаментальные идеи по переводу неуправляемой трещины-разбойницы в русло контролируемого и дисциплинированного труженика? Это напоминает мне известную шуточную рецензию: «Книга содержит интересные идеи. Обе идеи...» В нашем случае ситуация еще похлеще.

Идея, в сущности, одна. Предложена она была учеными Дж. Бенбу и Ф. Реслером и заключается в следующем. Приложим вдоль направления распространения трещины сжимающие напряжения. Поскольку трещина растет под действием растягивающих напряжений, нормальных к ее берегам, сжимающие напряжения не мешают ей двигаться в нужном направлении. Но вдруг трещина «решила» проявить свойственную ей вздорность и повернула в сторону. Вот тут-то сжимающие напря-



жения и проявляют себя. Ведь при повороте трещина подставила свой фланг и напряжения попросту поглотили ее—в любом направлении, кроме магистрального, двигаться, таким образом, трещина не может. Что-то вроде знака ГАИ, запрещающего поворот. Но в отличие от знака сжимающие напряжения являются и физическим препятствием. В этих условиях трещина вынуждена подчиниться дисциплине. Надо лишь, чтобы приложенное поле сжатия наверняка превосходило любые другие упругие поля, способные «подбивать» трещину на «бесчинства».

Вот и пришло время рассказать о том, как воспользоваться положительным свойством трещины и с ее помощью разрезать продукцию металлургического производства — прокат на мерные заготовки. Ведь именно из них на машиностроительных заводах изготавливают реальные детали.

Займемся приложением идеи Бенбоу и Реслера к различным случаям разделки металла. Допустим, что мы хотим разломать сталь изгибом. Если не принять специальных мер, то трещина, стартуя, из надреза на растянутой стороне образца двинется в сжатую его часть.

Здесь-то и пойдут осложнения. Трещина начнет вилять, то есть будет стремиться отойти от магистрального направления. Да что там сталь! Сломайте сантиметровую деревянную палочку, карандаш, наконец. Из области растяжения трещина пойдет хорошо, а в конце, в районе сжатия, древесина расслоится параллельно своей оси. От монолитной трещины ничего не останется. Это и есть работа сжимающих напряжений, неизбежно возникающих при изгибе стержня. Чтобы их подавить, давайте обожжем стержень по его внешней поверхности. Для этого используем механическое обжатие. Его роль двойка. Во-первых, сжимающие напряжения, которые возникнут по всему сечению образца, наложат «табу» на любые «финты» трещины и заставят ее идти точно по заданному направлению. Во-вторых, проявится еще одна счастливая особенность такого напряженного состояния. У вас в кулаке пластилин. При сжатии он будет выдавливаться с торцов кулака. Сталь из кулака не потечет. Но при внешнем обжиме в ней возникают растягивающие напряжения, стремящиеся разорвать образец по оси. Они сравнительно невелики, но все же содействуют разрушению и подталкивают трещину. Благодаря этому двойственному благоприятному воздействию внешнего обжатия на металлический образец его можно ломать обычным изгибом и получать при этом отличную поверхность излома, содержащую лишь мелкие шероховатости. Это оказалось возможным благодаря победе над трещиной.

Как на практике осуществить подобное стабилизирующее обжатие? Это можно сделать чисто механическим путем. Но есть и другие способы. Например, перед разрушением изгибом металл на короткое время охлаждают в жидком азоте. Тогда его поверхность сжимается. Однако сердцевина металла, сохраняющая исходную температуру, этому препятствует. В итоге поверхность образца окажется растянутой, а внутренние слои — сжатыми. Растягивающие напряжения снаружи очень удобны, потому что способствуют зарождению исходной трещины. В то же время сжимающие напряжения в теле образца выполняют сторожевые функции, стабилизирующие трещину. В итоге трещина и легко образуется, и ровно распространяется, оставляя отличную поверхность раз*реза.

Очень эффективна ломка металла гидростатическим обжатием. Принцип здесь тот же. Но реализуется он не-

много иначе. Средой, организующей и передающей давление, является жидкость — вода или масло. Специальный компрессор сжимает ее до относительно высокого давления в десятки тысяч атмосфер. В итоге металл оказывается в гидравлическом «кулаке». При этом возникают напряжения и стабилизирующие трещину, и разрывающие образец. Последние направлены точно по оси. Поэтому поверхность разрушения здесь получается идеальной. Если вы разрушаете плексиглас, она зеркальна. Если идет речь о металле, ее шероховатость не превышает размера зерна стали. Особенность этого метода — чрезвычайная легкость зарождения исходной трещины. Для этого достаточно сделать ничтожный надрез на поверхности металлического образца. Жидкость под давлением проникнет в мельчайшие поры и создаст дополнительное расклинивание, содействующее появлению трещины¹.

Это очень многообещающий метод, но... японская поговорка говорит, что кто не знает, чего он хочет, должен по крайней мере знать, чего от него хотят другие. Мы хотим разработать эффективные методы резания металла. И другие этого хотят. Ведь не случайно же говорят, что дивиденды предприятий сидят на острие резца? Вместе с тем разрабатываемые методы должны быть не только эффективными, но и более простыми, нежели традиционное резание. В связи с этим надо указать на одно очень слабое место гидростатического обжатия. Ведь необходимо создать вполне надежное уплотнение между резервуаром с жидкостью под высоким давлением и поверхностью образца. Между тем образец этот — продукт прокатного производства с поверхностью очень неровной, да еще меняющейся от одного участка проката к другому. К сожалению, сегодня эта задача представляется невероятно сложной. Именно это и умаляет достоинства метода.

Чтобы устранить уплотнения и все же получить высокие давления, необходимые для ломки, удобно использовать импульсное гидравлическое обжатие. Идея заключается в том, что нагнетание давления в очаг ломки осуществляется со скоростью, намного превышающей его падение, за счет фонтанирования из неплотностей. Очень

¹ Оба метода холодной ломки металла были разработаны Г. Л. Барышевым и Г. Б. Родюковым под руководством автора.

удобно для этого воспользоваться, например, взрывающейся проволокой, окружающей образец кольцом. И образец, и проводник находятся в баке с водой. Под действием мощного электрического импульса проводник взрывается и окружает образец полем сжатия под давлением примерно в 100 МПа. Этого достаточно для разрушения плексигласа, но, к сожалению, не металла.

Более «экзотична» ломка металла, достигаемая в результате обжата его мощным магнитным полем. Оно создается одновитковым соленоидом с полем, достигающим 700 кЭ. При этом в металле развиваются разрывающие напряжения в 0,8 ГПа.

Этот метод не нуждается в уплотнениях. Более того, с его помощью, повышая энергию конденсаторов, можно, в принципе, ломать любые металлы.

Но (как видите и здесь без «но» дело не обходится) метод этот не годится для массового производства из-за своей опасности и чисто технических неудобств работы с высокими электрическими напряжениями. Скорее это метод будущего.

Если же подвести итоги, то складывается впечатление, что оба метода все же чрезвычайно перспективны и надежны для стабилизации разрушения. Правда, они пригодны для сравнительно простых конфигураций проката в условиях прямолинейно растущей трещины.

Вероятно, читатель знаком с практикой стрельбы по танкам времен второй мировой войны — не снарядами, а сплошными металлическими болванками. При этом поражение было очень своеобразным. Болванка лобовую броню не пробивала, но вырывала металл из внутренней ее поверхности и швыряла его внутрь танка. Механизм этого процесса был следующим. Когда снаряд попадал в броню, он создавал в ней волну сжатия. Волна эта распространялась до второй поверхности и, отражаясь от нее, превращалась в волну растяжения. Грубо говоря, волна как бы отталкивалась от поверхности, заставляя ее двигаться внутрь кабины. При этом как раз и отрывался металл, поражавший экипаж. Группа исследователей (Ю. И. Головин, В. М. Умрихин, Г. Б. Родюков и автор этой книги) решили использовать этот принцип откола для резки металла

Для этого на стальной прутке длиной в несколько метров наносились концентраторы напряжений (столь громко названное — концентратор напряжений — на са-

мом деле представляло собой насечку простым зубилом). Затем на торец проката обрушивали короткий продольный удар. Это делается многими методами. Например, можно стрелять стальным бойком со скоростью полета до 70—100 м/с; можно разогнать боек магнитным полем. Возможны и другие варианты. Не важно, чем создана волна сжатия. Существенно то, что волна такого рода, как правило, быстро становится плоской. Это означает, что ее фронт по всему сечению проката ортогонален к его поверхности. Таков же и фронт волны растяжения. Поэтому возникающая на поверхности металла трещина распространяется точно перпендикулярно длине прутка, поверхность разрушения оказывается превосходной. При этом бегущая по образцу волна растяжения рвет металл по каждому концентратору. В итоге за один удар многометровый пруток оказывается разделенным на десяток заготовок.

В ПЫЛЬ ЕГО..!

Оно весь мир отдаст, смеясь,
на разрушенье

Шарль Бодлер

Читатель, конечно же, знает одно из не слишком уж благородных, но основных правил самбо и дзюдо—падающего толкни! Если разрушение и его холодный и безразличный босс — второе начало термодинамики — так уж тяготеют к ломке, почему бы не продолжить их движение и не приложить его к тем случаям нашей жизни, где разрушение нам полезно. А полезно оно не редко. Огромный металлургический завод выплавляет сталь не только из руды. Со всей страны к нему тянутся эшелоны, на открытых платформах которых громоздятся горы старого металла. И вот весь этот (как говорят металлурги) скрап направляется в специальный цех, где его сортируют, а самые крупные компоненты ломают. Иной раз для охрупчивания сталей их подвергают охлаждению жидким азотом. Безжалостно поступают с легковыми автомобилями, «вышедшими в тираж». Мощными прессами их превращают в лепешки, идущие прямо в металлургические цеха. Вот вам и разрушение, вот вам и зло!

Но если это так, то стоит внимательно оглянуться и посмотреть на те удивительные задачи, которые стоят перед человечеством. Тогда выяснится такое изобилие областей, где торжествующее демоническое зло разрушения может оказаться полезным, что разбегаются глаза... Для множества отраслей промышленности совершенно необходимы порошки. Это и горнорудная, и цементная, и стекольная, и пищевая, и химическая. Без порошков не может обойтись фармацевтика, необходимы они при производстве металлокерамики, твердых топлив для реактивных двигателей, ядерных тепловыделяющих элементов, бумаги, наконец.

Существует несколько принципиально различных путей разрушения материалов в порошок. Прежде всего — посредством механического воздействия или дробления путем влияния на материал жидкости или газа, ультразвуковых, ударных или электромагнитных волн. Однако чаще всего порошок получают все же на механических мельницах, в которых дробление осуществляется созданием в разрушаемых телах критических напряжений чисто механическим нагружением, например, посредством движения стальных или чугунных шаров, стержней. «Стирают в порошок» в вибрационных и планетарных мельницах и во многих других. Конечно, это удивительно — для самых современных промышленных областей дробление материалов осуществляется методами столь же старомодными, по словам Г. Поженяна, «как ботфорт на палубе ракетносца». Справедливости ради, однако, следует заметить, что существуют и интереснейшие современные методы фрагментирования. Например, струйные мельницы, в которых элементарные акты дезинтеграции осуществляются при ударе частиц, разогнанных струями газа, о плиту из прочного материала. Почти совсем так, как когда-то описал Байрон

И, точно камень, пушенный с размаха,
О скалы раздробишь и кинешь горстью праха.

Этот вариант был необычно использован, когда отражающая пластина — наковальня была заменена отбойной плитой из резины. При этом летящий поток тел, предназначенных для дробления, встречал отраженные от резины авангардные частицы. Происходило дробление во встречных потоках, позволившее получать пыль с размером частиц порядка микрона. Разработаны спо-

собы измельчения твердых тел под действием гидростатического давления. При этом измельчаемый материал помещают в эластичную оболочку и подвергают действию гидростатического давления.

Обратимся к одному параметру, по которому в последние годы (но не в последнюю очередь!) судят о техническом развитии и культурном уровне страны. Речь идет о производстве бумаги, требующем мощного и современного оборудования, больших энергозатрат, точной регулирующей аппаратуры.

Для производства бумажной массы целлюлозу механически обрабатывают в специальных мельницах. При этом происходит фибрилляция — расщепление пучка волокон на отдельные волокна — фибриллы. Оказывается, чем лучше разделены волокна и чем меньше они изрублены, тем прочнее, эластичнее, однородней бумага. Размер волокон должен быть в пределах от 0,8 до 1,2 мм. Именно такого рода волокна получали из хвойной древесины, у которой изначально они имели длину около 3 мм. Древесина лиственных пород (осина, тополь, береза) в обычных мельницах обрабатываться не может, так как длина их волокон всего лишь 1 — 1,5 мм, и дальнейшая рубка волокон не позволяет получать качественную бумагу.

В Сибирском технологическом институте разработали мельницу, в которой это обстоятельство учли, и разрушение волокон уменьшилось. Достигается это следующим образом. Смесь волокнистого вещества с водой подается под давлением в параллельно расположенные щелевые сопла. При этом суспензия сжимается. Когда же она выдавливается из сопла и попадает в зону внезапного расширения, происходит явление, известное под названием кавитация. Суть его заключается в образовании в расширяющейся жидкости множества пузырьков воздуха. Жидкость неспособна выдерживать действие больших растягивающих напряжений и разрушается, как бы закипает. При этом развиваются серьезные давления. Чтобы читателю стало понятно, насколько это серьезно, скажу, что этот процесс — одна из основных причин разрушения винтов на кораблях. Каждый акт вскрытия и захлопывания полости играет роль микроскопического молота, вырывающего из винта крохотную частицу металла. А поскольку этот процесс постоянно воспроизводится, он приводит к появлению на

теле винта огромных каверн, нарушающих прочность, ухудшающих обтекание жидкостью и тем самым понижающих эффективность работы. И, что важно в военно-морском флоте, при этом резко увеличивается интенсивность звучания винта, а следовательно, облегчается обнаружение корабля. Именно этот эффект и использовали в Сибирском институте. Только теперь кавитационный процесс шел по пути разрушения связей между волокнами.

В дополнение к этому явлению на пути струи располагалась стальная заостренная пластинка. Под действием пульсаций струна вибрировала. Это был как раз тот случай, когда постоянные колебания простительны. Тем более, что они содействовали дополнительному протеканию фибрилляции. Особенно хорошим получался помол, когда пластинка входила в резонансные колебания. В этих условиях оказалась возможной и переработка древесины лестничных пород.

Процесс тонкой деструкции материала имеет уникальные, без преувеличения беспрецедентные, физические особенности и связанные с ними удивительнейшие применения в химической, фармацевтической и других отраслях промышленности. Оказывается, при разрушении, в частности, кристаллического вещества, образуются чистейшие, физики говорят «ювенильные», поверхности. Трещина как бы вскрывает и делает доступными внутренние слои материала, не загрязненные примесями, оксидами, влиянием внешних сред. Это обстоятельство вводит в любой химический процесс с участием таких поверхностей «искренность» и отсутствие посторонних воздействий. Более того, обнажение при массовом дроблении огромной химически активной поверхности играет провоцирующую и стимулирующую роль, заметно увеличивая скорость процессов. Но и это далеко не все. Чисто утилитарный процесс дробления и перемола —

Скалы в гальку передробило,
Гальку перемололо в песок...

(Б. Слуцкий)

— оказался дорогой, ведущей не только туда, куда ее прокладывали, и открыл перед нами совершенно новое научное направление—механоэмиссия и механохимия твердых тел. В 1986 году в Ростове-на-Дону состо-

ялся симпозиум по этой проблеме, в сотнях сообщений которого содержится информация, попросту «захватывающая дух».

Расскажем хотя бы о некоторых вопросах, стоявших в повестке дня симпозиума. Сравнительно давно было известно, что при раскалывании кристаллов их поверхности электризуются. Причем, если в процессе роста трещин возникающий заряд значителен, то со временем он ослабевает — релаксирует, но сохраняется на поверхностях раскола длительное время. Около 40 лет тому назад известный советский физик Б. В. Дерягин обнаружил эмиссию электронов со свежесколотых поверхностей, названную уже тогда механоэмиссией. Оказалось, что этот процесс намного шире, нежели вначале предполагалось — электроны изучаются при нарушении адгезионных контактов при динамическом контактировании твердых тел в среде углеводородов, разрыве химических связей, разрыве полимерных цепей. Между тем, электроны-то необычные. Они обладают высокой энергией, порядка 40—100 КэВ и излучаются отдельными элементами вскрываемой поверхности, образующими электростатическую мозаику. Интересно, что этот процесс свойственен в различных масштабах практически любым разрушаемым материалам, даже обычной бумаге.

Не менее интересным является и радиоизлучение, возникающее при отрыве полимерных пленок от твердого тела, разрушении щелочно-галоидных кристаллов, распространении трещины по клеевому соединению двух диэлектрических материалов, раздавливании, наконец, бетона. Но и этим не ограничиваются коммуникационные способности трещины — она излучает свет (механолюминесценция). Так нагружение и разрушение металлов ведет к эмиссии в диапазоне от видимого до инфракрасного света. При измельчении частиц кварца обнаружены световые импульсы длительностью 10^{-3} — 10^{-6} секунды. Отрыв каучуковой пленки от стекла сопровождается инфракрасным излучением, определяемым скоростью распространения трещины. Если до этого уровня возможности трещины были сравнительно легко предсказуемыми, то дальнейшее... Впрочем, наши представления о разрушении за последние 50 лет кардинально изменили и это, наверное, хорошо, потому что, как сказал один философ, если закон уже никто не наруша-

ет, значит он устарел. И все же поразительно — трещина излучает рентгеновские лучи! Наблюдались они, в частности, при изучении осадочных горных пород.

Но, пожалуй, самое поразительное в другом. Дело в том, что до настоящего времени теория разрушения строилась в предположении о том, что этот процесс межатомный, в том смысле, что разрыв идет по межатомному и межмолекулярному пространству. К разрыву молекул движущейся трещиной привыкли, в конечном итоге никого не удивляет разрыв длинных молекулярных цепей в полимерах. Когда мы говорим об излучении видимого света, тоже все ясно — возбуждаются при разрыве связей электронные оболочки атомов и излучают. Но ядро-то! Оно всегда при любых процессах разрушения было «недотрогой» и в разрушении не участвовало.

В одном из докладов¹, представленных Институтом физической химии АН СССР, сделано предположение о возможности протекания ядерных реакций при разрушении твердых тел, содержащих тяжелые изотопы водорода! Результаты опытов показали возникновение в момент разрушения дейтерийсодержащих кристаллов потока нейтронов! В это очень хочется и вместе с тем трудно поверить — неужели? Неужели трещина сечет ядра? Будем ждать новых работ, новых результатов на этом пути. Будем терпеливо ждать их с пониманием того, насколько все это не просто. Будем помнить при этом забавную присказку Игоря Васильевича Курчатова²; «Одним матом не расколешь атом»!

Слов нет, физические процессы, протекающие при дроблении материала, многоплановы и физически крайне интересны. Но зачем они? Что они дают? И, наконец, куда они ведут? И помните: зачем нужна дорога, если она не ведет к храму? Оказывается, храм существует и заключается в новом разделе науки — механохимии и ее практических приложениях. Установлено, что для широкого круга химических реакций, протекающих в твердом состоянии, механическое нагружение и разрушение являются мощнейшими стимуляторами. Так, в частности, импульсное одностороннее сжатие³ способно привести к росту скорости реакции на 4—6 порядков! При этом кинетические особенности превращения напоминают низкотемпературный взрыв! В системе циклогексан — хлор⁴ спусковым ме-

¹ Клюев В.-А., Липсон А. Г., Топоров Ю. Я. Эмиссия нейтронов при разрушении дейтерийсодержащих твердых тел: Материалы X юбилейного всесоюзного симпозиума по механоэмиссии и ме* ханохимии твердых тел. М.: 1986. С. 5.

² Крайний В. А. Мужество и обаяние // Химия и жизнь. 1983. № 1. С. 32.

³ Бендерский В. А., Мисочко Е. Я., Филиппов П. Г., Овчинников А. А. Криохимия взрывных механохимических процессов: Материалы X юбилейного всесоюзного симпозиума по механоэмиссии и механохимии твердых тел. М.: 1986. С. 80.

⁴ Там же, с. 81.

ханизмом подобного явления является спонтанное трещинообразование, обеспечивающее зарождение и развитие цепного процесса.

Экспериментаторы¹ из Института химической физики АН СССР установили, что стекло, образованное метилциклогексаном и хлором, при медленном отогревании с температур жидкого гелия до жидкого азота остается инертным. Но стоило в стекле позияться трещине, как происходила бурная реакция. Некоторые авторы видят влияние разрушения в эмиссии атомов и молекул хлора в объем трещины. Возможно это так, но вряд ли эта единственная причина. Дело в том, что многие из перечисленных выше явлений могут быть не только «провокаторами» физического процесса, но и его стимуляторами. Это и быстролетающие электроны, и электромагнитное излучение, и рентгеновские лучи. Вероятно, и многие другие процессы вскроются в этом удивительном направлении. Надо только быть готовым принять новое, каким бы неожиданным и парадоксальным оно не оказалось. Писал же Фолкнер, что правда вообще невыносима. Некоторые даже считают ее лекарством, которое можно употреблять лишь в гомеопатических дозах.

Вот уже более 30 лет известно, что дробление, осуществленное в некоторых условиях (в так называемых дезинтеграторах), придает порошкам высокую активность, позволяющую им впоследствии образовывать материалы с необычными свойствами. Так, например, получают цементы, великолепно сохраняющиеся при длительном хранении. Сухие топливные смеси, прошедшие дезинтегратор, более полно сгорают и дают дымовые газы пониженной токсичности. Активируется при этом и синтез, и спекание сегнетоэлектрических твердых растворов сложных оксидов. И многое, многое другое улучшается, интенсифицируется, активируется после прохождения этой странной обработки в дезинтеграторе. Что это такое? Казалось бы, не так важен метод, если известен результат. В данном случае это не так! Метод сам по себе хотя и не сложен, но интересен. Два соосных ротора с металлическими пальцами с большими скоростями вращаются навстречу друг другу. Измельчаемое вещество оказывается в центре этой системы и подвергается действию ряда мощных последовательных динамических импульсов со скоростями порядка 450 м/с. Интересно, что при этом развиваются гигантские ускорения, в сотни миллионов раз превышающие ускорение свободного падения². Несмотря на кратковременность пребывания в таких условиях, с материалом, превращаемым в тонкодисперсный порошок, происходят серьезные и необратимые изменения. Природа их до сих пор не выяснена. Возможно, значительную активирующую роль играют процессы, описанные выше, но вполне может оказаться, что разнообразные излучения — лишь следствие более сложных и глубинных явлений. В качестве одной из версий, которую автор книги не разделяет, приведем точку зрения³, согласно которой процессы, происходящие в дезинтеграторе, по величине развиваемых сил и ускорений близки к ситуации, в которой оказывается материал белых карликов, спрессованный в новое вещество с плотностью, на 6 порядков превышающей обычную...

¹ Гольданский В. И. и др. Письма в ЖЭТФ. Т. 33. Вып. 6. С. 336.

² Батраков В. Созидательное разрушение//Химия и жизнь. 1982. № 1. С. 32.

ФИНИШ

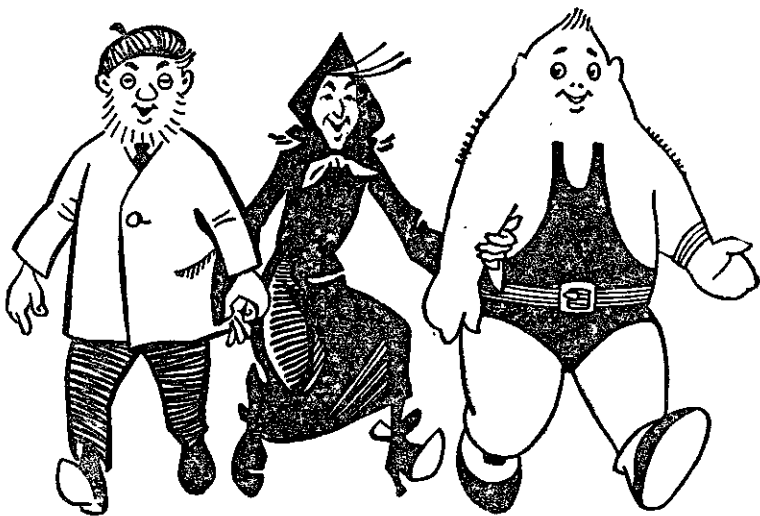
Не Смерть во тьме ночной —
Рожденье на заре!

Ш. Бодлер

Вот и кончается книга. И важно, с каким настроением мы выйдем из ее мира. Безысходность ли это, навеянная слишком мрачными картинами разрушения, оптимистическое ли восприятие окружающего? Ведь мы познакомились с разрушением и теперь знаем, что им можно управлять.

Достаточно оглянуться вокруг, чтобы увидеть: тысячи разнообразных устройств, машин и механизмов надежно служат человеку, облегчая его труд. Прочность, стабильность — это естественное, повседневное состояние техники. А если это не так, то у нас есть все основания для хорошего настроения.

Что же касается разрушения, то, конечно, оно существует. Но мы противостояем ему всюду. Профилактические меры, предупреждающие разрушение, принимают еще на этапах конструирования и строительства. Их задача — не допустить возникновения даже маленькой трещины. Принято такое понятие, как запас прочности. Коэффициент запаса прочности показывает, во сколько



раз возможности конструкции противостоят внешнему нагружению, превышают это нагружение. Иногда говорят: запас карман не тянет. В данном случае это не так. Тянет и серьезно. Ведь неиспользованный запас — это балласт, забирающий дефицитный материал. Тем не менее резервы такого рода всегда существуют в любой конструкции как барьер против возможного разрушения.

Но допустим, исчерпались резервы прочности из-за каких-то непредвиденных обстоятельств, в металле возникла трещина. Это, конечно, плохо, но далеко не безнадежно. Ведь мы убедились, что появление трещины еще не означает гибели конструкции. Совсем не случайно такой оптимист, как Гете, писал:

...Конец? Нелепое слово!

Чему конец? Что собственно случилось?..

Уже сегодня в нашем распоряжении десятки методов, с помощью которых можно остановить разрушение, обеспечить конструктивную прочность, избежать аварии. Не за горами, думаю, и такие времена, когда мы сумеем не только предотвращать и останавливать разрушения, но и научим металл залечивать трещины. Такое самолечение навсегда исключит аварии и катастрофы из жизни человечества.

Научно-популярное издание

Виктор Моисеевич ФИНКЕЛЬ

ПОРТРЕТ ТРЕЩИНЫ

Редактор издательства С. А. Чистякова
Художественный редактор Ю. И. Смурыгин
Технический редактор Н. А. Сперанская
Корректор В. М. Грднева
Обложка художника В. Н. Забайрова

ИБ № 3555

Сдано в набор 28.07.88. Подписано в печать 03.11.88. Т-20338. Формат бумаги 84X108¹/₂). Бумага книжно-журнальная. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ л. 10.08. Усл. кр.-отт. 10,5. Уч.-изд. л. 10,21. Тираж 83 270 экз. Заказ № 136. Цена 46 к. Изд. № 1866.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Металлургия»,
119857, Москва, Г-34, 2-й Обыденский пер., д. 14

Владимирская типография Союзполиграфпрома при Государственном
комитете СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли

600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7

Книга посвящена анатомии зарождения и роста хищной, коварной и стремительной трещины. Она — не существо и даже не вещество. Но именно с ней связаны разнообразные аварии и катастрофы, потому что "жизнь" трещины — это "смерть" конструкции.



• МЕТАЛЛУРГИЯ •