

55 коп.

54.55-5

6П4.4

П-77

ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

# ПРИСПОСОБЛЕНИЯ для электро- физической и электро- химической обработки

ISBN 5-217-0057-0

• МАШИНОСТРОЕНИЕ •

---

# ПРИСПОСОБЛЕНИЯ для электро- физической и электро- химической обработки

---

Под общей редакцией  
д-ра техн. наук В.В. Любимова

Повірно віддати книгу не пізніше зазначеного тер

19.03.90/24				
18.11.90				
2002/2				

Киево-Святошинська друж.



МОСКВА  
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»

1988



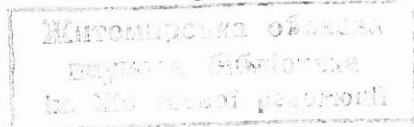
ББК 34.5-5  
П77  
УДК 621.9.047.7.06-52:669.018

34.55-5  
674.4  
П-??

ПРЕДИСЛОВИЕ

Авторы: В. В. ЛЮБИМОВ, Н. И. ИВАНОВ, Е. И. ПУПКОВ,  
В. И. ГНИДИН, Н. А. ЕГОРОВ, В. М. ВОЛГИН

Рецензент канд. техн. наук А. К. АЛТЫНБАЕВ



**Приспособления для электрофизической и электрохимической обработки**/В. В. Любимов, Н. И. Иванов, Е. И. Пупков и др.; Под общей редакцией В. В. Любимова.— М.: Машиностроение, 1988. — 176 с.: ил.

ISBN 5-217-00057-0

Рассмотрены проектирование и эффективное использование инструментов и приспособлений для электрофизической, электроэрозионной, электрохимической, ультразвуковой, лазерной и комбинированных методов обработки. Уделено внимание способам и средствам автоматизации приспособлений.

Для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием приспособлений и инструментов.

П 2704050000—054  
038(01)—88 54—88

ББК 34.5-5

ISBN 5-217-00057-0 © Издательство «Машиностроение», 1988

2

Решающая роль в ускорении научно-технического прогресса народного хозяйства страны принадлежит машиностроению. В «Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года» ставятся задачи осуществить комплекс мероприятий по совершенствованию технологии производства, расширить в двенадцатой пятилетке в 1,5—2 раза применение прогрессивных базовых технологий. Обеспечить широкое внедрение в народное хозяйство принципиально новых технологий — электронно-лучевых, плазменных, импульсных, биологических, радиационных, мембранных, химических и иных, позволяющих многократно повысить производительность труда, поднять эффективность использования ресурсов и снизить материалоемкость производства.

Одним из основных направлений совершенствования технологии производства является применение прогрессивных технологических процессов обработки материалов, в том числе электротехнологии.

Группу электрофизических и электрохимических методов обработки (ЭФХМО) составляют электроэрозионная (ЭЭО), ультразвуковая (УЗО), электронно-лучевая (ЭЛО), лазерная и размерная электрохимическая обработка (ЭХО), а также комбинированные методы обработки (КМО).

Комбинированные методы обработки основаны на последовательном или одновременном сочетании электрофизических, тепловых, физико-химических воздействий, воздействий плазмы, электронного излучения и других факторов на обрабатываемую заготовку.

К комбинированным методам обработки относятся: алмазно-электрохимическое шлифование (АЭХШ) и алмазно-электроэрозионное шлифование (АЭЭШ), электроэрозионно-химическая обработка (ЭЭХО), ультразвуковая электрохимическая обработка; механическая обработка лезвийным инструментом с наложением ультразвуковых колебаний и др.

Приспособлением называют дополнительное устройство к обрабатываемому станку, основным назначением которого является установка заготовки для ее обработки. Помимо установки заготовки приспособление при электрофизической обработке может выполнять и другие функции, в частности, обеспечивает необходимое направление обрабатываемого инструмента или заготовки при их рабочем движении (копиры, направляющие втулки и др.), подвод технологического тока, формирование потока рабочей жидкости (электролита) и др.

3

Обрабатываемым инструментом при электрофизической обработке является электрод (катод или анод), непосредственно формирующий межэлектродный промежуток.

Измерительный инструмент при электрофизической и электрохимической обработке является тем компонентом технологической оснастки, на котором в меньшей степени отражаются особенности процессов обработки; определяющими факторами для этих видов обработки являются характеристики обработанной поверхности (вид, размеры, точность и др.) и масштаб производства.

Приспособления, применяемые при электрофизической и электрохимической обработке, позволяют:

устранить разметку и выверку положения заготовки перед обработкой, что обеспечивает сокращение вспомогательного времени на операцию;

повысить точность обработки;

сократить основное время операции за счет параллельной обработки нескольких заготовок в многоместном приспособлении;

расширить технологические возможности оборудования;

облегчить условия труда, повысить безопасность работы, снизить аварийность;

создать условия для автоматизации работы оборудования.

Применяемые приспособления при электрофизической и электрохимической обработке повышают качество и снижают себестоимость изготовления изделий.

Приспособления для электрообработки могут быть классифицированы по признаку технологического процесса на электроэрозионные, электрохимические, ультразвуковые, электронно-лучевые, лазерные и др. Однако в отличие от механической обработки построение подобной классификации для ЭФХМО сопряжено со значительными трудностями.

Методы электрохимической размерной обработки делятся на пять различных групп: при неподвижных электродах, при поступательном перемещении одного электрода, при вращении катода, при вращении анода и сложном движении электрода. Причем каждая группа объединяет несколько модификаций процесса при большом разнообразии видов обрабатываемых заготовок [43].

Для приспособлений, применяемых при ЭФХМО, справедливо общепринятое деление приспособлений по степени их механизации и автоматизации на ручные, механизированные, автоматизированные.

Ручные приспособления для ЭФХМО приводятся в действие за счет мускульной силы оператора. В серийном и массовом производствах применяют механизированные приспособления, оснащенные пневматическим или гидравлическими приводами,

и полуавтоматические приспособления с частичной автоматизацией их рабочего цикла. Автоматизированные приспособления, имеющие бункеры или загрузочные магазины, представлены лишь отдельными конструкциями (при удалении заусенцев на станке ЭЗ-93, маркировании подшипников на станках МЭЗ-11 и МЭЗ-01).

Поскольку основным назначением приспособлений при ЭФХМО, как и при механической обработке, является установка обрабатываемых заготовок, в конструкции приспособлений для ЭФХМО содержатся элементы общего назначения (установочные, зажимные, делительные, корпус и др.). Вместе с тем особенности рассматриваемых процессов во многих случаях вызывают необходимость применения специальных устройств, не используемых в традиционных станочных приспособлениях (токопроводящих, для подачи и отвода рабочей жидкости и др.). Помимо этого специфика ЭФХМО накладывает определенный отпечаток и на конструктивное оформление элементов приспособлений. В частности, отсутствие значительных сил при обработке позволяет в общем случае снизить требование к жесткости приспособлений и использовать зажимные механизмы и силовые приводы меньшей мощности. Применение коррозионно-активных рабочих сред, главным образом при ЭХО, заставляет применять в конструкции приспособлений коррозионно-стойкие материалы и покрытия, а в отдельных случаях предусматривать специальные методы защиты от коррозии (катодную защиту и др.). К отдельным элементам приспособлений могут быть предъявлены требования либо высокой электропроводности, либо высокого электросопротивления. Отмеченные особенности служат основанием для выделения приспособлений при ЭФХМО в самостоятельный класс станочных приспособлений.

## РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Электрод-инструмент (ЭИ) является одним из основных элементов технологической системы. Его параметры оказывают существенное влияние как на точность и производительность обработки, так и на экономическую целесообразность применения методов электрообработки вообще. Помимо общих требований к инструментам — стойкости, технологичности изготовления и экономичности — к электродам-инструментам предъявляют особые требования. Процессы электрообработки являются бесконтактными, т. е. между электродом-инструментом и заготовкой имеется межэлектродный зазор (МЭЗ), который зависит от режима обработки. Наличие МЭЗ приводит к необходимости при определении рабочей поверхности электрода-инструмента учитывать закономерности формообразования применяемого метода обработки. Такая особенность бесконтактных процессов формообразования обеспечивает их большие возможности (например, одним электродом-инструментом можно получать поверхности различных размеров и формы), но в то же время значительно усложняет расчет и корректирование рабочей поверхности инструмента [16, 26, 27, 33, 41, 42, 68]. Наилучшие результаты могут быть достигнуты при совместном расчете режимов обработки и параметров рабочей поверхности электрода-инструмента.

### РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОДОВ-ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ЭЭО

При обработке между торцовыми и боковыми поверхностями ЭИ и формируемой полостью образуются соответственно торцовый  $S_T$  и боковой  $S_B$  зазоры. Величина зазоров зависит от угла наклона боковых поверхностей ЭИ и обрабатываемой поверхности, режима обработки, материала электродов, глубины внедрения ЭИ в заготовку и от других факторов. В связи с неравномерным распределением в межэлектродном промежутке (МЭП) продуктов обработки фактическая величина МЭЗ, которая может быть пробита электрическим разрядом, является переменной по обрабатываемой поверхности. Размеры ЭИ определяются не только зазорами  $S_T$  и  $S_B$ , но и абсолютной величиной его износа  $h_s$ , которая при постоянном относительном линейном износе  $\gamma_{\text{лин}}$  зависит от толщины  $z$  слоя металла, удаленного в процессе обработки, т. е.  $h_s = z\gamma_{\text{лин}}$ .

Указанные факторы учитывают при расчете и коррекции рабочих поверхностей ЭИ при ЭЭО [72].

При коррекции размеров поверхностей ЭИ следует различать следующие случаи и объемного копирования (рис. 1).

При обработке фасонных поверхностей типа тел вращения без орбитального движения ЭИ (рис. 1, а) рабочие поверхности ЭИ следует выполнять эквидистантно поверхностям детали с учетом коррекции на  $z_{\text{в min}} + S_{T \text{ max}}$ , где  $z_{\text{в min}}$  — минимальный припуск на последующую обработку. Причем при использовании нескольких ЭИ и при различных режимах обработки размеры ЭИ занижают на величины коррекции, характерные для соответствующего режима.

При использовании одного ЭИ с последующим переключением режимов (от черного до чистового) размеры ЭИ занижают на величину коррекции, характерную для режима чистовой обработки.

При обработке фасонных поверхностей без орбитального движения ЭИ (рис. 1, б) использование одного ЭИ с переключением режимов по мере углубления невозможно, поскольку на входе в обрабатываемую полость имеются как торцовые, так и значительно превышающие их по величине боковые зазоры. Вертикальные участки ЭИ при этом следует выполнять эквидистантно профилю детали с учетом коррекции на  $z_{\text{в min}}$  и  $S_B$ , наклонные участки поверхности — на величины  $z_{\text{в min}}$  и  $S_{T \text{ max}}$ . Такой способ учета зазора частично исключает завышение припуска на последующую обработку, обеспечивая его относительную равномерность на входе в обрабатываемую полость.

При обработке фасонных поверхностей с орбитальным движением ЭИ (рис. 1, в) предварительное профилирование полости осуществляется при поступательном перемещении ЭИ, доводка поверхности производится при орбитальном движении ЭИ. Размеры ЭИ занижаются по горизонтальным сечениям на величину наибольшего зазора на входе в обрабатываемую полость и

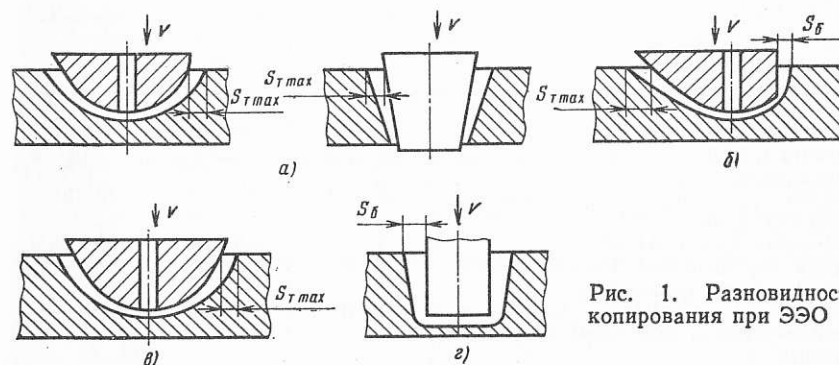


Рис. 1. Разновидности копирования при ЭЭО



припуска на доводку (высота неровностей + глубина измененного слоя после черного режима обработки).

Амплитуда колебаний ЭИ при орбитальном движении уменьшается по сравнению с величиной коррекции ЭИ на величину, равную образующемуся при доводке торцовому зазору ( $S_{\text{тmin}}$ ).

При обработке отверстий, пазов и щелей стержневым ЭИ с постоянным сечением (рис. 1, 2) его размеры следует занижать по отношению к размерам детали эквидистантно на величину  $z_{\text{вmin}}$  и  $S_{\text{бmax}}$ .

Вследствие фактической неравномерности  $S_{\text{б}}$  и  $S_{\text{т}}$  по поверхности электрода при коррекции размеров ЭИ по эквидистанте возникает погрешность обработки. На режимах чистовой обработки эта погрешность составляет 0,01...0,03 мм и во многих случаях не выходит за пределы допуска размера детали. На режимах черновой и получистовой обработки погрешность от неравномерности  $S_{\text{б}}$  достигает 0,3...0,5 мм,  $S_{\text{т}}$  — 0,2...0,25 мм. Предложена уточненная методика расчета рабочей поверхности ЭИ, учитывающая как неэквидистантность поверхностей заготовки и инструмента, так и износ ЭИ [66], позволяющая значительно уменьшить погрешность от неравномерности МЭЗ на режимах черновой обработки. Кроме того, погрешность может быть уменьшена за счет использования специальных приемов: орбитального движения ЭИ, отсоса рабочей жидкости. При обработке заготовок типа матриц вырубных штампов фактическая неравномерность МЭЗ используется для получения заданной чертежом конусности.

При повышенных требованиях к точности ЭЭО фасонной полости, особенно при обработке ее с последующей доводкой орбитальным движением ЭИ, профиль последнего корректируют по горизонтальным сечениям на величину  $z_{\text{вmin}} + S_{\text{тmin}}$ .

### 1. Значение параметров моделей, используемых для расчета размеров рабочей поверхности ЭИ

Параметр	Модель		
	1	2	3
Сила тока $I_{\text{ср}}$ , А	2...10	4...85	4...80
Частота $f$ , кГц	22...200	1...44	0,040...44
Скважность $q$	1,5...4,0	1,1...5,0	1,1...5,0
Амплитудное значение напряжения холостого хода $U_0$ , В	65...200	50...300	50...300
Плотность тока $j$ , А/см <sup>2</sup>	1...30	0,5...49,0	0,4...28,0
Длина вертикальной трассы эвакуации продуктов эрозии $h$ , мм	1...50	2...55	—
Отношение $Q/R$ , см <sup>2</sup> /с (характеризующее условия эвакуации продуктов эрозии)	1...10	0,14...36,0	—

Для расчета значений составляющих величины коррекции разработаны интерполяционные модели величины МЭЗ для различных пределов изменения параметров ЭЭО (табл. 1) [72].

Модель 1. Расчет бокового зазора, мм, на режимах чистовой обработки

$$\hat{S}_{\text{б}} = k (2,12 + 4,12I_{\text{ср}} - 0,0001f + 3,29q + 0,195U_0 + 0,39j + 0,785h - 0,065I_{\text{ср}}j - 0,02I_{\text{ср}}h - 0,008I_{\text{ср}}U_0) 10^{-3},$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от материала электродов;  $f$  — частота, Гц;  $j$  — плотность тока, А/см<sup>2</sup>;  $h$  — длина вертикальной трассы эвакуации продуктов эрозии, мм;  $q$  — скважность;  $U_0$  — амплитудное значение напряжения холостого хода, В.

Модель 2. Расчет бокового зазора, мм, на режимах черновой и получистовой обработки

$$\hat{S}_{\text{б}} = \frac{ke^{1,252I_{\text{ср}}^{0,377}q^{0,039}(\ln h)^{0,25}}}{(\ln f)^{1,65}U_0^{0,117}j^{0,076}(Q/R)^{0,083}},$$

где  $e$  — основание натуральных логарифмов, равное 2,71;  $R$  — радиус трассы эвакуации, мм;  $Q$  — расход жидкости, см<sup>3</sup>/с

Модель 3. Расчет  $S_{\text{тmin}}$  на режимах черновой и получистовой обработки

$$S_{\text{тmin}} = k \frac{I_{\text{ср}}^{0,59}f^{0,02}U_0^{0,5}j^{0,28}}{e^{7,1}q^{0,05}Q^{0,46}}.$$

За среднее значение тока принимают его значение при минимальной паузе между импульсами. Плотность тока определяется как отношение средней силы тока к площади обрабатываемой поверхности. Площадь обработки фасонных поверхностей выражается через площадь проекции всей поверхности на плоскость, перпендикулярную к направлению подачи ЭИ. За длину вертикальной трассы удаления продуктов эрозии принята длина вертикального участка, не подвергающегося непрерывному воздействию разрядов.

Данные по расходу рабочей жидкости в зависимости от параметров импульсов и площади обрабатываемой поверхности приведены в табл. 2. Если принудительной прокачки нет, то обновление жидкости обусловлено самим процессом ЭЭО и общий расход при этом можно считать равным 0,1...0,25 см<sup>3</sup>/с, при осцилляции ЭИ расход составляет 3...4 см<sup>3</sup>/с.

Рекомендуемые области применения моделей, определенные с учетом погрешности прогнозирования зазора (доверительные оценки) по модели, приведены в табл. 3.

### 2. Расход рабочей жидкости при различных режимах ЭЭО

Частота импульсов, кГц	Сила тока, А	Площадь обработки, мм <sup>2</sup>	Общий расход жидкости, см <sup>3</sup> /с
1...44	40...70	2000...3000	14...16
1...88	3...10	500...1000	5...12
88...440	2...12	50...500	1...3

### 3. Области применения моделей для расчета ЭИ

Операция	Допуск на размер, мм	Частота импульсов, кГц	Сила тока, А	Модель	Оценка точности расчета МЭЗ
Обработка объемных фасонных поверхностей и отверстий без осциллирующего движения	0,07	1...44	4...85	2	$\pm 0,010$
	0,03	22...200	2...10	1	$\pm 0,007$
	0,02	22...200	2...10	1	$\pm 0,006$
Доводка фасонных поверхностей с осциллирующим движением	0,08	1...44	4...80	3	$\pm 0,01$

### 4. Предельно допустимые концентрации продуктов эрозии в жидкости при различных режимах ЭЭО

Частота импульсов, кГц	Сила тока, А	Энергия импульсов, Дж	Массовая концентрация продуктов эрозии в жидкости, %
0,4	55	3,72	0,49
8	32	0,108	0,38
22	15	0,018	0,24
44	9	0,0055	0,16

Использование моделей для расчета зазоров за пределами выбранных областей (см. табл. 3) приводит к увеличению погрешности расчета значений зазоров. Приведенная в табл. 3 точность зазоров гарантируется при условии, что в МЭП поступает жидкость, в которой массовая концентрация продуктов эрозии не превышает значений, приведенных в табл. 4. В противном случае (сильно загрязненная нефилтрованная жидкость) истинные значения зазоров будут превышать расчетные.

Коэффициент  $K$ , учитывающий сочетание материалов электродов (инструмента и заготовки), имеет следующие значения:

Материал	$K$
Медь — сталь 45 . . . . .	1
Медь — твердый сплав . . . . .	0,5
Углеродистая сталь 45 . . . . .	0,7

Экспериментально установлено, что величина  $S_0$  при гребенчатых импульсах в 1,53 раза больше значений, получаемых расчетным путем по моделям для используемого значения силы тока  $I_{cp}$ .

Время ручного счета по моделям составляет 20—25 мин.

Для снижения трудоемкости расчета величин МЭЗ целесообразно использовать программируемые микрокалькуляторы

типа «Электроника БЗ-34». Программы для выполнения расчетов приведены в Приложениях 1—3.

Для выполнения расчетов вначале производят ввод соответствующей программы, затем ввод исходных данных и запуск программы. Ввод исходных данных сводится к набору значений переменных и записи их в соответствующую ячейку памяти. Так, для ввода силы тока  $I_{cp} = 30$  А необходимо нажать клавиши 30 и П2.

Запуск программы осуществляется командами В/О и С/П.

После останова микроЭВМ на индикацию выводится рассчитанное значение МЭЗ. Для повторения расчетов с другим набором исходных данных необходимо ввести новые значения переменных и нажать клавишу С/П.

Значение  $j$  при необходимости можно вывести на индикацию нажатием клавиш ИПД.

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА И КОРРЕКТИРОВКИ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА ПРИ ЭХО

При электрохимической обработке размеры рабочей поверхности ЭИ всегда отличаются от размеров обрабатываемой поверхности на величину МЭЗ. В первом приближении при проектировании ЭИ достаточно построить кривую, эквидистантную обработанной поверхности и отстоящую от нее на величину МЭЗ. Однако в связи с тем, что величина МЭЗ непостоянна в зоне обработки, для обеспечения требуемой точности детали в большинстве случаев необходимо производить корректировку рабочей поверхности катода.

При расчете формы ЭИ, как правило, принимают режим обработки стационарный, а начальный (до корректировки) профиль инструмента эквидистантным профилю детали. Методика расчета выбирается в зависимости от схемы обработки. В общем случае при определении рабочей поверхности катода с учетом изменения свойств межэлектродной среды (МЭС) в зоне обработки и неоднородности электрического поля возникают трудности. Поэтому часто при проектировании электродов исходят из концепции об идеальном процессе ЭХО и однородности электрического поля [3, 12].

При ЭХО поверхность можно обработать различными электродами, поэтому при проектировании ЭИ необходимо из множества электродов определить оптимальный, обеспечивающий максимальную производительность.

Все многообразие схем ЭХО при проектировании ЭИ можно разбить на две группы: копирующе-прошивочную (профилированный инструмент); протягивания, прошивания, разрезания (непрофилированный инструмент).

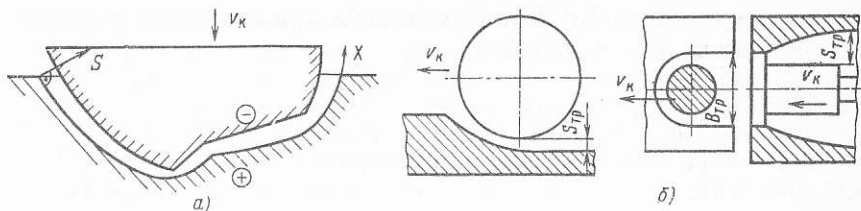


Рис. 2. Схемы ЭХО:

а — профилированным ЭИ; б — непрофилированным ЭИ

Для первой группы характерно одновременное формирование окончательно обработанной поверхности всей рабочей поверхностью катода (рис. 2, а). Эту схему используют при обработке поверхностей сложной формы (полостей штампов и пресс-форм, пера лопаток и т. д.) [12, 17]. В данном случае требуемая анодная поверхность полностью задана и может быть использована при проектировании катода.

Для второй группы окончательно обработанная поверхность формируется не всей поверхностью катода (рис. 2, б) [5, 13]. Обеспечить заданное значение  $S_{тр}$  необходимо лишь на выходе из зоны обработки

$$S_{тр} = S(x_k, t),$$

где  $t$  — текущее время.

В этом случае размеры и форма анодной поверхности заданы не полностью, поэтому при проектировании электрода их нужно либо задавать, либо определять из дополнительных условий. Часто заранее задается форма ЭИ, а размеры его определяют в результате расчета.

Условие стационарности процесса ЭХО в системе координат, связанной с заготовкой, имеет вид:

$$S = \frac{\eta \varepsilon (U - \Delta U) \kappa_0 (1 - \varphi)^n [1 + \beta (T - T_0)]}{\gamma v_k \cos \alpha_a}, \quad (1)$$

где  $\eta$  — выход по току обрабатываемого материала;  $\varepsilon$  — электрохимический эквивалент обрабатываемого материала, г/(А·с);  $U$  — напряжение, В;  $\Delta U$  — падение напряжения в приэлектродных слоях, В;  $\kappa_0$  — удельная электрическая проводимость электролита, См/м;  $\varphi$  — удельное объемное газосодержание;  $n$  — коэффициент;  $T$  — температура электролита, К;  $T_0$  — начальная температура электролита, К;  $\beta$  — температурный коэффициент, К<sup>-1</sup>;  $\gamma$  — плотность обрабатываемого материала, г/мм<sup>3</sup>;  $v_k$  — скорость подачи ЭИ, мм/с;  $\alpha_a$  — угол между внешней нормалью к обрабатываемой поверхности и направлением подачи.

Расчеты по данной формуле показывают, что при значениях  $\alpha_a$ , близких к  $\pi/2$ , незначительное увеличение  $\alpha_a$  приводит к резкому изменению  $S$  (рис. 3) и, как следствие, к усложнению рабочей поверхности катода. Кроме того, вследствие значительной неоднородности электрического поля при  $\alpha_a \approx \pi/2$  точность определения рабочей поверхности катода будет невысокой. Расчетную формулу (1) можно использовать при  $\alpha_a \leq \pi/3$ .

При  $\alpha_a \geq \pi/3$  удобнее использовать условие стационарности процесса ЭХО в системе координат, связанной с катодом:

$$\sin \alpha_k \frac{\partial S}{\partial l} + \cos \alpha_k = \frac{\eta \varepsilon (U - \Delta U) \kappa_0 (1 - \varphi)^n [1 + \beta (T - T_0)]}{\gamma v_k S}, \quad (2)$$

где  $l$  — координата, отсчитываемая вдоль обрабатываемой поверхности, мм;  $\alpha_k$  — угол между внешней нормалью к поверхности катода-инструмента и направлением подачи.

При электрохимической обработке криволинейных поверхностей по мере съема припуска увеличивается площадь обрабатываемой поверхности, что необходимо учитывать при проектировании ЭИ. Зависимость, учитывающая кривизну обрабатываемой поверхности [53],

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{C}{(r_k + S) \ln(1 + S/r_k)} - v_k \cos \alpha_k \quad (3)$$

справедлива лишь при обработке цилиндрических поверхностей. В общем случае поверхность характеризуется кривизной в двух направлениях (сфера, эллипсоид и т. д.).

Для получения уравнения динамики МЭЗ с учетом кривизны обрабатываемой поверхности выделим на поверхности катода элементарную площадку со сторонами длиной  $dl$  и  $dk$ , параллельными направлениям главных кривизн.

В предположении эквидистантности поверхностей заготовки и ЭИ соответствующая площадка на обрабатываемой поверхности будет иметь другие размеры, а именно

$$dl + \frac{dl}{R_1} S, \quad dk + \frac{dk}{R_2} S, \quad (4)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  — радиусы главных кривизн, а уравнения динамики МЭЗ запишутся в следующем виде:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -v_k \sin \alpha_k \frac{\partial S}{\partial l} - v_k \cos \alpha_k +$$

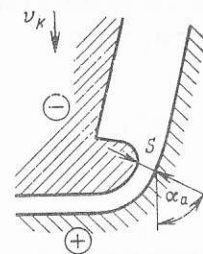


Рис. 3. Форма рабочей поверхности ЭИ



$$\pm \frac{\eta \epsilon}{\gamma} \frac{(U - \Delta U) \kappa (R_2 - R_1)}{(R_1 + S)(R_2 + S) \ln \frac{(R_1 + S) R_2}{(R_2 + S) R_1}} \text{ при } R_1 \neq R_2; \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -v_k \sin \alpha_k \frac{\partial S}{\partial l} - v_k \cos \alpha_k \pm \frac{\eta \epsilon}{\gamma} \frac{(U - \Delta U) \kappa R_1}{S(R_1 + S)} \text{ при } R_1 = R_2.$$

Полученные уравнения динамики МЭЗ позволяют при заданной форме рабочей поверхности катода определять форму обрабатываемой поверхности как в стационарном ( $\frac{\partial S}{\partial t} = 0$ ), так и в нестационарном режимах для различных схем обработки (протягивание и прошивание отверстий; копировально-прошивочные операции и т. д.). Кроме того, уравнения (5) могут быть использованы для определения формы рабочей поверхности электрода-инструмента, если задана форма обрабатываемой поверхности.

Для оценки влияния кривизны обрабатываемой поверхности на величину МЭЗ составлена программа и выполнены расчеты на ЭВМ.

Определялись торцовые зазоры при ЭХО плоским, цилиндрическим и сферическим электродами.

Установлено, что при отношениях  $R/S_T \leq 15 \dots 20$  кривизна обрабатываемой поверхности существенно влияет на величину МЭЗ. Так, при  $R = 5$  мм  $S_{T,п} = 1,1$  мм,  $S_{T,ц} = 1$  мм,  $S_{T,с} = 0,93$  мм, т. е. погрешность составляет 0,17 мм. Причем с уменьшением отношения  $R/S_T$  погрешность увеличивается и может достигнуть 0,3 мм и более.

При оптимальном режиме ЭХО должна быть обеспечена заданная точность обработки, поэтому необходимым является установление функциональной зависимости между точностью обработки, режимами ЭХО, размерами и формой ЭИ. Погрешность размера детали равна погрешности МЭЗ, который является замыкающим звеном технологической цепи.

Следовательно, для решения поставленной задачи требуется рассмотреть закономерности формирования МЭЗ [4].

Распределение МЭЗ при выполнении копировально-прошивочных операций ЭХО определяется решением дифференциального уравнения (5). В стационарном режиме при  $S \ll R_1$ ,  $S \ll R_2$  уравнение (5) можно записать в виде

$$\cos \alpha_k \pm \sin \alpha_k \frac{dS}{dl} = \frac{S_T}{S}, \quad (6)$$

где  $S_T = \frac{\eta \epsilon (U - \Delta U) \kappa}{\gamma v_k}$  — торцовый МЭЗ, мм.

Анализ уравнения (6) показывает, что с увеличением  $S_T$  возрастает и погрешность копирования:

$$\Delta = \max_{l \in L} (S(l) - S_T).$$

Требуемая точность обработки будет обеспечена, если

$$\Delta \leq \delta,$$

где  $\delta$  — допуск, заданный чертежом.

Зная зависимость  $\Delta$  от  $S_T$ , можно определить максимально допустимую величину торцового МЭЗ —  $S_{T, \max}$ , обеспечивающую требуемую точность обработки.

При ЭХО скорректированным катодом неравномерность распределения МЭЗ компенсируется коррекцией профиля катода, что снимает ограничение по максимально допустимой величине  $S_T$ .

Основными ограничениями, определяющими область допустимых режимов обработки, являются: ограничение по массовому выносу из МЭП продуктов обработки; ограничение по нагреву электролита; ограничение по устойчивости процесса ЭХО.

Эти ограничения можно записать в виде соответствующих им неравенств

$$\frac{U^2}{v_3 S_T^2} \leq \frac{\gamma_0 D^2 (C_a - C_{вх})}{21,5 \tau^2 \epsilon^2 v \kappa_0^2 l_T} \left( \frac{D}{v} \right)^{-\frac{2}{3}}; \quad (7)$$

$$\frac{U^2}{v_3 S_T^2} \leq \frac{(T_{\max} - T_0) c \rho_3}{0,24 \kappa_0 l_T}; \quad (8)$$

$$\frac{U}{v_3 S_T^2 p_B} \leq \frac{2}{\eta_{в} \epsilon_{в} \kappa_0 R_T T l_T}, \quad (9)$$

где  $v_3$  — скорость электролита, мм/с;  $\gamma_0$  — плотность продуктов обработки, г/мм<sup>3</sup>;  $D$  — коэффициент диффузии, мм<sup>2</sup>/с;  $C_a$  — концентрация продуктов обработки на аноде;  $C_{вх}$  — концентрация продуктов обработки на входе в рабочую зону,  $v$  — кинематическая вязкость электролита, мм<sup>2</sup>/с;  $l_T$  — длина тракта течения электролита в МЭП, мм;  $T_{\max}$  — максимально допустимая температура электролита, К;  $T_0$  — начальная температура электролита, К;  $c$  — удельная теплоемкость электролита, Дж/(г·К);  $\rho_3$  — плотность электролита, г/мм<sup>3</sup>;  $p_B$  — давление на выходе из зоны обработки, Па;  $R_T$  — универсальная газовая постоянная, мм<sup>2</sup>/(с<sup>2</sup>·К);  $\eta_{в}$ ,  $\epsilon_{в}$  — выход по току и электрохимический эквивалент выделения водорода, соответственно, г/(А·с).

Кроме отмеченных выше ограничений, необходимо учитывать еще и следующие:

$p_B \leq p_n$  — т. е. давление на выходе из МЭП не должно превышать давления, развиваемого насосом;

$p_b \geq p_a$  — т. е. давление на выходе из МЭП не должно быть меньше атмосферного;

$U \leq U_{\max}$  — т. е. рабочее напряжение не должно превышать максимального напряжения, развиваемого источником питания.

В качестве целевой функции при выборе режимов обработки будем использовать время обработки

$$t_0 = z/v_{\text{ЭХО}} \Rightarrow \min,$$

где  $z$  — припуск на обработку;  $v_{\text{ЭХО}}$  — скорость анодного растворения материала.

В большинстве случаев припуск на обработку задан, поэтому за критерий оптимальности можно принять скорость анодного растворения

$$v_{\text{ЭХО}} \Rightarrow \max.$$

Установлено, что  $v_{\text{ЭХО}}$  связана с параметрами обработки следующим образом:

$$v_{\text{ЭХО}} = \frac{\gamma \epsilon \kappa_0 U}{\gamma S_T} [1 + \beta(T - T_0)] \left(1 - \frac{\eta_B \epsilon_B U \kappa_0 R_T T_0 l_T}{2v_B p_B S_T^2}\right)^2. \quad (10)$$

Под режимом ЭХО будем понимать совокупность трех параметров:  $U$  — напряжения,  $B$ ;  $S_T$  — торцового межэлектродного зазора, мм;  $p_b$  — давления электролита на выходе из зоны обработки, Па.

Под оптимальным будем понимать режим электрохимической обработки, обеспечивающий максимальную скорость анодного растворения (10) при выполнении ограничений (7)–(9).

Выбор оптимальных режимов ЭХО представляет собой задачу нелинейного программирования, для решения которой имеется некоторый набор методов — методы центров, внутренних и внешних штрафных функций и др. Однако эти методы не могут быть реализованы при выполнении расчетов на микроЭВМ «Электроника БЗ-34», из-за ее ограниченных возможностей по объему памяти для чисел и команд.

Это заставляет использовать для решения задачи метод перебора, при котором параметры режима ЭХО изменяются с некоторым шагом, и в таком случае каждый раз вычисляют значение  $v_{\text{ЭХО}}$ .

Оптимальные значения  $S_T$  и  $p_b$  определим, используя метод перебора, рассчитывая  $v_{\text{ЭХО}}$  при различных значениях  $S_T$  и  $p_b$  и фиксируя, в каком случае  $v_{\text{ЭХО}}$  будет иметь максимальное значение. Алгоритм расчета представлен на рис. 4.

Учитывая, что для большинства обрабатываемых материалов и применяемых электролитов некоторые параметры практически одинаковы, получим

$$A_1 = 3,9425 \cdot 10^4 \kappa_0 T_0 l_T;$$

$$A_2 = 4,8 \kappa_0 l_T;$$

$$A_3 = \min \left\{ \frac{1}{1,5 \cdot 10^5 \eta \epsilon \kappa_0 \sqrt{l_T}}; \right.$$

$$\left. \sqrt{\frac{T_{\max} - T_0}{1000 \kappa_0 l_T}} \right\};$$

$$A_4 = 60 l_T;$$

$$v_3 = \sqrt{(A_4/S_T)^2} + \rightarrow + 2 \cdot 10^3 (p_b - p_a) - A_4/S_T^2;$$

$$A_0 = (p_b v_3 S_T^2)/A_1;$$

$$U_1 = A_0/3; U_2 = A_3 S_T \sqrt{v_3};$$

$$U_{\text{опт}} = \min \{U_1, U_2\};$$

$$v_{\text{ЭХО}} = \frac{\gamma \epsilon \kappa_0}{\gamma} \frac{U_{\text{опт}}}{S_T} \times$$

$$\times \left( A_2 \frac{U_{\text{опт}}^2}{v_3 S_T^2} + 1 \right) \times$$

$$\times \left( 1 - \frac{U_{\text{опт}}}{A_0} \right)^2.$$

Для записи значений переменных, которые неоднократно используются в ходе вычислений, произведем предварительное распределение регистровой памяти микроЭВМ (табл. 5).

Значения  $A_1, A_2, A_4$  и составляющие  $A_3$ , которые не изменяются в ходе вычислений по программе, целесообразно вычислять в режиме калькулятора:

$$A_1 \rightarrow 3,9425 \text{ ВП } 4 \uparrow \kappa_0 \times T_0 \times l_T \times \text{П1};$$

$$A_2 \rightarrow 4,8 \uparrow \kappa_0 \times l_T \times \text{П2}; A_4 \rightarrow 60 \uparrow l_T \times \text{П4}.$$

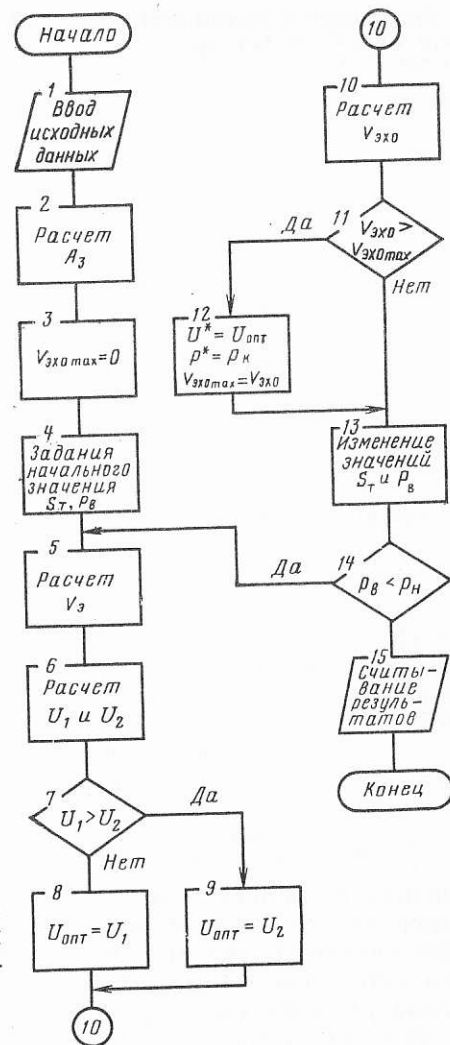


Рис. 4. Схема алгоритма расчета оптимальных режимов ЭХО

5. Распределение регистровой памяти микроЭВМ при расчете режимов ЭХО

Переменная	Ячейка регистровой памяти
$A_0$	П0
$A_1$	П1
$A_2$	П2
$A_3$	П3
$A_4$	П4
$\rho_n$	П5
$\rho_b$	П6
$S_T$	П7
$U_{opt}$	П8
$\rho_b$	П9
$U$	ПА
$v_{\text{ЭХО}}^p$	ПВ
$v_{\text{ЭХО}}$	ПС
$2 \cdot 10^3$	ПД

При вычислении двух значений  $A_3$  в режиме калькулятора первое значение записывают в ячейку памяти П3, а второе в — П0. Выбор минимального из этих двух значений целесообразно осуществить по программе

$$A_3^3 \rightarrow 1 \uparrow 1,5 \text{ВП5} \div \eta \div \varepsilon \div \kappa_0 \div l_T F V \div \text{П3};$$

$$A_3^0 \rightarrow T_{\max} \uparrow T_0 - 1000 \div \kappa_0 \div l_T \div F V \text{П0}.$$

Множитель  $\frac{\eta \varepsilon \kappa_0}{\gamma}$  в выражении (10) не оказывает никакого влияния на определение оптимальных режимов обработки, поэтому для уменьшения используемых переменных при расчетах этот множитель будем считать равным единице. Для нахождения действительной величины  $v_{\text{ЭХО}}$  полученное расчетное значение  $v_{\text{ЭХО}}^p$  необходимо умножить на фактическое  $\eta \varepsilon \kappa_0 / \gamma$ .

Составляем программу расчета оптимальных режимов электрохимической обработки (приложение 4).

Для выполнения расчетов по программе необходимо подготовить и ввести в микроЭВМ исходные данные (табл. 6).

При предварительных вычислениях в режиме калькулятора и при вводе исходных данных необходимо вместо обозначений переменных вводить в микроЭВМ их числовые значения.

После ввода в микроЭВМ программы и исходных данных по командам В/О, С/П осуществляется запуск автоматического выполнения программы. Продолжительность вычислений около 5 мин.

6. Исходные данные для расчета на микроЭВМ режимов ЭХО

Параметр	Обозначение	Единица
Удельная электрическая проводимость электролита	$\kappa_0$	См/мм
Начальная температура электролита	$T_0$	К
Максимально допустимая температура электролита	$T_{\max}$	К
Длина тракта течения электролита в МЭП	$l_T$	мм
Выход по току обрабатываемого материала	$\eta$	—
Давление на выходе из зоны обработки	$\rho_b$	Па
Межэлектродный зазор	$S_T$	мм

После останова микроЭВМ результаты расчета помещаются в стековых регистрах, осуществляется индикация  $v_{\text{ЭХО}}^p$ .

При последовательном нажатии клавиш  $r \cup \bigcirc$  на индикацию выводятся значения  $\rho_b$ ,  $U$ ,  $S_T$ .

Однократное выполнение программы осуществляет расчет оптимальных значений  $\rho_b$ ,  $U$  при заданном значении  $S_T$ . Чтобы определить, при каком значении  $S_T$  достигается максимальная производительность обработки, требуется выполнить программу несколько раз при различных значениях  $S_T$ . Для запуска программ при новом значении  $S_T$  необходимо выполнить следующие действия:

$$1 \text{ ВП5 П6}$$

$$S_T \text{ П7}$$

$$C/P.$$

Выполнение программ с новым выбором исходных данных осуществляется в соответствии с приведенной выше последовательностью ввода исходных данных.

Из таблицы или построенных графиков (см., например, рис. 7) определяют максимальное значение  $v_{\text{ЭХО}}^p$  и соответствующие ему значения  $S_T$ ,  $U$  и  $\rho_b$ , которые представляют собой оптимальные режимы размерной электрохимической обработки.

Фактическое значение  $v_{\text{ЭХО}}$ , мм/с, определяется по расчетному:

$$v_{\text{ЭХО}} = \frac{\eta \varepsilon \kappa_0}{\gamma} v_{\text{ЭХО}}^p.$$

Полученные оптимальные режимы обработки могут быть использованы при ЭХО корректированным ЭИ. При ЭХО некорректированным ЭИ может быть не обеспечена точность обработки. Для обеспечения требуемой точности детали необходимо определить максимально допустимое значение  $S_{T\max}$ .

Распределение межэлектродных зазоров по обрабатываемой поверхности определяется уравнением (6). Для численного решения этого дифференциального уравнения разобьем контур катода-инструмента на участки (рис. 5) таким образом, чтобы точки локального минимума кривой, описывающей контур катода, соответствовали начальным точкам участка, а точки локального максимума — конечным точкам. Далее каждый участок разбиваем на элементарные участки и задаем расчетные точки. Число расчетных точек на участке определяется сложностью и длиной профиля катода на данном участке и необходимой точностью расчетов.

Обозначим через  $S_{ij}$  и  $h_{ij}$  межэлектродный зазор и длину элементарного участка в  $j$ -й расчетной точке  $i$ -го участка.



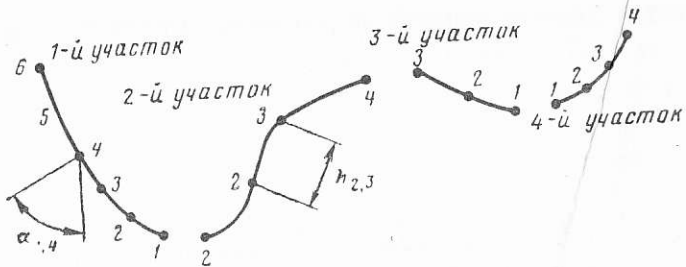


Рис. 5. Схема разбиения профиля ЭИ

В соответствии с приведенной схемой разбиения профиля катода уравнение (6) примет вид

$$\sin \alpha_{ij} \frac{S_{ij} - S_{ij-1}}{h_{ij}} + \cos \alpha_{ij} = \frac{S_{\tau}}{S_{ij}}, \quad (11)$$

$S_{ij} = S_{\tau}$  для всех значений  $i$ .

При малых значениях  $\alpha_{ij}$  первый член в уравнении (11) мал, поэтому решение уравнения можно записать так:

$$S_{ij} = \frac{S_{\tau}}{\cos \alpha_{ij}} \text{ при } \alpha_{ij} \leq \pi/6.$$

При больших значениях  $\alpha_{ij}$

$$S_{ij}^2 + \left( \frac{\cos \alpha_{ij}}{\sin \alpha_{ij}} h_{ij} - S_{ij-1} \right) S_{ij} - \frac{h_{ij}}{\sin \alpha_{ij}} S_{\tau} = 0,$$

откуда

$$S_{ij} = \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{h_{ij}}{\sin \alpha_{ij}} \cos \alpha_{ij} - S_{ij-1} \right)^2 + \frac{h_{ij} S_{\tau}}{\sin \alpha_{ij}}} - \frac{1}{2} \left( \frac{h_{ij} \cos \alpha_{ij}}{\sin \alpha_{ij}} - S_{ij-1} \right) \text{ при } \alpha_{ij} > \pi/6.$$

Расчет распределения МЭЗ производится последовательно для всех участков, начиная со второй расчетной точки.

Распределение регистров памяти микроЭВМ приведено в табл. 7.

Программа расчета распределения межэлектродных зазоров дана в Приложении 5.

Первоначальный ввод исходных данных и запуск программы производят в следующей последовательности:

F АВТ

В/О

S<sub>τ</sub> П1

N ПО

h<sub>ij</sub> П4

α<sub>ij</sub> П5

С/П,

где N — число расчетных точек на участке.

После останова микроЭВМ на индикацию выводится значение  $S_{ij}$ , а после нажатия клавиш F<sub>4</sub> на индикацию выводится значение  $\Delta = S_{ij} - S_{\tau}$ . Результаты расчета считываются с индикатора и записываются в таблицу (см., например, табл. 8).

Для выполнения расчетов для следующей расчетной точки данного участка необходимо выполнить следующие действия:

h<sub>ij</sub> П4

α<sub>ij</sub> П5

С/П.

Далее производится расчет для следующей точки участка. После выполнения расчетов для всех точек участка осуществляется переход к расчету следующего участка:

С/П

N ПО

h<sub>ij</sub> П4

α<sub>ij</sub> П5

С/П,

где h<sub>ij</sub>, α<sub>ij</sub> — шаг и угол для второй точки следующего участка.

После выполнения расчетов определяем максимальное значение Δ. Если Δ > δ (где δ — допуск на размер), то уменьшаем значение S<sub>τ</sub> и повторяем расчет погрешности обработки. Этот процесс повторяется до тех пор, пока Δ не станет меньше δ. Значение S<sub>τ</sub>, при котором это условие будет выполнено, и будет представлять собой максимально допустимое значение S<sub>τmax</sub>, обусловленное точностью обработки.

#### 7. Распределение регистров памяти микроЭВМ при расчете МЭЗ

Переменная	Ячейка регистровой памяти	Переменная	Ячейка регистровой памяти
S <sub>τ</sub>	П1	S <sub>ij</sub>	П3
N	П2	h <sub>ij</sub>	П4
S <sub>ij-1</sub>	П3	α <sub>ij</sub>	П5

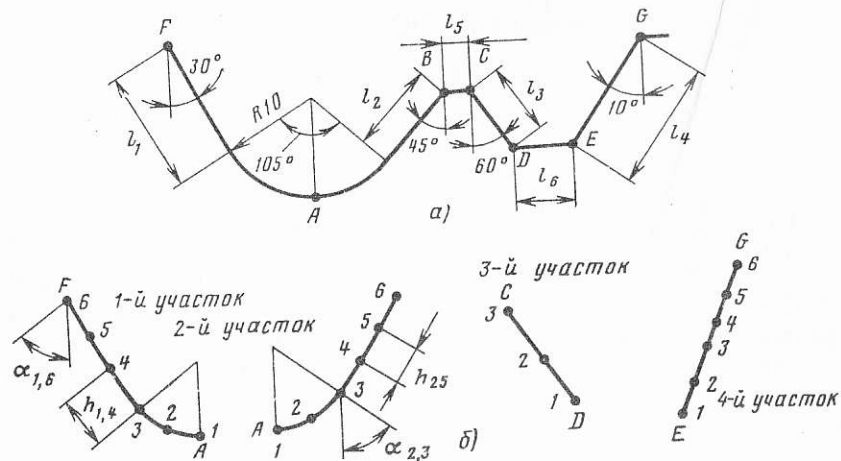


Рис. 6. Профиль обрабатываемой поверхности (а)  $l_1=50$  мм;  $l_2=30$  мм;  $l_3=20$  мм;  $l_4=30$  мм;  $l_5=10$  мм;  $l_6=15$  мм; схема разбиения профиля на участки (б)

Используя полученное значение  $S_{Tmax}$  и ранее построенные графики  $v_{ЭХО} - S_T$ ;  $U - S_T$ ;  $p_B - S_T$ , определяем оптимальные режимы ЭХО с некорректированным ЭИ.

Произведем расчет режимов ЭХО и распределения МЭЗ для получения заданного профиля (рис. 6, а). Материал заготовки — сталь 20X13, допустимая погрешность обработки  $\delta=0,5$  мм, шероховатость поверхности  $Ra=2,5$  мкм.

Для данного контура точки F, A, B, C, D, E и G имеют угол  $\alpha=0$ , причем локальный минимум контура достигается в точках A, D, E. В соответствии с этим разбиваем обрабатываемый контур на четыре участка AF, AB, DC, EG (рис. 6, б). На участках BC и DE  $\alpha=0$ , поэтому во всех точках этих участков межэлектродный зазор постоянен и равен  $S_T$ . На каждом участке задаем расчетные точки, данные о которых заносим в табл. 8.

Используя справочную литературу [48], выбираем состав электролита и определяем значение параметров обработки.

Для стали 20X13 рекомендуется использовать 15%-ный водный раствор NaCl; выход по току  $\eta$  составляет 0,74, а максимальная температура электролита  $T=323$  К [48]. Удельная электрическая проводимость электролита  $\kappa_0=15$  См/м. Для обработки заготовки размером  $200 \times 100 \times 80$  мм выбираем станок 4421, обеспечивающий рабочее напряжение до 24 В и максимальное давление электролита 1,8 МПа [48].

Электрохимический эквивалент и плотность стали 20X13

$$\epsilon = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ г/(А·с)}; \gamma = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ г/мм}^3.$$

Направление подачи электролита перпендикулярно плоскости чертежа (рис. 6), длина МЭП равна 50 мм.

Начальную температуру электролита принимаем равной  $T=293$  К. Расчет режимов обработки производят при следующих значениях  $S_T$ :

$$S_T = \{0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9\} \text{ мм.}$$

Результаты расчета представлены в виде графиков (рис. 7).

Так как максимальное напряжение источника питания 24 В, то максимальная производительность обработки достигается при следующих режимах:

$$S_T = 0,43 \text{ мм}; U = 24 \text{ В}; p_B = 520\,000 \text{ Па};$$

$$v_{ЭХО max} = \frac{\eta \epsilon \kappa_0}{\gamma} v_{ЭХО}^p = \frac{0,74 \cdot 2,8 \cdot 10^{-4} \cdot 0,015}{7,8 \cdot 10^{-3}} 67 \text{ мм/с};$$

$$v_{ЭХО max} = 2,6696 \cdot 10^{-2} \text{ мм/с} \approx 1,6 \text{ мм/мин.}$$

Чтобы проверить при найденных оптимальных режимах ЭХО ограничения по точности обработки, вводим в память микроЭВМ программу расчета распределения межэлектродных зазоров.

Исходные данные берем из табл. 8. В нее же записываем результаты расчета.

Полученное распределение межэлектродных зазоров может быть использовано для определения коррекции электрода-инструмента, если значение  $\Delta > \delta$  и обработку планируется вести корректированным катодом. Профиль корректированного катода строится следующим образом.

В расчетных точках откладывают по нормали к контуру величины МЭЗ. Полученные точки соединяются плавной линией, которая и представляет собой профиль корректированного катода-инструмента.

Трудоемкость изготовления корректированного ЭИ часто значительно выше трудоемкости изготовления некорректированного ЭИ. Поэтому для окончательного выбора схемы обработки необходимо сравнить максимальные производительности этих двух схем.

Определение оптимальных режимов ЭХО для схемы с некорректированным ЭИ заключается в расчете величины  $S_{Tmax}$ , т. е. такого значения (максимального значения)  $S_T$ , при котором будет обеспечена заданная точность обработки и последующего

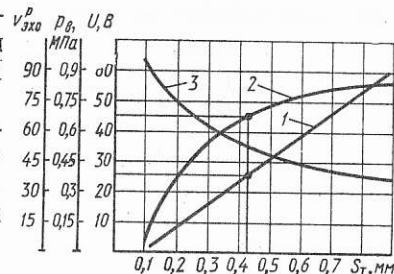


Рис. 7. К определению оптимальных режимов ЭХО:

1 — U; 2 —  $v_{ЭХО}^p$ ; 3 —  $p_B$

### 8. Исходные данные и результаты расчета распределения МЭЗ

Номер участка	Номер расчетной точки	Исходные данные		Результаты расчета	
		$h_{ij}$ , мм	$\alpha_{ij}$	$S_{ij}$ , мм	$\Delta_{ij}$ , мм
1	1	—	—	0,43	0
	2	5	30	0,49652121	0,06652121
	3	5	60	0,782486	0,352486
	4	17	60	0,8537767	0,4237967
	5	17	60	0,8595055	0,4295005
	6	17	60	0,8599597	0,4299597
2	1	—	—	0,43	0
	2	3,5	22,5	0,46542863	0,03542863
	3	3,5	45	0,5876008	0,1586008
	4	10	45	0,6069381	0,1769381
	5	10	45	0,6080444	0,1780444
	6	10	45	0,6081078	0,1781078
3	1	—	—	0,43	0
	2	10	30	0,49652121	0,06652121
	3	10	30	0,4952121	0,06652121
4	1	—	—	0,43	0
	2	6	80	1,3347715	0,9047715
	3	6	80	1,7628914	1,3318914
	4	6	80	2,0089767	1,5789767
	5	6	80	2,1625893	1,7324893
	6	6	80	2,2624672	1,8324672

определения по ранее построенным графикам соответствующих оптимальных режимов обработки.

Алгоритм определения  $S_{Tmax}$  следующий.

1. Задать начальное значение  $S_T$ .

2. Провести расчет распределения МЭЗ (по программе, см. Приложение 5).

3. Если получаем  $\Delta > \delta$ , то уменьшаем  $S_T$  на величину  $\delta S_T = 0,2$  мм, если  $\Delta \leq \delta$ , то увеличиваем  $S_T$  на  $\delta S_T = 0,2$  мм.

4. Производим расчет  $\Delta$  при новом значении  $S_0$ . Если характер соотношения  $\Delta$  и  $\delta$  не изменялся, т. е.  $\Delta > \delta$  или  $\Delta \leq \delta$ , то аналогично п. 3 изменяем  $S_T$  на величину  $\delta S_T$  и снова проводим расчет  $\Delta$ . Эти действия циклически повторяются до тех пор, пока не изменится характер отношения, т. е. вместо  $\Delta > \delta$  станет  $\Delta \leq \delta$ , и наоборот.

5. Производим последовательно расчеты  $\Delta$  при различных значениях  $S_T$ , причем каждый раз шаг изменения  $\delta S_T$  делим пополам. Этот пункт выполняется до тех пор, пока величина  $\delta S_T$  станет меньше, чем 0,05 мм.

6. Полученное значение  $S_T$  и представляет собой максимально допустимое значение  $S_{Tmax}$  по точности обработки, т. е.  $S_{Tmax}$ .

В рассматриваемом примере максимальная погрешность имеет место на четвертом участке EG. Ее значение в шестой расчетной точке равно 1,8324672 мм, что значительно больше допуска ( $\delta = 0,5$  мм). Таким образом, при  $S_T = 0,43$  мм обработку необходимо производить с использованием скорректированного ЭИ.

Оценим возможность обработки некорректированным электродом, т. е. найдем величину  $S_{Tmax}$ . При этом расчет будем проводить только для одного четвертого участка, который является лимитирующим по точности обработки. Зададим  $S_T = 0,1$  мм и произведем расчет  $\Delta$ .

Максимальное значение погрешности  $0,47390007 < \delta$ , поэтому увеличиваем  $S_T$  до 0,15 мм и снова проведем расчет. При этом получаем, что максимальное значение погрешности равно 0,70448257. Таким образом, установлено, что  $S_{Tmax} \approx 0,1$  мм. Используя результаты расчета (см. рис. 7), определяем, что при  $S_T = 0,1$  мм

$$v_{\text{ЭХО max}} = \frac{0,74 \cdot 2,8 \cdot 10^{-4} \cdot 0,015}{7,8 \cdot 10^{-3}} \cdot 5,18 = 2,063 \cdot 10^{-3} \text{ мм/с;}$$

$$v_{\text{ЭХО max}} = 0,12378 \text{ мм/мин.}$$

Полученное значение скорости обработки (0,12378 мм/мин) почти в 10 раз меньше соответствующей скорости при обработке с скорректированным катодом (1,6 мм/мин) и сопоставимо с производительностью импульсно-циклических схем ЭХО. Таким образом, результаты расчета позволяют сделать вывод, что в данном случае целесообразно использовать схему ЭХО с скорректированным электродом или же применять импульсно-циклические схемы электрохимической обработки.

### КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ

Инструменты для размерной УЗО могут присоединяться к концентратору-волноводу неразъемным (например, пайкой) или разъемным способом (например, резьбовым соединением).

Часто функции инструмента выполняет концентратор-волновод, т. е. УЗО осуществляется нижней частью концентратора-волновода, которую выполняют необходимой формы.

По технологическому назначению различают инструменты для обработки одной детали и инструменты для обработки нескольких заготовок или нескольких элементов одной заготовки.

**Концентраторы-волноводы и их расчет.** Концентраторы-волноводы служат для передачи ультразвуковой энергии от преобразователя к инструменту с трансформацией колебаний малой



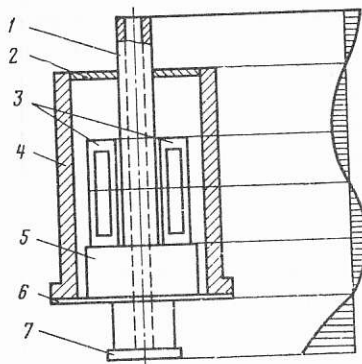


Рис. 8. Многоопорный ультразвуковой вибратор:

1 — хвостовик; 2, 4, 6 — опорные элементы; 3 — преобразователь; 5 — концентратор-волновод; 7 — инструмент

для многонаправленной передачи акустической энергии от одного преобразователя. Такие системы могут быть также использованы для аккумуляции ультразвуковой энергии, когда ультразвуковые колебания суммируются от нескольких преобразователей и передаются в одном направлении.

Оригинальная конструкция многоопорного концентратора-волновода [А. с. 246171 (СССР)] позволяет максимально приблизить преобразователь к зоне обработки (рис. 8).

При УЗО наибольшее применение получили концентраторы-волноводы продольных колебаний ступенчатой, экспоненциальной, конусной и катеноидальной форм (табл. 9).

Для исключения появления поперечных колебаний необходимо обеспечить условие  $d_{\max}/\lambda < 0,3$ , где  $d_{\max}$  — максимальный диаметр концентратора;  $\lambda$  — длина волны.

Проектирование концентраторов обычно сводится к выбору материалов и конструкции в соответствии с решаемой технологической задачей и к расчету геометрических размеров.

При расчете концентраторов используют уравнение собственных колебаний однородного стержня переменного сечения, в котором имеют место плоские гармонические продольные колебания и отсутствуют поперечные колебания, т. е. концентратор колеблется только вдоль осевой линии:

$$\frac{d^2\xi}{dx^2} + \frac{1}{S} \frac{dS}{dx} \frac{d\xi}{dx} + k^2\xi = 0, \quad (12)$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения;  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число;  $\xi$  — величина смещения.

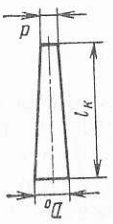
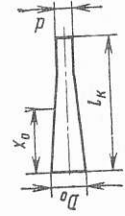
амплитуды ( $A = 5 \dots 10$  мкм) на входном торце волновода-концентратора в колебания большей амплитуды ( $A = 20 \dots 60$  мкм), сосредотачиваемые на выходном торце концентратора-волновода меньшей площади.

Концентраторы-волноводы по типу ультразвуковых колебаний разделяются соответственно на концентраторы-волноводы продольных, изгибных или поперечных колебаний, а также концентраторы-волноводы продольно-изгибных, продольно-радиальных колебаний.

Комбинируя несколько волновод-концентраторов в одну конструкцию, можно получить более сложные концентраторы-волноводы

9. Формулы для расчета полуволновых ультразвуковых концентраторов

Концентратор	Закон изменения образующей	Значение $k_y$	Резонансная полуволновая длина $l_k$ , см	Координата узла смещения $x_0$ , см
	$D_x = D_0$ при $0 \leq x \leq \frac{l_k}{2}$ $D_x = d$ при $\frac{l_k}{2} \leq x \leq l_k$	$(D_0/d)^2 = N^2$	$\lambda/2 = c/2f$	$l_k/2 = c/4f$
	$D_x = D_0 e^{-\beta x}$ $\beta = \frac{\omega}{c} \sqrt{x^2 + (\ln N)^2}$ $N = D_0/d$	$D_0/d = N$	$\frac{c}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln N}{\pi}\right)^2}$	$\frac{l_k}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{\ln N}{\pi}\right)$

Концентратор	Закон изменения образующей	Значение $k_y$	Резонансная полуволновая длина $l_k$ , см	Координата узла смещения $x_0$ , см
	$D_x = D_0(1 - \alpha'x);$ $\alpha' = \frac{D_0 - d}{D_0 l_k}$	$\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi l_k}{\lambda}\right)^2}$ $k_y < N$	$\frac{\lambda}{2} \frac{\alpha l_k}{\lambda},$ где $\alpha l_k$ — корни уравнения $\operatorname{tg}(\alpha l_k) = \frac{\alpha l_k}{(\alpha l_k)^2 N + 1}$	$\frac{1}{\alpha} \operatorname{arctg} \left( \frac{\alpha}{\alpha'} \right)$ $\alpha = \frac{\omega}{c}$
	$D_x = d \operatorname{ch} \gamma(l_k - x);$ $\gamma = \frac{l}{l_k} \operatorname{arctg} N$	$N / \cos(k'l)$ $k_y > N$	$\frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{(k'l)^2 + (\operatorname{arctg} N)^2},$ где $k'l$ — корни уравнения $k'l + \operatorname{tg}(k'l) = \sqrt{\frac{1}{1 - N^2} \operatorname{arctg} N}$	$\frac{1}{k'} \operatorname{arctg} \left( \frac{k'}{\gamma} \operatorname{ctg} \gamma l_k \right)$ $k' = \sqrt{\alpha'^2 - \gamma^2}$

Для волноводов постоянного сечения уравнение (12) принимает вид

$$\frac{d^2 \xi}{dx^2} + k^2 \xi = 0, \quad (13)$$

а решение этого уравнения для основной моды  $n=1$  для резонансной длины стержня дает следующие соотношения:

$$l = \pi/k = c/2f = \lambda/2.$$

Ступенчатые цилиндрические концентраторы можно рассматривать как стержни, состоящие из двух цилиндрических участков площадью  $S_1$  и  $S_2$ , причем каждый из них подчиняется уравнению (13). Поскольку амплитуды смещения колеблющихся частиц и силы на конце одного участка концентратора являются начальными для второго участка, для ступенчатого цилиндрического концентратора имеем [38]:

$$\frac{S_1}{S_2} \operatorname{tg} kl_1 = \operatorname{tg} kl_2,$$

а резонансную длину стержня определяем

$$l = l_1 + l_2 = \lambda/2 = c/2f,$$

где  $c = \sqrt{E/\rho}$  — скорость ультразвука, мм/с;  $f$  — частота ультразвуковых колебаний,  $c^{-1}$ .

Резонансная полуволновая длина экспоненциального концентратора, у которого площадь поперечного сечения изменяется по закону

$$S(x) = S_0 \exp(-2\beta l),$$

где  $\beta = \frac{1}{l} \ln \frac{D_0}{d}$ , определится

$$l = \frac{c}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln N}{\pi}\right)^2},$$

здесь

$$N = \sqrt{S_0/S_1} = D_0/d.$$

Резонансную длину конического концентратора можно найти по формуле

$$l = (ml/\pi)(\lambda/2),$$

где  $ml$  — корни частотного уравнения.

Геометрические параметры наиболее распространенных концентраторов определяют по формулам табл. 9. Зависимость коэффициента усиления колебаний  $k_y = \xi_2/\xi_1$  от отношения диаметров входного и выходного торцов концентратора  $N = D_1/D_2$  для указанных выше концентраторов приведена на рис. 9, из кото-

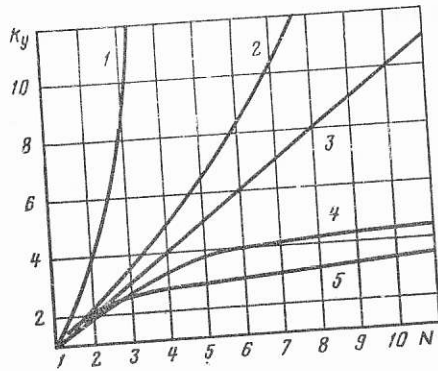


Рис. 9. Зависимость коэффициента усиления от диаметральных размеров концентраторов:

1 — ступенчатый; 2 — катеноидальный;  
3 — экспоненциальный; 4 — конический;  
5 — ампульный

предел выносливости материала, МПа [11].

Наибольшее применение получили концентраторы круглого сечения, реже используют концентраторы квадратного, прямоугольного, треугольного и других сечений.

На практике коэффициент усиления для ступенчатых концентраторов принимают  $k_y = 4 \dots 6$ , а для экспоненциальных концентраторов  $k_{y \max} = 10 \dots 15$ .

**Расчет концентратора с присоединенным инструментом.** Присоединение к концентратору резонансной длины сменного инструмента приводит к изменению акустических параметров системы преобразователь — концентратор — инструмент, к изменению собственной частоты системы и амплитуды колебаний. Насадка-инструмент вступает в непосредственное взаимодействие с объектом, ее форма и размеры определяются требуемыми условиями обработки технологического объекта.

В зависимости от степени и характера влияния присоединяемых насадок на колебательный режим системы насадки классифицируют на пассивные, нейтральные, активные.

Пассивная насадка имеет такие размеры и форму, что в ней возникают незначительные собственные колебания, которые обычно не оказывают существенного влияния на работу колебательной системы.

Чем меньше продольные и поперечные размеры насадки и чем ниже рабочая частота, тем в большей степени насадка приближается к пассивной.

Если продольные размеры насадки таковы, что в ней укладывается не более  $0,05 \lambda_n$ , где  $\lambda_n$  — длина волны в материале

рого следует, что наибольший коэффициент усиления имеет ступенчатый концентратор при одинаковых отношениях  $N$  [39]. Но в узловом сечении ступенчатого концентратора возникают усталостные повреждения, которые могут привести к разрушению концентратора.

Максимально допустимые амплитуды смещения частиц на торце концентраторов ограничиваются пределом выносливости материалов: они не должны превышать у ступенчатых концентраторов  $\xi \leq 0,8 \times 10^{-2} \sigma_{-1p}$ , у катеноидальных  $\xi \leq 1,5 \cdot 10^{-2} \sigma_{-1p}$ , у конических  $\xi \leq 1,8 \cdot 10^{-2} \sigma_{-1p}$ , где  $\xi$  — амплитуда смещения, мм;  $\sigma_{-1p}$  —

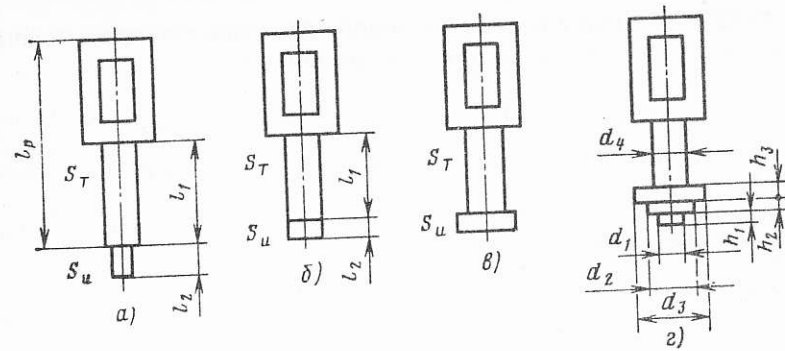


Рис. 10. К расчету концентраторов-инструментов

насадки при данной рабочей частоте, и если максимальный поперечный размер  $y_{\max} \leq (1,1 \dots 1,2) d_2$ , где  $d_2$  — диаметр рабочего торца концентратора [62], то такая насадка является пассивной.

Если масса пассивной насадки не оказывает заметного влияния на колебательный режим системы преобразователь — концентратор, то такая насадка является нейтральной. Например, плоский диск диаметром  $d_2$  и толщиной  $t < (0,1 \dots 0,05) \lambda_n$ , закрепленный на торце концентратора, является нейтральной насадкой.

Если продольные размеры насадки таковы, что она рассматривается как система с распределенными параметрами по всей длине и настроена в резонанс с рабочей частотой, то такая насадка называется активной и является дополнительным полуволновым концентратором.

При расчете концентратора-инструмента необходимо учитывать возможные ситуации:

площадь поперечного инструмента  $S_n$  значительно меньше площади нижнего торца концентратора  $S_T$  (рис. 10, а);

площадь  $S_n$  равна или незначительно отличается от площади торца концентратора  $S_T$  (рис. 10, б);

инструмент имеет поперечные размеры, превышающие размеры сечения концентратора  $S_n > S_T$  (рис. 10, в);

к концентратору присоединяется инструмент сложной формы (рис. 10, г).

Если насадка инструмента является нейтральной, то можно не учитывать массу инструмента и не корректировать расчетную длину концентратора.

При  $S_n/S_T > 0,5 \dots 0,7$  присоединенную массу инструмента учитывают, для этого необходимо расчетную длину концентратора



(см. табл. 9) уменьшить на величину  $\Delta l$ , зависящую от массы инструмента, и прибавить припуск на износ  $\delta_n$

$$l_k = l_{\text{расч}} - \Delta l + \delta_n = l_{\text{расч}} - (m/S_k \rho_k) + \delta_n,$$

где  $m$  — масса инструмента;  $\rho_k$  — плотность материала концентратора.

Например, для экспоненциального концентратора с цилиндрическим инструментом согласно табл. 9 имеем

$$l_k = \frac{c}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln M}{\pi}\right)^2} - \frac{F_n \rho_n}{F_k \rho_k} h + \delta_n,$$

где  $F_n$  и  $F_k$  — соответственно площадь поперечного сечения инструмента и торца концентратора, мм<sup>2</sup>;  $\rho_n$  и  $\rho_k$  — плотность материала инструмента и концентратора, г/см<sup>3</sup>;  $h$  — высота инструмента, мм;  $\delta_n = 5 \dots 10$  мм и более — величина припуска на износ инструмента.

Величина припуска на износ инструмента лимитируется допустимой степенью рассогласования акустической системы станка, что сопровождается определенным уменьшением амплитуды ультразвуковых колебаний инструмента (допускается уменьшение на 15 ... 20%).

Допустимые отклонения первоначальной и конечной частот от расчетной для ультразвуковых станков мощностью свыше 1,5 кВт составляют  $\pm 6\%$  и для станков меньшей мощности  $\pm 3\%$ .

Это позволяет при проектировании ультразвуковых инструментов предусматривать припуск на износ путем увеличения расчетной резонансной длины на 5 ... 10 мм. Кроме того, этот припуск может быть использован при подгонке колебательной системы в резонанс путем срезания части инструмента, если частота системы с инструментом оказалась слишком низкой.

При  $S_n = S_k$  резонансная длина концентратора-инструмента определится  $l_k + l_n = \lambda/4$ .

При  $S_n > S_k$  расчетный концентратор необходимо укоротить, срезав с него часть массы, равной массе присоединяемого инструмента, например, когда к концентратору подсоединяется групповой инструмент, размеры которого, как правило, больше диаметра выходного торца концентратора.

При проектировании концентратора с присоединяемым инструментом сложной формы (см. рис. 10, з) для более точного расчета целесообразна замена сложного по форме инструмента эквивалентным инструментом постоянного сечения, длину которого необходимо определять последовательно для каждого составляющего участка по формуле [73]

$$\operatorname{tg} 2\pi \frac{h_{i+1}}{\lambda_{i+1}} = \frac{(\rho c S)_{i+1}}{(\rho c S)_i} \operatorname{tg} 2\pi \frac{h_i}{\lambda_i},$$

## 10. Поэлементный расчет инструмента

Номер элемента	Длина элемента $h_i$	Площадь сечения	$k\Delta_i = k(h_i + h_{i-1})$	$\operatorname{tg} k\Delta_i$	$A = \frac{S_i}{S_{i+1}} \times \operatorname{tg} k\Delta_i$	$B = \operatorname{arctg} A$	$\frac{h_i^3 \operatorname{arctg} A}{k}$
1	$h_1$	$S_1$	$k\Delta_1$	$\operatorname{tg} k\Delta_1$	$A_1$	$B_1$	$h_1^3$
2	$h_2$	$S_2$	$k\Delta_2$	$\operatorname{tg} k\Delta_2$	$A_2$	$B_2$	$h_2^3$
3	$h_3$	$S_3$	$k\Delta_3$	$\operatorname{tg} k\Delta_3$	$A_3$	$B_3$	$h_3^3$
4	—	$S_4$	—	—	—	—	—

где  $\rho_i$  — плотность материала, г/см<sup>3</sup>;  $c_i$  — скорость звука, мм/с;  $h_i$  — длина  $i$ -го участка инструмента сечением  $S_i$ , мм;  $\lambda_i = c_i/f$  — длина волны, мм; (здесь  $f$  — частота ультразвуковых колебаний, с<sup>-1</sup>).

Обозначая  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число, и допуская, что элементы инструмента изготовлены из одного и того же материала, получим

$$\operatorname{tg} kh_{i+1} = \frac{S_{i+1}}{S_i} \operatorname{tg} kh_i,$$

решение которого целесообразно выполнять с помощью данных табл. 10.

Удобнее этот расчет выполнять на микрокалькуляторе БЗ-34 (см. Приложение 6).

При значительных поперечных размерах инструмента или его элементов могут возникнуть изгибные колебания.

Расчет критических размеров инструмента или его элементов, приводящих к резонансу на изгибных модах колебаний, может быть выполнен по уравнению резонанса для изгибных колебаний стержней, свободных с одного конца и зажатых с другого [39, 65]:

$$\operatorname{ch} k_4 l \cos k_4 l = -1,$$

где  $k_4$  — волновое число для изгибных колебаний, мм<sup>-1</sup>.

Для стержня круглого сечения радиусом  $r$ , мм, и моментом инерции сечения  $(\pi/4)r^4$  резонансная частота определится:

$$\omega = 2\pi f = \frac{(k_4 l)^2}{2} \frac{c_{\text{пр}} r}{l^2},$$

где  $l$  — длина стержня, мм;  $c_{\text{пр}}$  — скорость распространения продольных ультразвуковых волн, мм/с.

Радиусы сечений ступенчатых концентраторов по своим значениям не должны быть близкими к резонансным радиусам.

Аналогично можно выполнить расчет для исключения радиальных резонансных колебаний, используя условие резонанса:

$$J_0(k_3; r) = 0; \quad k_3 = \omega \sqrt{\rho/(\lambda + 2\mu)}.$$

**Конструирование концентраторов-инструментов для УЗО.**  
Инструменты для ультразвуковой размерной обработки заготовок из твердых, хрупких материалов изготавливают из ступенчатых, экспоненциальных или цилиндрических концентраторов.

Концентраторы-инструменты (КИ) для достижения высоких технологических показателей должны удовлетворять следующим требованиям:

конструкция КИ должна обеспечивать хорошую передачу ультразвуковых колебаний в зону обработки, места соединения отдельных элементов КИ должны иметь минимальные акустические сопротивления;

конструкция КИ не должна допускать образования высоких концентраций напряжений, на поверхности КИ не допускаются риски и царапины, поверхность КИ должна иметь минимальную шероховатость, особенно в местах стыков элементов колебательной системы;

соблюдать симметрию инструмента и концентратора, центр тяжести инструмента должен быть совмещен с осью колебательной системы;

высота инструмента должна быть оптимальной, чтобы обеспечить наибольшую долговечность КИ.

При определении размеров рабочей части инструмента следует учитывать максимальный размер абразивного зерна и соответственно разбивку боковых поверхностей.

При УЗО охватываемого (наружного) контура заготовки

$$d_1 = (d - \Delta) + 2\delta;$$

при УЗО отверстий

$$d_1 = (d + \Delta) - 2\delta,$$

где  $d$  — номинальный размер;  $\Delta$  — величина допуска;  $\delta$  — максимальный размер абразивных зерен.

Для повышения точности УЗО инструмент целесообразно изготавливать с обратной конусностью с буртиком (рис. 11, а) или без буртика (рис. 11, б), а также используют инструмент «грибового» профиля (рис. 11, в) [39].

**Инструмент с продольно-крутильными ультразвуковыми колебаниями.** Конструкция ЭИ для ультразвукового и электрохимико-ультразвукового шлифования выполнена в виде однополуволнового концентратора с принудительной подачей абразивной суспензии в МЭЗ через наружные каналы, образованные винтовыми канавками, позволяющими получать продольно-крутильные ультразвуковые колебания торца ЭИ, и насаженной на концентратор гильзой из звукопроводящего материала. ЭИ состоит из цилиндрического концентратора 1, на нижней ступени

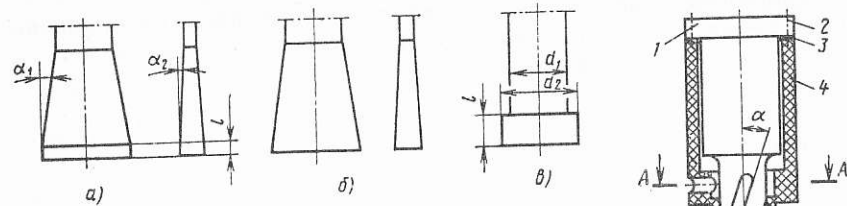


Рис. 11. Формы рабочей части концентраторов-инструментов

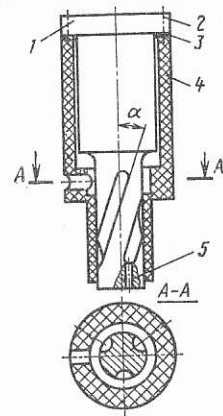


Рис. 12. Электрод-инструмент с продольно-крутильными колебаниями

которого выполнены винтовые канавки с постоянным шагом, в нижней части концентратора имеются отверстия 5 для подвода абразивной суспензии в рабочий зазор (рис. 12) [18]. На нижнюю часть концентратора насажена гильза 4 из капролона. Гильза 4 и уплотнительное кольцо 3 прикреплены к концентратору потайными винтами 2.

Верхняя ступень концентратора получает от акустической головки станка продольные ультразвуковые колебания, а нижняя ступень помимо увеличения амплитуды колебаний превращает продольные ультразвуковые колебания в продольно-крутильные. Соотношение продольных и крутильных амплитуд  $A_{пр}/A_{кр}$  определяется в основном числом винтовых канавок, их размерами и шагом.

Абразивная суспензия через отверстие нагнетается в кольцевую полость между гильзой и концентратором, затем по винтовым канавкам и отверстиям 5 в нижней части концентратора поступает в рабочий зазор.

Повышение производительности в 1,5...1,8 раза по сравнению с ультразвуковым шлифованием обеспечивается электрохимическим растворением обрабатываемого металла, созданием продольно-крутильных ультразвуковых колебаний, увеличивающих эффективность выколов частиц металла, так как удар по абразивным зернам в МЭП, в отличие от продольных ультразвуковых колебаний, торцом инструмента осуществляется под углом  $\alpha$ , т. е. более интенсивно происходит хрупкое разрушение материала заготовки.

Большое значение в повышении производительности имеет гидравлический тракт в конструкции ЭИ, обеспечивающий более интенсивную подачу абразивной суспензии в МЭП и более интенсивную эвакуацию продуктов обработки и смену абразивных зерен в МЭП.

Обработка проводилась на модернизированном ультразвуковом станке 4Д772Э плазменно-напыленных образцов с покрытиями типа ПГСП твердостью  $HRC_3 = 64 \dots 66$  и исходной шероховатостью  $Ra = 3,4 \dots 4,6$  мкм.

В качестве абразива использовался карбид бора № 12, электролит 20%-ный раствор  $NaNO_3$ , частота ультразвуковых колебаний  $f = 22$  кГц, амплитуда продольных ультразвуковых колебаний  $A_{пр} = 20 \dots 25$  мкм, крутильных  $A_{кр} = 10 \dots 12$  мкм, скорость подачи заготовки  $v_3 = 300 \dots 370$  мм/мин.

Шероховатость образцов после электрохимико-ультразвукового шлифования  $Ra = 0,85 \dots 0,55$  мкм, а производительность обработки увеличилась до 2 раз по сравнению с обычной ультразвуковой обработкой [18].

**Инструмент для ультразвукового резбонарезания.** Нарезание резьб М2; М2,5; М3; М4 и более метчиками в заготовках из коррозионно-стойких, жаропрочных, маломагнитных сталей и титановых сплавов является сложной технологической задачей, так как эти материалы отличаются высокой вязкостью и плохой обрабатываемостью резанием, когда из-за плохого стружкоудаления и налипания срезаемого материала на режущих кромках метчиков происходит заклинивание и поломка их. Поэтому нарезание резьб чаще всего производится вручную комплектом метчиков с применением в качестве СОЖ олеиновой кислоты. Трудоемкость нарезания резьбы в этом случае высокая, шероховатость резьбы не ниже  $Ra = 8$  мкм, на поверхности резьбы образуются вырывы и другие дефекты.

Введение ультразвуковых колебаний в зону резания приводит к существенному изменению физических явлений процесса резания: ультразвуковые колебания вызывают дополнительные циклические перемещения контактных поверхностей, уменьшая трение по рабочим поверхностям инструмента и существенно снижая наростообразование.

В зоне резания с ультразвуком происходит разупрочнение деформируемого металла.

Поглощенная в местах дефектов кристаллической решетки энергия ультразвуковой волны идет на снятие локальных напряжений, разблокировку дислокаций, увеличение их подвижности, что обеспечивает более интенсивный ход пластического деформирования [58].

Решающее значение при ультразвуковой интенсификации резбонарезания имеет оптимальный выбор параметров ультразвуковых колебаний: направления, величины амплитуды и частоты колебаний.

Как показали исследования для внутреннего нарезания резьб М3 ... М8 в заготовках из маломагнитной стали и титанового сплава ВТ10 амплитуда ультразвуковых колебаний в зоне резания должна составлять  $A = 5 \dots 10$  мкм.

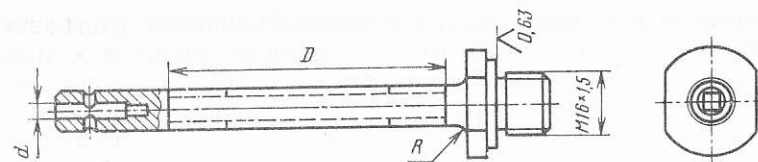


Рис. 13. Концентратор для ультразвукового резбонарезания

Для ультразвукового резбонарезания создана на базе вертикально-сверлильного станка 2Н125Л установка, работающая в полуавтоматическом режиме. Для нарезания резьб используют машинные метчики.

Конструктивными особенностями концентратора-инструмента является простота соединения метчика с концентратором-волноводом, осуществляемая по плотной посадке с фиксацией винтом и передачей крутящего момента через квадратный хвостовик метчика (рис. 13). Квадратный хвостовик метчика вставляется в квадратное отверстие концентратора, получаемое электроэрозионным способом. Такое конструктивное решение обеспечивает быструю смену метчиков при надежной работе инструмента-концентратора.

При нарезании резьб инструментом-концентратором происходит определенное разбивание профиля нарезаемой резьбы из-за продольных ультразвуковых колебаний режущих элементов метчика, хотя шероховатость обрабатываемой поверхности уменьшается примерно на  $1,5 \dots 2$  мкм. Для уменьшения искажения профиля нарезаемой резьбы были разработаны инструменты-концентраторы с продольно-крутильными ультразвуковыми колебаниями в зоне резания.

Оптимальным вариантом, по-видимому, является сообщение ультразвуковых колебаний режущим элементам метчика, направленных вдоль винтовой линии резьбы.

Продольно-крутильные колебания получаются от сложения продольных и крутильных колебаний, причем крутильные колебания возникают путем преобразования продольных, что достигается выполнением криволинейных пазов на концентраторе-волноводе в зоне  $D$ .

Криволинейные пазы могут быть выполнены электроэрозионным способом в специальном приспособлении. Для этой цели могут быть также использованы вставки, представляющие собой часть изношенного сверла (на рис. 13 изображена штриховой линией). Эта часть сверла должна надежно закрепляться своими концами в концентраторе-волноводе, чтобы обеспечить хороший акустический контакт.



Наличие винтовых пазов на концентраторе несколько снижает изгибную жесткость, что способствует меньшей вероятности поломки метчика в процессе резьбонарезания.

Особенностью ультразвукового нарезания резьб малого диаметра является то, что режущие элементы метчика колеблются с ультразвуковой частотой и в начальные моменты контакта с обрабатываемой поверхностью испытывают ударные нагрузки, в результате чего возможны поломки (сколы) режущих элементов метчика.

Эксперименты показали, что ультразвуковое резьбонарезание в этом случае необходимо производить в следующем режиме: врезание метчика на 2...3 нитки осуществлять без ультразвуковых колебаний, затем этап нарезания с введением ультразвуковых колебаний, а обратный ход метчика (вывертывание) в нарезанном отверстии производится без ультразвуковых колебаний [19].

**Инструменты-концентраторы для ультразвукового суперфиниширования.** При сообщении алмазному или абразивному бруску ультразвуковых колебаний (УЗК) происходит интенсификация процесса суперфиниширования в 2—3 раза. УЗК изменяют механизм контактного взаимодействия абразивных (алмазных) зерен с обрабатываемым материалом, облегчают процесс микрорезания-царапания абразивными зернами, предотвращает засаливание абразивных брусков.

За счет периодических нарушений контактов абразивных зерен с обрабатываемым металлом улучшается проникновение СОЖ в зону микрорезания, кавитация интенсифицирует эвакуацию шлама, поверхность брусков очищается. УЗК также способствуют интенсивному самозатачиванию абразивных зерен.

Для ультразвукового суперфиниширования амплитуда УЗК находится в пределах  $A=1 \dots 4$  мкм, давление абразивных брусков на обрабатываемую поверхность составляет 0,60...0,80 МПа. Применяют твердые мелкозернистые бруски, которые на первой фазе суперфиниширования за счет УЗК имеют хорошие режущие свойства, а на второй фазе за счет уменьшения амплитуды УЗК (или отключения их) брусок работает в режиме выглаживания.

Инструмент-концентратор для ультразвукового суперфиниширования должен иметь высокую эксплуатационную стойкость, хорошо проводить УЗК в зону резания, для этого необходимо создание надежного контакта между абразивным бруском и излучающей поверхностью преобразователя.

Закрепляется абразивный брусок к концентратору-волноводу 1 посредством закрытого клеммного зажима дюралевой оправки 2, к которой по специальной технологии приклеивается абразивный брусок 3 (рис. 14, а). Клеевое крепление бруска

передает амплитуду УЗК до 7...8 мкм и выдерживает нагрузку на сдвиг до 10 МПа [7].

Закрепление оправки с абразивным бруском осуществляется клеммным зажимом при затяжке болта 4.

Конструкция инструмента-волновода с криволинейной осью (рис. 14, б) для ультразвукового суперфиниширования с применением продольно-поперечных ультразвуковых колебаний изменяет характер взаимодействия алмазного зерна с обрабатываемой поверхностью заготовки, ускоряет процесс уменьшения исходной шероховатости поверхности.

Алмазный брусок 2 к излучающей поверхности волновода 1 присоединяется пайкой.

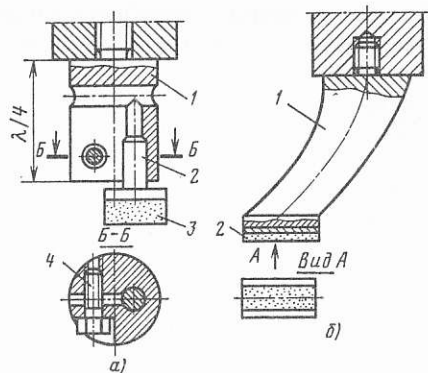


Рис. 14. Инструмент для ультразвукового суперфиниширования:  
а — концентратор; б — волновод

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ДЛЯ ЭФХМО

### ВЛИЯНИЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ЭФХМО

В технологии машиностроения процесс установки заготовки в приспособлении принято подразделять на два этапа — базирование и закрепление.

Приспособления оказывают влияние на точность ЭФХМО за счет упругого деформирования материала заготовки при приложении сил закрепления (погрешность закрепления) и неопределенности положения измерительной базы (погрешность базирования).

Поскольку установка заготовки в приспособлении обычно сопровождается приложением сил закрепления, упругое деформирование заготовки под действием этих сил происходит во всех случаях закрепления. Заготовка, обработанная в упругодеформированном состоянии, после снятия сил закрепления восстанавливает первоначальную форму, что сопровождается искажением формы или положения обработанной поверхности. Опас-

ность появления подобных погрешностей особенно велика при обработке заготовок низкой жесткости. Методика расчета возникающих погрешностей, рассмотренная в технической литературе [24, 57], в полной мере применима и для операций ЭФХМО. Рациональный выбор установочных элементов приспособления, точек приложения сил и направления их действия при закреплении, а также выбор силового привода позволяют снизить погрешности от упругих деформаций заготовки. При этом следует отметить, что поскольку ЭФХМО в общем случае не сопровождаются силовым воздействием на заготовку и требуют меньше сил для ее закрепления, указанные погрешности здесь менее вероятны, чем при механической обработке.

Существенно большее участие в балансе точности операций ЭФХМО принимает погрешность установки заготовки в приспособлении. Эта погрешность характеризует неопределенность положения измерительной базы заготовки при ее установке в приспособлении. Величина погрешности установки  $\epsilon_y$  определяется как поле рассеяния отклонений положения измерительной базы заготовки, измеренных в направлении получаемого размера. Структура и степень влияния погрешности установки на точность ЭФХМО изменяются в зависимости от условий выполнения операции.

В общем случае составляющими погрешности установки  $\epsilon_y$  являются погрешности базирования  $\epsilon_b$ , закрепления  $\epsilon_z$  и положения заготовки вследствие неточности изготовления и износа приспособления  $\epsilon_p$ .

Погрешность базирования возникает на стадии базирования при несовпадении измерительной и технологической баз заготовки. Погрешность базирования  $\epsilon_b$  определяется как поле рассеяния отклонений измерительной базы заготовки, измеренных в направлении получаемого размера до приложения сил за-крепления. В инженерных расчетах при определении погрешности базирования поле рассеяния обычно заменяют размахом варьирования, т. е. величину  $\epsilon_b$  вычисляют приблизительно как разность предельных отклонений положения измерительной базы заготовки. Значение  $\epsilon_b$  в каждом случае может быть рассчитано из геометрических построений с учетом точности заготовки и схемы ее базирования в приспособлении. При этом для упрощения расчетов пространственную схему расположения заготовки обычно заменяют плоской схемой; соответствующие зависимости для типовых случаев базирования могут быть заимствованы из литературы [29, 55].

Погрешность закрепления образуется в результате нарушения базирования заготовки при ее закреплении. Величина погрешности закрепления  $\epsilon_z$  определяется как поле рассеяния отклонений положения измерительной базы, измеренных в направлении получаемого размера, при приложении сил закреплени-

ния. Указанное рассеяние зависит от многих факторов: величины силы закрепления, точки ее приложения, направления действия и колебаний силы; вида заготовки, ее размеров, качества поверхности и точности; типа приспособления и степени его износа и др. Погрешности закрепления определяются по двум схемам закрепления заготовок: сила закрепления приложена перпендикулярно поверхности установочных элементов приспособления в направлении, близком направлению получаемого размера, и произвольное приложение сил закрепления.

При первой схеме погрешность закрепления обусловлена контактными деформациями стыка заготовка — установочный элемент приспособления. По этой схеме величину  $\epsilon_z$  рассчитывают как разность предельных значений контактной деформации стыка, вызванных колебаниями силы закрепления и нестабильностью качества поверхности технологической базы заготовки. Контактные деформации для обеих схем могут быть определены либо по эмпирической формуле

$$y = cP^n \cos \alpha,$$

где  $c$ ,  $n$  — параметры, отражающие свойства стыкуемых поверхностей;  $P$  — сила закрепления;  $\alpha$  — угол между направлениями действия силы закрепления и выдерживаемого размера [22], либо посредством использования уточненных теоретических зависимостей [57].

Приведенные методы расчета  $\epsilon_z$  ориентированы на применение металлических установочных элементов; при применении установочных элементов из диэлектриков типа капролона, органического стекла и т. п. необходимо учитывать существенное возрастание  $\epsilon_z$  за счет деформаций самих установочных элементов.

При произвольном приложении силы закрепления ( $\alpha > 60 \dots 75^\circ$ ) погрешность закрепления проявляется преимущественно в виде отрыва технологической базы заготовки от поверхности установочных элементов приспособления. Из-за сложности явления, обусловленного деформациями и поворотами элементов системы зажимной механизм — заготовка — установочные элементы — корпус приспособления, расчет погрешности закрепления в этом случае затруднен. Значения  $\epsilon_z$  определяются экспериментально как поле рассеяния отклонений положения заготовки в заданном направлении и приводятся в виде таблиц [29, 55].

Погрешность положения заготовки  $\epsilon_p$  является следствием неточности изготовления и износа установочных элементов приспособления, а также ошибок установки приспособления на станке.

Погрешность установочных элементов  $\epsilon_{yc}$  вызвана неточностью их изготовления и сборки; в зависимости от класса точно-

сти приспособления ее величина обычно не превышает 0,005 ... 0,015 мм [27, 57].

Погрешность, полученная вследствие износа установочных элементов приспособления  $\epsilon_n$ , зависит от времени работы приспособления, конструкции и размеров опор, материала и массы заготовки, условий ее установки и др. Однако применительно к приспособлениям для ЭФХМО решающее значение приобретает материал установочных элементов. Закономерности износа стальных опор изучены весьма подробно. При использовании установочных элементов из керамики и ситаллов погрешностью  $\epsilon_n$  можно пренебречь вследствие высокой износостойкости опорных поверхностей. Установочные элементы из капролона, органического стекла и других синтетических материалов обладают низкой износостойкостью. Помимо этого, необходимо учитывать возможность изменения их размеров вследствие разбухания, старения и др. В настоящее время отсутствуют систематизированные данные для определения значений  $\epsilon_n$  в указанных случаях.

Погрешность установки приспособления на станке  $\epsilon_c$  зависит от точности его изготовления, конструкции и износа баз станка и приспособления; величина  $\epsilon_c$  обычно составляет 0,010 ... 0,020 мм [28].

В наиболее общем случае и при условии использования одноместного приспособления погрешность установки заготовки на технологической операции

$$\epsilon_y = \sqrt{\epsilon_6^2 + \epsilon_3^2} + \epsilon_{yc} + \epsilon_n + \epsilon_c.$$

При этом погрешности  $\epsilon_6$  и  $\epsilon_3$  рассматриваются как поля рассеяния случайных величин, подчиняющихся закону нормального распределения,  $\epsilon_{yc}$  и  $\epsilon_c$  — как постоянные систематические погрешности и  $\epsilon_n$  — как переменная систематическая погрешность.

Проектирование приспособления для операции ЭФХМО предполагает назначение обоснованных норм точности его ответственных элементов и регламентацию их износа в процессе эксплуатации приспособления. Для решения этой задачи необходимо установить значение погрешности установки в балансе точности операции ЭФХМО и обеспечить соблюдение основного условия точности операции, которое в общем виде при автоматическом (по настройке) получении координирующего размера выражается неравенством

$$\delta \geq \sqrt{\omega^2 + \epsilon_y^2},$$

где  $\delta$  — допуск на операции;  $\omega$  — суммарное поле рассеяния размеров, обусловленное спецификой метода ЭФХМО.

Точность формы и размера поверхности, а также координирующих параметров, полученных при применении комбинированного обрабатывающего инструмента или программного управления станком непосредственно не зависит от погрешности установки заготовки. Погрешность установки не влияет на точность координирующего размера и при индивидуальной выверке взаимного положения заготовки и обрабатывающего инструмента.

Используя условие точности операции ЭФХМО, можно сформулировать основное требование, которое должно быть обеспечено приспособлением

$$\epsilon_y \leq \sqrt{\delta^2 - \omega^2}.$$

Выражение для определения погрешности установки заготовки  $\epsilon_y$  изменяется в зависимости от особенностей выполняемой операции. При использовании на операции ЭФХМО одноместного стационарного приспособления погрешности изготовления установочных элементов  $\epsilon_{yc}$  и погрешности установки приспособлений на станке  $\epsilon_c$  обычно компенсируются настройкой станка и выражение для  $\epsilon_y$  имеет вид

$$\epsilon_y = \sqrt{\epsilon_6^2 + \epsilon_3^2} + \epsilon_n.$$

При применении многоместного приспособления  $\epsilon_{yc}$  не поддается компенсации, приобретает характер случайной величины и учитывается как поле рассеяния, обычно следующего нормальному закону распределения; погрешность установки определяется как

$$\epsilon_y = \sqrt{\epsilon_6^2 + \epsilon_3^2 + \epsilon_{yc}^2} + \epsilon_n.$$

При ЭФХМО с установкой заготовки в приспособлении-спутнике (контейнере, кассете) погрешность установки приспособления-спутника на станке как поле рассеяния случайной величины входит в подкоренное выражение, т. е.

$$\epsilon_y = \sqrt{\epsilon_6^2 + \epsilon_3^2 + \epsilon_{yc}^2 + \epsilon_c^2} + \epsilon_n.$$

Во всех случаях, когда обеспечивается совпадение измерительной и технологической баз, из приведенных выше зависимостей следует исключить погрешность базирования.

#### УСТАНОВОЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Рабочие поверхности установочных элементов материально воплощают координатную систему, относительно которой определяется положение обрабатываемой заготовки при ее установке в приспособлении.



Установочные элементы приспособлений для ЭФХМО воспринимают силы закрепления заготовки при ее установке и снятии, а в условиях ЭХО и ряда комбинированных методов обработки (КМО) подвергаются действию коррозионно-активной рабочей жидкости и электрохимическому растворению в слабых электрических полях. Установочные элементы приспособлений для ЭФХМО должны удовлетворять общим для станочных приспособлений требованиям, а именно: точность определения положения технологической базы заготовки, жесткость и износостойкость. Помимо этого к приспособлениям, работающим в коррозионно-активных электролитах, предъявляют специфические требования коррозионной стойкости. В отдельных случаях установочные элементы должны обладать диэлектрической прочностью либо электропроводностью.

Ответственным этапом проектирования приспособления является определение типа и размера установочных элементов; их взаимное расположение предопределено выбором технологических баз заготовки. Конструкция установочного элемента зависит от характеристик технологической базы заготовки: вида и размеров поверхности, ее точности и качества. При этом вид поверхности заготовки, используемой в качестве технологической базы, имеет определяющее значение. При большом многообразии заготовок, подвергаемых ЭФХМО, номенклатура поверхностей, используемых в качестве технологических баз, ограничена. Это — плоская поверхность, наружная и внутренняя цилиндрическая, коническая и резьбовая поверхности, шлицевая и зубчатая поверхности. В отдельных случаях технологической базой служит сложная поверхность произвольной формы. Для базирования предпочтительнее плоская и цилиндрическая поверхности, поскольку они обеспечивают высокую точность базирования при наиболее простой конструкции установочных элементов.

Проектирование станочных приспособлений основано на широком использовании стандартных установочных элементов. В приспособлениях для ЭФХМО возможности применения стандартных конструкций более ограничены, причем специальные установочные элементы чаще всего предусматриваются в приспособлениях для ЭХО и тех методов КМО, которые сопровождаются растворением анодной поверхности. Сведения об основных установочных элементах приспособлений для ЭФХМО приведены в табл. 11.

Оценка точности базирования в табл. 11 дана без учета погрешности формы технологической базы, неизбежные для реальных поверхностей погрешности формы, снижают точность базирования [28]. Дополнительные погрешности возникают за счет износа установочных элементов, как правило, неравномерного по площади контакта. Положение заготовки на установоч-

## 11. Характеристика установочных элементов

Технологическая база	Установочные элементы	Погрешность базирования	Область применения
Плоская поверхность	Опоры (штыри) ГОСТ 13440—68, ГОСТ 13442—68 Пластины опорные ГОСТ 4743—68 Шайбы и пластины опорные ГОСТ 17776—72, ГОСТ 17778—72 Опоры специальные	$\varepsilon = 0$	Для небольших заготовок
			Для средних и крупных заготовок Совместно с установочными пальцами  Как конструктивный элемент корпуса приспособления
Наружная цилиндрическая поверхность	Втулки	$\varepsilon_r = \delta + \delta_1 + z$	Точность технологической базы в пределах 6—9-го квалитетов
	Призмы опорные ГОСТ 12195—66— ГОСТ 12197—66	$\varepsilon_r = \frac{\delta}{2 \sin \beta / 2}$	Базирование заготовок
	Полуотверстия	—	Крупные заготовки с точностью не ниже 8-го квалитета
Внутренняя цилиндрическая поверхность	Пальцы цилиндрические ГОСТ 17774—72, ГОСТ 12209—66	$\varepsilon_r = \delta + \delta_1 + z$	Для отверстий диаметром не свыше 50 мм и точностью не ниже 9-го квалитета
	Пальцы срезанные ГОСТ 17775—72, ГОСТ 12210—66		При установке на два отверстия или отверстие и параллельную оси плоскую поверхность
	Установочные элементы специальные		Для отверстий диаметром свыше 50 мм и точностью не ниже 9-го квалитета

Продолжение табл. 11

Технологическая база	Установочные элементы	Погрешность базирования	Область применения
Внутренняя цилиндрическая поверхность	Оправки цилиндрические	$\epsilon_r = \delta + \delta_1 + z$	Для отверстий точностью не ниже 9-го квалитета
	Оправки цилиндрические прессовые Оправки конические ГОСТ 16211—70	$\epsilon_r = 0$	Для коротких ( $l/d \leq 1,5$ ) отверстий точностью не ниже 8-го квалитета
Внутренняя коническая поверхность	Центры жесткие (ГОСТ 13214—79) и срезанные, пальцы конические	$\epsilon_r = \frac{\delta}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}$	Базирование заготовок
	Центры плавающие	$\epsilon_r = 0$ $\epsilon_o = 0$	При необходимости точной установки в осевом направлении
Наружная коническая поверхность	Втулки конические (центры обратные)	$\epsilon_r = 0$ $\epsilon_o = \frac{\delta}{4} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}$	
Наружная резьбовая поверхность	Втулки резьбовые	$\epsilon_r = \delta + \delta_1 + z$	Базирование заготовок
Внутренняя резьбовая поверхность	Пальцы и оправки резьбовые		
Внутренняя шлицевая поверхность	Оправки шлицевые прессовые ГОСТ 18437—73; ГОСТ 18440—73	$\epsilon_r = 0$	

Примечание.  $\epsilon$  — смещение технологической базы в направлении, перпендикулярном опорной поверхности.  $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_o$  — смещение технологической базы соответственно в радиальном и осевом направлениях;  $\delta$ ,  $\delta_1$  — допуски на диаметр соответственно технологической базы и установочного элемента;  $z$  — гарантированный зазор;  $\alpha$  — угол конуса;  $\beta$  — угол призмы.

ном элементе может быть нарушено также и вследствие смещения точки приложения силы закрепления относительно центра контактной площади [28].

При проектировании (выборе) установочных элементов приспособлений для ЭФХМО, не сопровождающихся электрохимическим растворением материала заготовки (ЭЭО, УЗО и др.), конструктор обычно руководствуется общими для станочных приспособлений положениями. Особенностью является некоторое снижение требований к жесткости и протяженности контактной поверхности установочных элементов, вызванное меньшими силами закрепления заготовки.

Установочные элементы приспособлений должны обладать еще и коррозионной стойкостью к электролиту. В практике ЭХО и КМО применяют разнообразные по составу и концентрации компонентов электролиты, обладающие повышенной коррозионной активностью. Основным способом обеспечения коррозионной стойкости установочных элементов приспособлений служит выбор материала для их изготовления. Применению коррозионно-стойких сталей типа 12Х18Н9Т препятствует их низкая износостойкость; эти стали целесообразны для приспособлений, рассчитанных на небольшой срок службы. Применение закаливаемых коррозионно-стойких сталей 30Х13, 40Х13 ограничено из-за невысокой их коррозионной стойкости. Установочные элементы приспособлений для серийного и массового производств предпочтительнее выполнять из титановых сплавов, сочетающих высокие антикоррозионные свойства с удовлетворительной износостойкостью.

Перспективным направлением является изготовление установочных элементов из неметаллических материалов. Высокой износостойкостью в сочетании с антикоррозионными и электроизоляционными свойствами обладает керамика (ЦМ332, ВОК60 и др.), однако из-за низкой ударной вязкости ее применяют ограниченно, в основном для приспособлений при обработке мелких заготовок преимущественно из легких сплавов; большего эффекта можно ожидать от использования ситаллов. За рубежом применяют установочные элементы из пластмасс на основе эпоксидных смол с наполнителем из стекловолокна или керамики. При ЭХО единичных заготовок, когда требование износостойкости не актуально, установочные элементы изготавливают из капролона, органического стекла и других синтетических материалов.

Целесообразность изготовления установочных элементов из неметаллических материалов зависит также и от местоположения токоподвода. При размещении токоподвода на поверхности заготовки корпус приспособления во избежание его растворения в слабых электрических полях изолируют от заготовки. Применение неметаллических установочных элементов в этом случае является лучшим выходом из положения. Другим возможным решением служит размещение между установочными элементами и корпусом приспособления разделительной детали из

диэлектрика (капролона и др.). Для этого варианта характерно усложнение конструкции и снижение ее жесткости.

При установке токоподвода на корпусе приспособления (стол станка) на установочные элементы возлагаются функции проводника электрического тока с требованием максимальной электропроводности. Нарушение этого условия приводит к потерям электрической мощности, создает опасность оплавления (прижогов) контактирующих поверхностей и способствует нагреву рабочей жидкости, снижая точность обработки. Во избежание этих явлений при проектировании установочных элементов необходимо:

увеличивать контактную поверхность до размеров, гарантирующих плотность тока в контакте не более  $1,5 \text{ А/мм}^2$ ;

обеспечивать шероховатость контактной поверхности не ниже  $Ra=0,63 \text{ мкм}$ ;

предусматривать возможность надежного удаления с контактной поверхности шлама, окалины и других загрязнений;

в отдельных случаях применять прокладки из электропроводных материалов (меди и др.) или специальные смазки.

#### ЗАЖИМНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Зажимной механизм обеспечивает принудительный контакт обрабатываемой заготовки с установочными элементами приспособления, предотвращая ее смещения и вибрации при обработке. Зажимной механизм должен удовлетворять комплексу требований, а именно:

не нарушать базирования заготовки при ее закреплении;

вызывать минимальные упругие деформации заготовки и не приводить к смятию или выкрашиванию ее контактных поверхностей;

создавать минимально необходимую силу для надежного закрепления заготовки и сохранять ее стабильно в процессе обработки;

обеспечивать незначительные затраты времени для закрепления заготовки и не утомлять оператора;

быть простым и компактным по конструкции, безопасным и удобным в эксплуатации, обеспечивать долговечность и ремонтопригодность;

обладать необходимой стойкостью к коррозии при работе с коррозионно-активным электролитом.

Основным фактором, определяющим тип и конструкцию зажимного механизма, является необходимая сила закрепления заготовки. Расчет силы закрепления при проектировании станочного приспособления обычно сводится к решению задачи статики на равновесие заготовки под действием сил обработки и объемных сил (тяжести, инерции, центробежных), сил закреп-

ления и реакций опор. Особенностью ЭФХМО является съем материала без силового воздействия на обрабатываемую поверхность. Это обстоятельство позволяет упростить конструкцию и уменьшить размеры зажимных механизмов. Сила закрепления заготовки в подобных случаях должна гарантировать надежный контакт с установочными элементами, противостоять случайным силовым воздействиям и принимается обычно с учетом гарантированного запаса надежности закрепления. Ее максимальная величина принимается такой, при которой можно исключить смятие (выкрашивание) контактной поверхности и вызвать упругие деформации заготовки в допустимых пределах.

Было бы, однако, ошибкой утверждать о полном отсутствии силового воздействия на заготовку во всех случаях ЭФХМО. При ЭХО заготовка подвергается действию гидростатических, гидродинамических и электромагнитных сил; обработка крупных поверхностей с подпором электролита сопровождается большими статическими нагрузками. Значительные боковые силы возникают при поперечном подводе электролита и формообразовании асимметричных поверхностей. ЭХО в импульсно-циклическом режиме характеризуется динамическим воздействием на заготовку, вызывающим ее вибрации. В определенных условиях ЭХО необходимо считаться с возможностью возникновения гидравлического удара в системе подвода электролита. При электроабразивном шлифовании давление круга на заготовку достигает  $0,20 \dots 0,25 \text{ МПа}$ , при электроалмазном шлифовании оно увеличивается до  $0,30 \dots 0,50 \text{ МПа}$ . Силы, действующие на заготовку при УЗО, обычно невелики и не превышают  $200 \dots 300 \text{ Н}$ .

При проектировании зажимных механизмов приспособлений для ряда операций ЭХО, ЭЭО и других требование надежной фиксации заготовки в процессе обработки оказывается недостаточным. При передаче технологического тока на заготовку через приспособление (стол станка) сила закрепления должна обеспечивать необходимый электрический контакт заготовки с поверхностью установочных элементов приспособления (стола станка).

В приспособлениях для ЭФХМО применяют как простые, так и комбинированные зажимные механизмы. При большом многообразии конструкций простых зажимных механизмов число их типов, отличающихся способом трансформации силы привода в силу закрепления заготовки, ограничено. Практическое применение нашли винтовые, клиновые, эксцентриковые, рычажные, шарнирно-рычажные и пружинные механизмы.

Выбор типа и конструктивных параметров зажимного механизма требует учета многих факторов. При этом во всех случаях конструктору приходится принимать в расчет основные характеристики зажимного механизма, а именно:



передаточное отношение сил

$$i = P/W,$$

где  $P$  — сила закрепления заготовки;  $W$  — исходная сила, развиваемая силовым приводом;

передаточное отношение перемещений

$$i_n = S_P/S_W,$$

где  $S_P$  — перемещение исполнительного звена;  $S_W$  — перемещение ведущего звена;

КПД механизма

$$\eta = i i_n.$$

Характеристики комбинированных зажимных механизмов определяются как произведения соответствующих характеристик входящих в них простых механизмов:

$$i_k = \prod_{g=1}^n i_g; \quad i_{n,k} = \prod_{g=1}^n i_{ng}; \quad \eta_k = \prod_{g=1}^n \eta_g,$$

где  $n$  — число простых механизмов, составляющих комбинированный зажимной механизм.

Значения основных характеристик простых зажимных механизмов при изменении их конструктивных параметров в технически обоснованных пределах приведены в табл. 12.

Основным типом зажимного механизма приспособлений на операциях ЭФХМО служит винтовой механизм, используемый либо самостоятельно, либо в сочетании с рычажным зажимом. Преобладание винтовых зажимов с ручным приводом обусловлено их преимуществами: простотой и компактностью конструкции, преобладанием стандартных деталей, самоторможением, возможностью получения больших сил при минимальном моменте на приводе, большим ходом, высокой надежностью и ремонтпригодностью. При этом свойственные винтовым зажимам недостатки (увеличенное вспомогательное время и непостоянство силы закрепления) для большинства операций ЭФХМО не имеют существенного значения. Винтовые зажимы наиболее эффективны и при закреплении заготовок в приспособлениях-спутниках (кассетах, контейнерах), широко применяемых на операциях ЭФХМО.

12. Значения основных характеристик зажимных механизмов

Механизм	$i$	$i_n$	$\eta$
Винтовой	177...83	0,0017...0,0020	0,14...0,33
Клиновой	11,80...2,19	0,035...0,268	0,15...0,83
Рычажный	2,94...0,48	0,33...2,00	0,95...0,98
Шарнирно-рычажный	9,26...0,24	—	0,54...0,92

13. Центрирующие патроны и оправки

Центрирующее устройство	Погрешность центрирования, мм	Точность технологической базы
Спирально-реечные, ГОСТ 2675—71	0,020...0,800	Широкий диапазон точности
Клино-плунжерные, ГОСТ 16886—71	0,200...0,500	Низкая
Рычажные	0,100...0,300	
Цанговые	0,010...0,120	Не ниже 9-го качества
С тарельчатыми пружинами	0,010...0,020	Не ниже 11-го качества
С гидропластмассой	0,005...0,020	Не ниже 9-го качества
Мембранные, ГОСТ 16157—70, ГОСТ 21277—75, ГОСТ 21279—75	0,003...0,030	Не ниже 9...11-го качества

При обработке поверхностей вращения, осуществляемой преимущественно методами ЭХО и КМО, когда кинематика формообразования предусматривает вращение заготовки, важное значение приобретает точность центрирования заготовки. Последняя характеризуется величиной смещения оси технологической базы заготовки относительно оси вращения шпинделя станка. Установка заготовки в этом случае производится обычно с помощью центрирующих устройств (установочно-зажимных механизмов), сочетающих в себе функции базирования и закрепления (табл. 13). Установочно-зажимные механизмы обеспечивают необходимую точность центрирования заготовки, упрощают приспособление и сокращают вспомогательное время на операцию. Точность центрирования зависит от состояния технологической базы заготовки и величины зазоров в подвижных соединениях, обусловленных точностью изготовления и износом приспособления. Поскольку обработка с применением центрирующих механизмов производится преимущественно в коррозионно-активных электролитах, особое значение приобретает коррозионная стойкость приспособления. Поэтому в практике ЭФХМО наиболее распространены цанговые патроны и оправки,

как наиболее простые по конструкции центрирующие устройства.

Коррозионная стойкость приспособления обычно обеспечивается выбором материала деталей, причем наиболее важным моментом является определение материала цанги. Их изготавливают либо из термообрабатываемых коррозионно-стойких сталей, либо из бронзы, применяют цанги из неметаллических материалов (капролона и др.) при обеспечении электроизоляции станка от обрабатываемой заготовки.

#### ПРИВОДЫ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Для приведения в действие зажимных и установочно-зажимных механизмов приспособлений для ЭФХМО применяют как ручные, так и механизированные приводы.

Преимуществами ручных зажимов являются простота конструкции и минимальные размеры приспособления, отсутствие ограничений по пространственному размещению зажимов, возможность выполнения вспомогательных действий в процессе закрепления (например, выверка заготовки и др.). Недостатки ручного привода — увеличение затрат вспомогательного времени и утомление оператора, поскольку прилагаемая к рукоятке сила может достигать 150 Н; ручные зажимы требуют предварительной затяжки, что приводит к увеличению силы закрепления в 1,5... 1,8 раза; для них характерны значительные колебания силы закрепления, приводящие к увеличению погрешности закрепления заготовки. Широкое распространение ручного привода на операциях ЭФХМО объясняется прежде всего тем, что область применения данных методов распространяется в значительной степени на единичное и мелкосерийное производства. Определенное значение имеет также специфика операций ЭФХМО, в частности, погружение приспособления в рабочую жидкость при ЭЗО, использование коррозионно-активных электролитов при ЭХО, ограниченные объемы вакуумных камер при электронно-лучевой обработке (ЭЛО) и др., что затрудняет оснащение приспособления механизированным приводом.

Механизированный привод исключает использование мускульной силы оператора для закрепления заготовки за счет устройства, преобразующего определенный вид энергии в работу зажимного механизма. В современных станочных приспособлениях применяют различные по виду преобразуемой энергии механизированные приводы: пневмопривод, гидропривод, магнитный, вакуумный, электромеханический и центробежно-инерционный, а также приводы от сил обработки и рабочих перемещений механизмов станка. Механизированный привод позволяет сократить вспомогательное время операции, облегчить труд оператора, снизить и стабилизировать величину силы закрепления,

создает предпосылки для автоматизации цикла работы станка; вместе с этим его применение удорожает конструкцию, повышает эксплуатационные расходы и приводит в большинстве случаев к увеличению массы и размеров приспособления.

Механизированный привод в приспособлениях целесообразно применять при ЭФХМО в условиях массового и серийного производств. Основные данные некоторых видов механизированного привода приведены в табл. 14.

Наиболее полное использование возможностей механизированного привода достигается при автоматизации работы станка. В этом случае на приспособление устанавливают бункер или магазин загрузки (например, на автомате ЭЗ-93 для электрохимического удаления заусенцев на зубчатых колесах, автоматах МЭ311 и МЭ301 для маркирования подшипников и др.).

Основной областью применения гидропривода в приспособлениях для ЭФХМО является оснащение гидрофицированных станков (мод. МЭ-77, ЭХС-10Б, ЭХО-2 и др.) для электрохимической обработки турбинных и компрессорных лопаток.

Пневмопривод широко применяют для закрепления заготовок при ЭХО, анодно-механической (АМО), электроконтактной обработке (ЭКО) и для электрохимического маркирования. При ЭХО отверстий пневмопривод для осевого закрепления заготовки с герметизацией гидравлического тракта электролита применяют в сочетании с самотормозящей парой между пневмоцилиндром и исполнительным звеном, что исключает разгерметизацию тракта в момент пуска электролита, когда возникает гидравлический удар.

Магнитный привод применяют для закрепления заготовок на операциях ЭФХМО с минимальными силовыми воздействиями. Магнитная плита обычно включается в комплект технологической оснастки электроэрозионных копировально-прошивочных станков. Электроалмазное и электроабразивное плоское и фасонное шлифование стальных заготовок производится, как правило, на электромагнитных и магнитных плитах. При электрошлифовании твердосплавных пластин применяют стальные кассеты, закрепляемые на столе станка посредством магнитной плиты. Аналогичный способ используют и при электрохимическом маркировании заготовок небольших размеров. Мелкие заготовки из немагнитных материалов (стекла, керамики и др.) при УЗО наклеивают шеллачным лаком на стальную подкладку, которая фиксируется на станке с помощью электромагнитной плиты.

Вакуумный зажим применяют в основном при светолучевой обработке заготовок плоской формы. Для повышения долговечности вакуумного приспособления базовую пластину целесообразно изготавливать из пористого прозрачного стекла (для лазерного излучения). Возможность использования центробежно-

14. Механизированные приводы приспособлений

Привод	Преобразователи энергии	Параметры	Сила зажима	Область применения
Пневматический	Пневмоцилиндры, ГОСТ 15608—81, ГОСТ 16683—71 Специальные пневмоцилиндры	Давление воздуха $p=0,3 \dots 0,6$ МПа	$W = \frac{\pi D^2}{4} p \eta - P_1$ , $D$ — диаметр цилиндра, мм; $P_1$ — сила сопротивления пружины, Н; $\eta = 0,90 \dots 0,98$ КПД цилиндра	Большое многообразие приспособлений для закрепления мелких и средних заготовок
	Пневмокамеры		$W = \frac{\pi}{12} (D^2 + D^2_1 + DD_1) p k - P_1$ , $D$ — диаметр шайбы, мм; $k = 0,80 \dots 0,95$ — коэффициент, учитывающий сопротивление диафрагмы	
Гидравлический	Гидроцилиндры, ГОСТ 19897—74 — ГОСТ 19900—74 Специальные гидроцилиндры	Давление масла $p=5 \dots 15$ МПа	$W = \frac{\pi D^2}{4} p \eta - P_1$ , $\eta \leq 0,93$ — КПД цилиндра	Преимущественно для приспособлений на гидрофицированных станках и при больших силах закрепления
Магнитный	Электромагнитные плиты и патроны, ГОСТ 17519—81, ГОСТ 16934—71 Магнитные плиты, ГОСТ 16528—70	Постоянный ток напряжением 24 ... 220 В и мощностью 50 ... 2800 Вт	$P = 39,8 \cdot 10^4 B^2 F$ , $B$ — магнитная индукция, Тл; $F$ — площадь контакта полюсов приспособления с заготовкой, м <sup>2</sup>	Закрепление заготовок из ферромагнитных материалов при небольших силах закрепления

Продолжение табл. 14

Привод	Преобразователи энергии	Параметры	Сила зажима	Область применения
Вакуумный	Вакуумные камеры	Вакуум $p = 0,010 \dots 0,030$ МПа	$P = Fk(0,1033 - p) 10^{-4}$ , $F$ — активная площадь заготовки, мм <sup>2</sup> ; $k = 0,80 \dots 0,85$ — коэффициент герметичности	Закрепление тонкостенных заготовок плоской и криволинейной формы из любых материалов при небольших силах закрепления
Центробежно-инерционный	Свободно подвешенные грузы	Энергия электродвигателя станка	$W = \left( \frac{GR\omega^2}{g} - P_1 \right) i \eta n$ , $G$ — сила тяжести груза, Н; $R$ — расстояние от оси вращения до центра тяжести груза, м; $\omega$ — угловая скорость заготовки, с <sup>-1</sup> ; $P_1$ — сила возвратной пружины, Н; $i$ — передаточное отношение рычажной системы; $\eta = 0,95 \dots 0,98$ КПД механизма; $n$ — число грузов	Закрепление быстровращающихся заготовок
От рабочих перемещений механизмов станка	Передача энергии посредством клинорычажных механизмов с пружинным аккумулятором		$P = l j \eta$ , $l$ — сжатие пружины, мм; $j$ — жесткость пружины, Н/мм; $i$ — передаточное отношение рычажной системы; $\eta = 0,90 \dots 0,95$ — КПД механизма	В приспособлениях с минимальным числом зажимов при ограниченной силе закрепления



инерционного привода ограничена случаями ЭФХМО осесимметричных поверхностей при быстром вращении заготовки. Закрепление заготовок от рабочих перемещений механизмов станка применяют при прошивке методом ЭХО листового материала. В качестве упругого элемента при малой глубине прошивки обычно используют установленные на ползуне станка резиновые прижимы; при увеличении длины рабочего хода катода необходимо заменять резиновые прижимы пружинными.

## КОРПУСЫ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Корпус приспособлений представляет собой элемент, объединяющий отдельные части в единую конструкцию и обеспечивающий установку приспособления на станке. Корпусы приспособлений должны удовлетворять требованиям эксплуатационного и технологического характера.

Важнейшими эксплуатационными требованиями являются: прочность, жесткость и виброустойчивость конструкции; способность длительное время сохранять первоначальную точность взаимного расположения конструкторских баз корпуса;

коррозионная стойкость при работе в агрессивных средах; установка на станке без выверки или с минимальной выверкой при максимальной устойчивости положения корпуса; самопроизвольное или принудительное удаление отходов (шлама);

безопасность и удобство в работе; быстрая смена компоновок в перенастраиваемых приспособлениях.

Требования технологичности предполагают минимальную трудоемкость корпуса; сжатые сроки изготовления; использование недефицитных материалов с высокими показателями обрабатываемости; возможность шлифования рабочих поверхностей установочных элементов в сборе с корпусом.

Корпус, как правило, является наиболее трудоемкой деталью приспособления. Конфигурация корпуса определяется формой устанавливаемой в приспособлении заготовки, видом присоединительных поверхностей станка, а также номенклатурой, конструкцией и расположением функциональных элементов приспособления. Первые два фактора имеют большое значение, поскольку при конструировании приспособления положением большинства его функциональных элементов можно варьировать в широких пределах. Большое многообразие конструкций корпусов затрудняет их стандартизацию, в силу чего корпус обычно является специальным конструктивным элементом приспособления.

Практика проектирования и эксплуатации приспособлений для ЭФХМО выработала ряд рекомендаций по конструированию корпусов с учетом приведенных выше эксплуатационных требований.

Для получения минимальной массы корпуса необходимые показатели его жесткости и виброустойчивости достигаются не за счет увеличения толщины стенок, а посредством выбора оптимальной формы конструкции и размещения ребер жесткости.

Необходимым условием сохранения в процессе эксплуатации первоначальной точности взаимного положения ответственных поверхностей корпуса служит возможно более полное устранение остаточных напряжений, полученных в процессе его изготовления. Поэтому литые чугунные корпуса подвергают старению после предварительной механической обработки, а сварные конструкции отжигают (нормализуют) либо проковывают по сварным швам.

Требование коррозионной стойкости корпуса особо актуально для приспособлений, работающих в коррозионно-активных электролитах (ЭХО, ЭЭО и др.), оно обеспечивается главным образом за счет выбора оптимального материала корпуса. Основным материалом корпусов подобных приспособлений служат коррозионно-стойкие стали 12Х18Н10Т, 40Х13 и титановые сплавы ВТЗ-1, ВТ5 и др. В наиболее агрессивных средах стойкость корпуса из коррозионно-стойкой стали может быть повышена облицовкой его поверхностей защитным пластиком (винипластом и др.) либо нанесением коррозионно-стойких покрытий. При ограниченном сроке службы приспособления в качестве материала корпуса используется бронза. Перспективным решением является использование неметаллических корпусов, в частности корпусов из эпоксидного компаунда [28]. При установке токоподвода на заготовке особое внимание должно быть обращено на изоляцию корпуса от положительного полюса, что достигается размещением между металлическими установочными элементами и корпусом надежного диэлектрика. В отдельных случаях предусматривается катодная защита корпуса. При закреплении токоподвода на приспособлении между его корпусом и столом станка предусматривается диэлектрическая подкладка, выполняемая обычно из капролона или эпоксидного компаунда, реze из винипласта или текстолита.

Для освобождения корпуса от скопления шлама и исключения застоя рабочей жидкости в его конструкции следует избегать глубоких карманов и труднодоступных мест. Желательно обеспечивать наклон поверхностей корпуса к горизонтали под углом не менее 30—50° и создавать окна и вырезы. Для безопасности работы с приспособлением необходимо устранять острые углы на корпусе и предусматривать просветы между его поверхностями и рукоятками во избежание защемления рук оператора.

Важнейшим условием обеспечения высокой технологичности корпуса является выбор оптимального типа корпуса и методов его изготовления. В приспособлениях для ЭФХМО получили применение два типа корпусов: цельные и сборные.

В практике изготовления станочных приспособлений в качестве исходных заготовок цельных корпусов применяют отливки, поковки и сортовой прокат. Основным способом изготовления цельных корпусов приспособлений для ЭФХМО служит механическая обработка поковок и сортового проката. Такой вариант экономически оправдан для корпусов простой формы небольшого размера. Для корпусов средних и крупных размеров повышенной сложности по технологическим соображениям предпочтительнее сборная конструкция. В сборных корпусах составные элементы соединяют в единое целое посредством сварки либо винтами с фиксацией контрольными штифтами. Применение сварки снижает трудоемкость изготовления корпуса, ее недостатком является деформирование конструкции и значительные остаточные напряжения. Материалом элементов сборных корпусов служат сталь Ст3, стали 20, 25, 30, 35, 40, 45, коррозионно-стойкие стали, титановые сплавы и неметаллические материалы. Использование сборных корпусов повышает возможности компоновки конструкции из унифицированных элементов. В частности, имеется опыт применения на операциях электрохимического маркирования универсально-сборных приспособлений, элементы которых выполнены из капролона.

При конструировании корпусов сборной конструкции в случае подвода электрического тока через корпус во избежание потерь мощности необходимо предусмотреть минимальное число контактных соединений и обеспечить надежную затяжку стыков (не менее 0,6 МПа). Для сварных корпусов приспособлений, работающих в агрессивных электролитах, для устранения коррозии швов необходима высококачественная сварка электродами из металла корпуса или из более электроположительного металла с последующей зачеканкой шва.

## ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

### ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

В основе физического механизма размерной ЭЭО лежит явление электрической эрозии по заданной схеме формообразования поверхности обработки. Обрабатываемая система ЭЭО

должна быть спроектирована таким образом, чтобы процесс разрушения материала заготовки происходил с наименьшими технологическими и экономическими затратами и обеспечил наиболее рациональные условия массопереноса определенного слоя материала при выполнении заданных характеристик образующегося при этом процессе поверхностного слоя, точности размеров, формы, положения и шероховатости поверхности. Формообразование в токопроводящем материале обеспечивается введением и реализацией дополнительной энергии в ограниченном локальном пространстве между инструментом и заготовкой.

В зависимости от величины энергии и скорости ее введения процесс разрушения при ЭЭО может происходить по трем механизмам или их комбинациям, которые характеризуются возрастанием потребляемой удельной энергии.

1. Блочное разрушение твердой фазы вследствие нарушения сил связи обрабатываемого материала только между относительно небольшой частью молекул и атомов материала в результате действия температурных деформаций. Энергоемкость процесса формообразования минимальна.

При обработке сталей необходимая энергия процесса по этому механизму, как и при обработке лезвийным инструментом, не превышает энергии ее плавления и составляет  $1 \cdot 10^4$  Дж/см<sup>3</sup>.

2. Блочное разрушение с образованием жидкой фазы. Величина потребляемой энергии в этом случае для стали может составить  $(1...6) 10^4$  Дж/см<sup>3</sup>.

3. Блочное разрушение с образованием жидкой и газообразной фазы. Степень разрушения (диспергирования) по этому механизму может доходить до полной потери связей между большинством атомов и молекул обрабатываемого материала. Энергоемкость процесса разрушения в этом случае наибольшая и приближается к энергоемкости ЭХО.

Доля в массопереносе каждой из трех фаз удаляемого материала меняется в зависимости от мощности импульса энергии, теплофизических свойств материала и эвакуационных способностей обрабатываемой системы. Естественно, что при ЭЭО, как и при ЭХО, отсутствует зависимость обрабатываемости от твердости материала.

Технологические показатели процесса ЭЭО. Производительность процесса ЭЭО измеряется отношением объема (массы) удаленного металла ко времени обработки. В случае обработки непрофилированным электродом производительность оценивают отношением площади боковой поверхности образующегося паза (без учета ширины реза) ко времени обработки. Площадь обработки определяется как произведение длины пути резания на толщину реза. К непрофилированным электродам-инструментам относят обработку (разрезку) проволокой, диском, лентой.

В общем случае производительность может быть определена:

$$Q = kA_n / (qt_n),$$

где  $k$  — эмпирический коэффициент, зависящий от условий обработки (состояние рабочей среды, ее прокачки, материалов и размеров электродов, характеристики импульсов и т. д.),  $\text{мм}^3/\text{Дж}$ ,  $A_n$  — энергия импульса, Дж;  $q$  — скважность (1...30);  $t_n$  — длительность импульса, с.

Установлено [70], что для повышения производительности обработки необходимо обеспечить оптимальное сочетание максимального значения электрического тока в импульсе и его длительности.

**Точность электроэрозионной обработки.** При автоматическом получении размеров на предварительно настроенном оборудовании условие выполнения точности операции записывается по формуле  $\delta \geq \sqrt{\omega^2 + \epsilon_y^2}$ .

Погрешность при ЭЭО имеет одинаковую природу с погрешностями при механической, электрохимической и другими видами обработки. Составляющей суммарной погрешности, учитывающей специфику метода ЭЭО, является  $\omega$ .

При работе на копировально-прошивочных станках погрешность обработки имеет место как для продольных, так и для поперечных размеров. Погрешность продольных размеров (вдоль направления подачи) включает в себя погрешности отсчетного устройства перемещений в станке, погрешности изготовления и установки электрода-инструмента, изменения величины межэлектродного зазора.

Суммарная погрешность поперечных размеров складывается преимущественно из тех же составляющих, что и погрешность для продольных размеров, но по величине значительно ее превышает.

В этом случае в суммарную погрешность обработки большую долю вносят: искажение формы электрода-инструмента в результате износа, изменение зазора (увеличение) по сравнению с торцовым зазором вследствие изменения диэлектрических свойств рабочей среды; погрешностей, вызванных нагревом станка и электродов.

Суммарное поле рассеяния размеров, вызванное спецификой ЭЭО, определяется

$$\omega = \sqrt{(k_c \Delta_c)^2 + (k_T \Delta_T)^2 + (k_\Phi \Delta_\Phi)^2 + (k_K \Delta_K)^2},$$

где  $k_c$ ,  $k_T$ ,  $k_\Phi$ ,  $k_K$  — коэффициенты относительного рассеяния соответственно изменения торцового зазора, нагрева, формы ЭИ

и изменения кинематики обработки;  $\Delta_c$ ,  $\Delta_T$ ,  $\Delta_\Phi$ ,  $\Delta_K$  — погрешности, вызванные соответственно изменением торцового зазора, нагревом, искажением формы ЭИ в результате его неравномерного износа, и погрешность, обусловленная кинематикой взаимного перемещения ЭИ (орбитальная осцилляция и др.).

Погрешность  $\Delta_c$  вызывается изменением межэлектродного зазора по профилю обработки по сравнению с торцовым зазором (отклонение от эквидистанты).

**Классификация приспособлений для ЭЭО.** В качестве классификационных признаков приспособлений для ЭЭО принимают: тип технологических операций, взаимодействие с электродами, число одновременно работающих электродов, технологическая гибкость. На основании этих признаков можно предложить следующую классификацию приспособлений для операций ЭЭО: прошивания отверстий, обработки наружных поверхностей, прошивания полостей, электроэрозионного шлифования, разрезания заготовок, обработки непрофилированным электродом-инструментом, электроэрозионного упрочнения.

Приспособления для ЭЭО обеспечивают установку заготовки, установку электрода-инструмента, положение электрода-инструмента относительно координатной системы станка перед началом обработки, компенсацию износа, совмещение координатных систем заготовки и электрода-инструмента.

По количеству применяемых электродов приспособления бывают многоэлектродные (одноконтурные, многоконтурные), многоступенчатые.

По технологической гибкости приспособления делят на универсальные и специальные.

**Требования, предъявляемые к приспособлениям для ЭЭО.** Приспособления для ЭЭО в зависимости от выполняемых технологических операций должны отвечать основным требованиям, предъявляемым к аналогичным приспособлениям для механической обработки, и дополнительным требованиям, учитывающим особенности электрических, теплофизических процессов электроэрозионного воздействия и кинематики формообразования.

Приспособления (оснастка) для ЭЭО должны отвечать следующим основным требованиям.

1. Обеспечивать точное первоначальное взаимное положение (направления) инструмента и заготовки и последующую повторяемость их положения (позиционирование) при обработке партии одноименных заготовок. Это достигается высокой точностью изготовления инструмента, установочных элементов приспособления, возможностью точной выверки при установке их на станке, объединением электрододержателя с приспособлением для заготовки общими направляющими, изготовлением копиров.



2. Не допускать прогрева заготовок и инструментов по всему объему, который может вызвать существенную температурную деформацию заготовки в направлении получаемого размера.

3. Обеспечивать возможность свободного температурного удлинения длинномерной заготовки, для чего базирование производят или по одному из торцов или по двум торцам с одной плавающей опорой.

4. Не допускать деформаций элементов для установки заготовок на приспособлении, электрододержателей, кондукторов вследствие их прогрева, а также набухания диэлектрических прокладок и вставок.

5. Обеспечивать высокую механическую износостойкость и возможность смены базовых элементов для установки заготовки и инструмента и элементов для его направления.

6. Обеспечивать высокое качество электроконтактных поверхностей приспособления (заготовки) для исключения их прижогов, дополнительного нагрева приспособления и заготовки, потерь электроэнергии, снижения срока службы приспособления. Поэтому электроконтактные элементы приспособления и заготовки должны быть без окалины, обеспечивать хорошее прилегание и иметь достаточную площадь контакта.

7. Обеспечивать компенсацию размерного износа инструмента для повышения точности обработки. Для этого в конструкции предусматривают периодическое или плавное введение неизношенных участков инструмента (перестановка, перемотка) или введение дополнительной кинематической составляющей во взаимодействие электродов (осцилляция).

8. Обеспечивать дополнительное движение электрододержателя для расширения технологических возможностей станка и для получения более сложной формы поверхностей. Данное требование обычно выполняется изготовлением специальных кондукторов, преобразователей осевой подачи в поперечную, сообщением дополнительного движения вокруг направления подачи (винтовое движение по копиру) и т. д.

9. Обеспечивать варьирование полярностью подключения электродов, для чего предусматривают диэлектрические проставки и втулки.

10. Обеспечивать неизменность электрических параметров, стойкость к действию продуктов эрозии и рабочей среды.

11. Не допускать наплавления (налипания) продуктов эрозии к базовым элементам приспособления, а также нарушения локальных диэлектрических свойств (перемыкание диэлектрических пластин).

12. Обеспечивать самопроизвольную или принудительную эвакуацию продуктов эрозии. Данное требование может быть выполнено в зависимости от схемы обработки за счет создания специальных каналов для свободного прохода тяжелых фрак-

ций, принудительной прокачки рабочей жидкости через соответствующие каналы в приспособлении, за счет механического выноса вращающимся электродом.

13. Обеспечивать применение автоматических (роботизированных) транспортных и загрузочных средств для смены заготовок и инструмента.

14. Иметь унифицированные поверхности (элементы) для установки на оборудовании и для захвата роботизированными механизмами.

15. Обеспечивать быструю переналадку с минимальными затратами времени на обработку различных заготовок, обладать технологической гибкостью.

**Особенности проектирования приспособлений для ЭЭО.** Проектирование приспособлений для ЭЭО имеет свои особенности, связанные со спецификой метода. В каждом конкретном случае приспособление (оснастка) должно отвечать комплексу технико-экономических требований, направленных на повышение точности, производительности обработки, качества поверхности, улучшение условий труда и т. д. Рассмотрим некоторые особенности реализации ЭЭО, учет которых позволяет улучшить основные технико-экономические показатели операции ЭЭО.

Например, для стабилизации процесса ЭЭО используют колебательные движения электрода-инструмента вдоль его движения подачи. При прошивочных работах это приводит к возникновению колебаний электрода в плоскости, перпендикулярной к направлению его движения подачи.

Соотношение амплитуд продольных и поперечных колебаний инструмента зависит от жесткости системы инструмент — шпиндель — вибратор, от мощности и конструкции вибратора, массы и конструкции применяемого инструмента.

Погрешности, вызванные колебаниями электрода-инструмента в системе со свободной подвеской шпинделя, при использовании электродов малых размеров могут достигать 0,04 ... 0,05 мм. Применение дополнительных направляющих для ЭИ и установка шпинделя на направляющих с натягом позволяют уменьшить в 2—3 раза размах поперечных колебаний ЭИ и вызванные ими погрешности. Во время ЭЭО нагреваются электрод-инструмент, заготовка, приспособление и рабочая жидкость. Колебание температуры рабочей среды определяет температурные погрешности, возникающие в связи с нагревом на финишных режимах, которые могут достигать больших значений. Температура рабочей среды зависит от загрузки станка и изменяется по мере смены заготовок. Вследствие нагрева рабочей среды при различных материалах заготовки и приспособления (корпуса) могут возникать сравнительно большие температурные деформации. При неблагоприятном сочетании эти деформации совместно с деформациями электрода-инструмента снижают точность обработки.

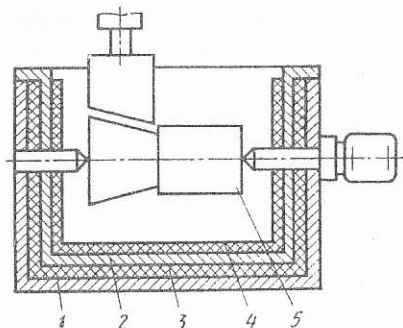


Рис. 15. Приспособление для обработки раскатного вала пластинчатым ЭИ с нагревом рабочей жидкости

пус. В приспособлении для ЭЭО раскатных валов (рис. 15) между корпусом 1 и внутренней емкостью 2 располагается теплоизоляционный слой 3 из асбеста. В емкости помещается герметически закрытый нагреватель 4, охватывающий зону, в которой размещается заготовка 5. Эксперименты показали, что производительность при обработке заготовок в нагретой жидкости выше, чем при обработке в жидкости с исходной температурой 20...40°C, а трещины в поверхностном слое отсутствуют. Для повышения производительности ЭЭО стремятся к параллельной концентрации обработки. При групповой обработке большого числа заготовок (до 20 шт.) вспомогательное время на их смену значительно. Для уменьшения вспомогательного времени необходимо применять быстросъемные кассеты, на которые устанавливаются заготовки вне станка (во время его работы).

Групповая обработка производится на двухпозиционном приспособлении. Во время ЭЭО одна позиция является рабочей и обеспечивает погружение заготовок в рабочую среду, другая позиция — загрузочная, она находится вне зоны обработки. Смена заготовок производится во время работы станка.

Для исключения непроизводительных затрат времени на подъем и опускание крупногабаритных заготовок в общую ванну эффективно применять местные быстропереставляемые ванночки или ванночки с откидными боковыми стенками. В таких ванночках предусматриваются каналы для быстрого протекания рабочей жидкости в зоне обработки. Требуемый уровень жидкости в ванночке обеспечивается регулированием ее поступления. В таком случае общая ванна используется как емкость для отстоя и забора рабочей жидкости.

Нагрев технологической оснастки и заготовки может быть связан не только с силой технологического тока, но и с необходимостью ведения процесса ЭЭО при повышенной температуре рабочей среды (до 120...150°C) для уменьшения внутренних напряжений и исключения образования трещин в поверхностном слое. Для обеспечения повышенного уровня температуры рабочей среды приспособления проектируют с нагревательным устройством [66], встроенным в корпус.

## КОНСТРУКЦИИ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

При электроэрозионной обработке применяют различные приспособления. Применение специальных приспособлений позволяет исключить погрешность базирования из общей погрешности обработки. Требуемое положение заготовки достигается без разметки и выверки, поэтому повышается производительность обработки за счет снижения времени на установку и базирование. В качестве установочных деталей (рис. 16) в приспособлениях для установки заготовок и ЭИ применяют подвижные и неподвижные, плавающие и самоустанавливающиеся опоры, призмы, пальцы, цилиндрические оправки. Плавающие опоры применяют для установки по грубообработанным поверхностям. Призмы бывают жесткими, регулируемыми и самоустанавливающимися, в большинстве случаев их применяют для базирования цилиндрических заготовок. Для базирования заготовок по отверстиям применяют пальцы. Оправки выполняют цилиндрическими, коническими, жесткими, цанговыми, разъемными, их применяют в основном при обработке заготовок-втулок в центрах.

Для обеспечения надежности базирования используют ручные, механизированные и реже автоматизированные зажимные устройства. В качестве зажимного механизма при закреплении заготовок используют универсальные станочные тиски, магнитные и электромагнитные плиты. Наиболее широко применяемые в мелкосерийном производстве конструкции зажимных элементов (рис. 17) — резьбовой зажим, прихват, эксцентриковый зажим.

Определенные трудности возникают у операторов станков при установке и выверке приспособлений для крепления ЭИ даже при одноэлектродной обработке. Необходимо стремиться наибольший объем по выверке ЭИ выполнять вне станка в специальных приспособлениях. Предварительно выверенный с повышенной точностью ЭИ устанавливается быстро без выверки на станке. Электрододержатель с базовыми поверхностями в виде «ласточкина хвоста» представлен на рис. 18. ЭИ 1 с помощью прихватов 2 крепится на электрододержателе 5, который, в свою очередь, прижимом 4 удерживается в корпусе 3.

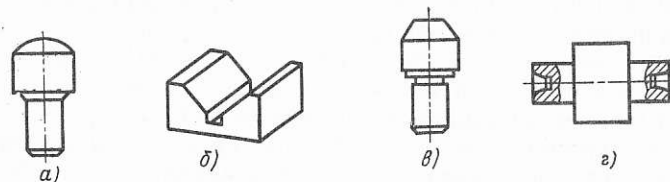


Рис. 16. Установочные детали:

а — опора; б — призма; в — палец; г — цилиндрическая оправка

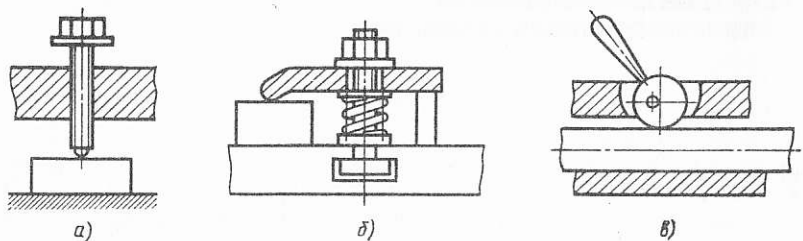


Рис. 17. Зажимные элементы:  
*а* — резьбовой зажим; *б* — прихват; *в* — эксцентриковый зажим

Время смены ЭИ и его выверку относительно станка (заготовки) можно значительно сократить, если применять электромагнитные головки, которые крепятся непосредственно к станку или к промежуточным приспособлениям. Корпус 1 электромагнитной головки (рис. 19) присоединяется к станку с помощью болта. Тороидальная катушка 3, размещенная в сердечнике 2, обеспечивает притяжение электрододержателя (якоря) 5. С помощью штифтов 10 осуществляется базирование электрододержателя, прихватом 4 происходит фиксирование его положения. Электрододержатели, присоединяемые к электромагнитной головке, могут быть специальными и универсальными.

Например, специальный электрододержатель (см. рис. 19) предназначен для фиксации цилиндрического хвостовика 8. Его осевое перемещение и поворот ограничиваются штифтом 9, упирающимся в скос на торце хвостовика. Закрепление хвостовика производится гайкой 6. К хвостовику можно присоединять различные зажимные устройства, например сверлильный патрон 7.

Электрододержатель (рис. 20, *а*) предназначен для крепления стержневых ЭИ. Электрод-инструмент 3 устанавливается в призме 4, которая зафиксирована штифтами 2 на фланце 1 и прижимается прихватом 5 с помощью винтов 6. Аналогичный электрододержатель (рис. 20, *б*) предназначен для крепления пластинчатых ЭИ. Электрод-инструмент 2 устанавливают на угольник 4 и крепят прихватом 1 с винтом 3. Угольник установлен на фланце 6 штифтами 5.

Применяя на копировально-прошивочных станках приспособления-приставки, дополняющие кинематические движения (поворот) ЭИ, можно облегчить переналадку станка при последовательной смене положения ЭИ (поворотные головки), повысить точность обработки (деления) без смены ЭИ.

Приспособление (рис. 21) для поворота ЭИ позволяет производить последовательное прорезание щелей крестообразного паза. Возможность точного поворота электрододержателя по нониусу исключает дополнительную его установку и выверку.

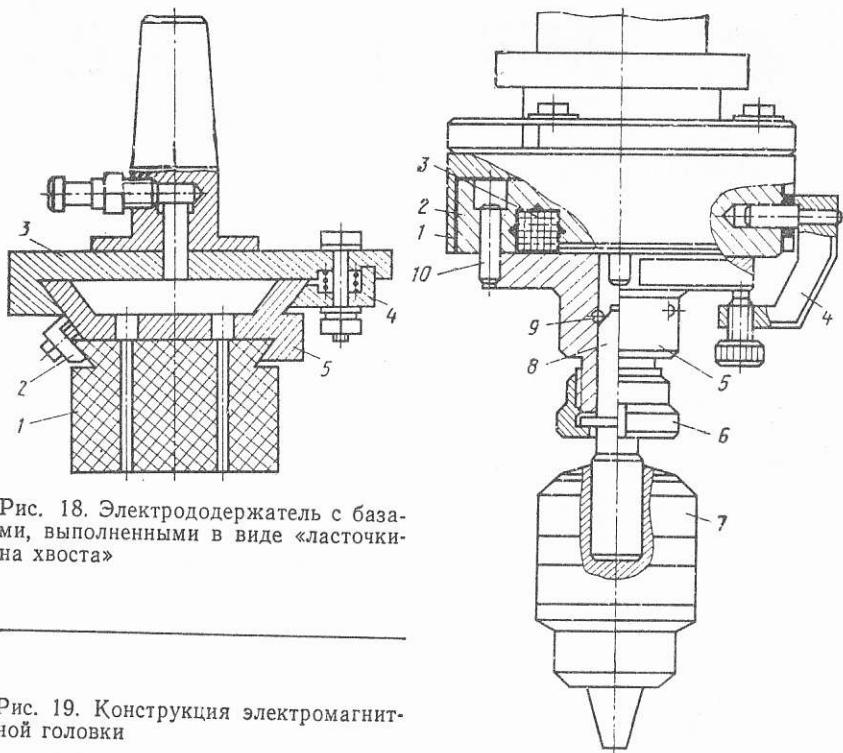


Рис. 18. Электрододержатель с базой, выполненными в виде «ласточки на хвосте»

Рис. 19. Конструкция электромагнитной головки

Точность установки угла поворота обеспечивается предварительным поворотом нижней планшайбы 4 относительно верхней планшайбы 5. Точная установка нижней планшайбы достигается винтом 9 на прихвате 3. Достигнутое положение нижней планшайбы фиксируется стопором 10. Поворот планшайб происходит по верхнему 6 и нижнему 7 направляющим конусам. Прижимное кольцо 8 обеспечивает контакт по направляющим конусам. С помощью переходника 2 к приспособлению можно крепить электрододержатель 11 с электромагнитной головкой 1. Часто между собственно ЭИ и установочными элементами для их установки на станке для различных технических целей применяют несколько промежуточных деталей или сборочных единиц. В таких случаях накапливается погрешность положения электродных поверхностей электрододержателя относительно установочных мест на станке. Эта погрешность может быть значительно снижена путем применения головок ориентации (рис. 22). С помощью головки ориентируют ЭИ относительно заготовки. Магнитная головка 1 выставляется по отношению к фланцу 2 с помощью упоров 3. Магнитная головка крепится к фланцу через подшипник 4 с шаровой поверхностью, ось 5 и гайку 6. Электро-



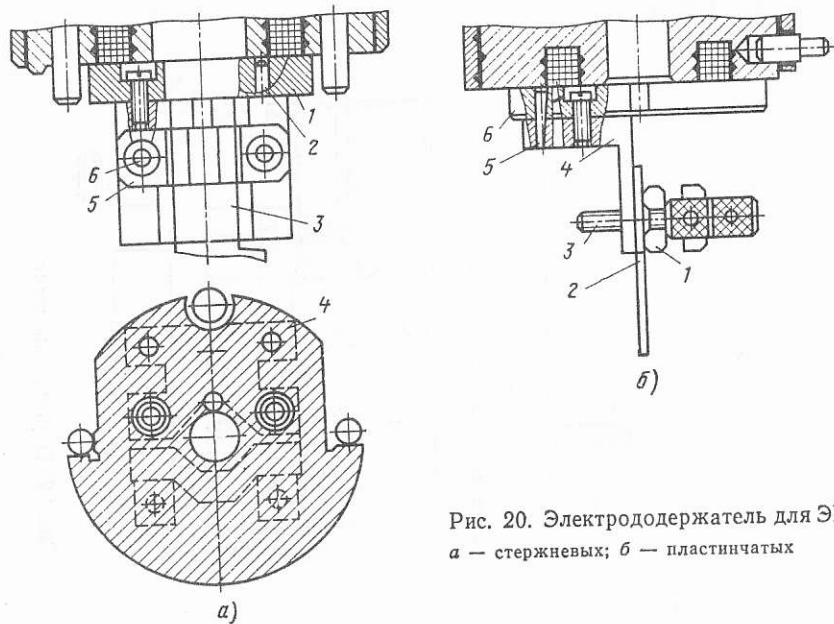


Рис. 20. Электрододержатель для ЭИ:  
а — стержневых; б — пластинчатых

додержатель 8 базируется тремя штифтами 9 и фиксируется прихватом 7.

В условиях единичного производства вместо универсальных приспособлений определенность базирования заготовки иногда обеспечивают по разметке заготовки. В таких случаях технические трудности возникают при совмещении центра заготовки с координатной осью (центром) электрододержателя. Применение центроискателя (рис. 23) значительно повышает точность и сокращает время выполнения этой операции. Центроискатель состоит из микроскопа-центроискателя 1 и хвостовика 2. Совмещение центра перекрестия микроскопа с центром заготовки по ее разметке производится наладочными и поперечными перемещениями шпиндельной головки станка или рабочего стола. В случае необходимости дополнительной разметки заготовки при установке и настройке ЭИ пользуются рискообразователем, который устанавливается на электромагнитную головку. Он состоит из центра 1, винта 2, пружины 3 и корпуса 4 (рис. 24).

Для повышения устойчивости (производительности), точности обработки и качества поверхности эффективно дополнять поступательное движение электрододержателя осциллирующим движением. Осциллирующее движение может быть вращательным вокруг оси симметрии (электродовращатели), орбитальным при плоскопараллельном перемещении без вращения вокруг своей оси симметрии (обработка прямоугольных полостей

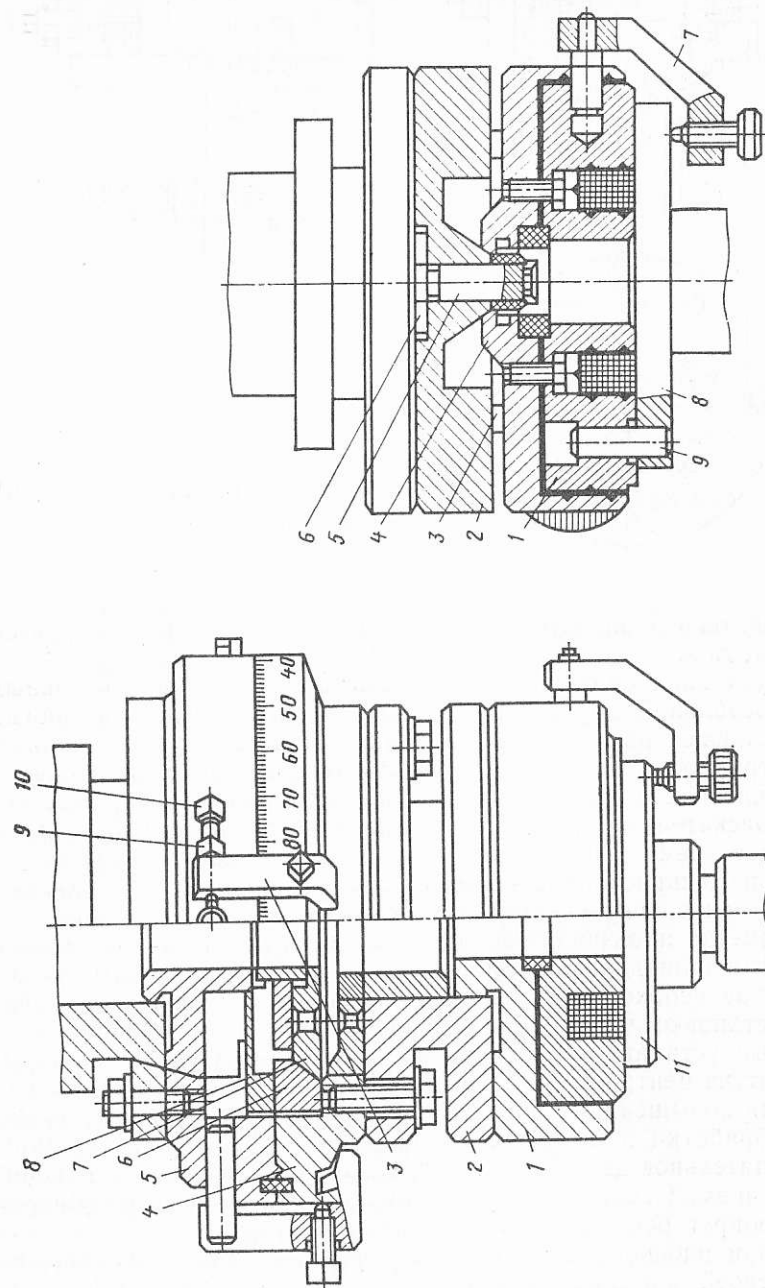


Рис. 21. Приспособление для поворота ЭИ

Рис. 22. Головка ориентации

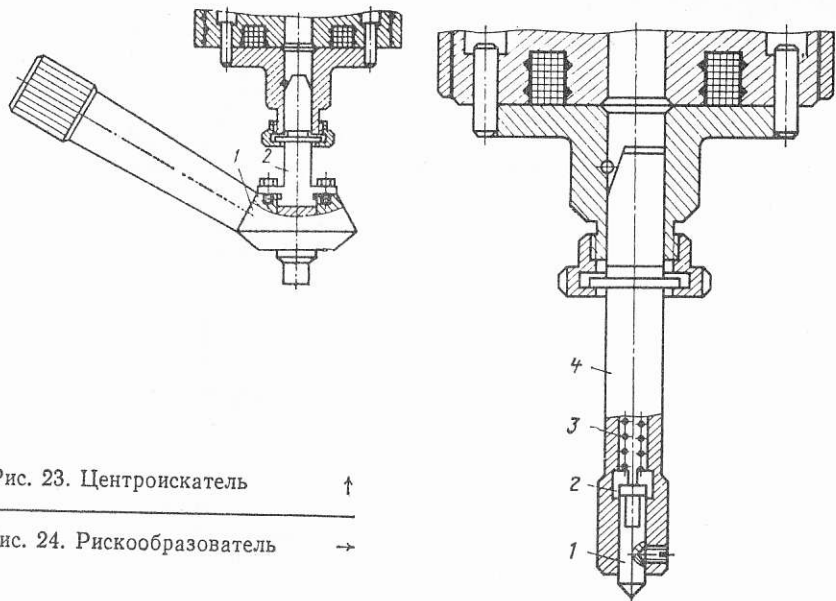


Рис. 23. Центронскатель ↑

Рис. 24. Рискообразователь →

прямоугольным стержневым ЭИ) и осевым движением с малой амплитудой [41, 66, 60, 71].

На рис. 25 представлен шпиндель с приводом вращения от шпинделя станка. ЭИ крепится цанговым зажимом 1, оканчивающимся вверху хвостовиком 3, соединяющим ЭИ со шпинделем 4 приспособления. Шпиндель 4 получает вращение от шпинделя 5 станка. Приспособление размещено в корпусе 2, который крепится на шпиндельной гильзе станка. Токпровод к шпинделю приспособления, изолированного от его корпуса, осуществляется через клемму 6, меднографитовую щетку 7 и токосъемное кольцо 8.

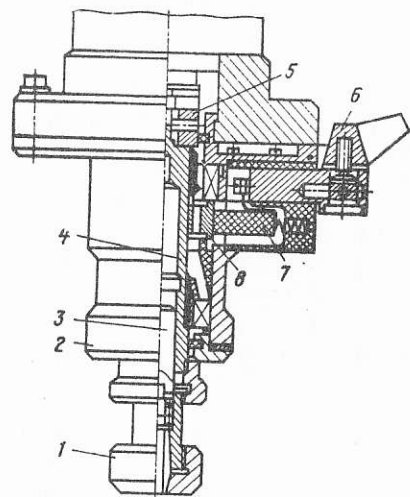


Рис. 25. Вращающийся шпиндель

Для выполнения операций по плоскому и круглому шлифованию, разрезанию на копировально-прошивочных станках широко применяются шлифовальные головки различной конструкции.

Головка (рис. 26) служит для придания ЭИ плоскопа-

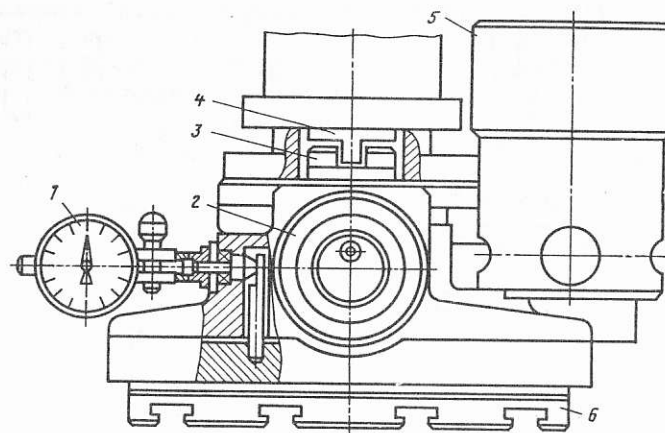


Рис. 26. Головка станка 4Д722В

раллельного кругового движения (без вращения его вокруг своей оси). Головку устанавливают на шпиндельную гильзу станка так, чтобы выступ 4 приводного вала шпинделя станка входил в пазы полумуфты 3 головки. Движение головки осуществляется от электродвигателя 5. Радиус орбитального движения устанавливается по лимбу 2. Величина образующегося эксцентриситета контролируется по индикатору 1 часового типа. Электрододержатели устанавливают в пазы плиты 6. Данная головка входит в комплект станка 4Д722В и позволяет работать в трех режимах: с постоянным (устанавливаемым) радиусом окружности и постоянной скоростью перемещения по ней; с переменной скоростью при постоянном радиусе движения; с переменным радиусом движения.

Регулирование радиуса движения производится для изменения бокового зазора между заготовкой и ЭИ, и обеспечивается маховичком лимба 2. Настройка производится при ЭЭО и включенном электродвигателе вращения шпинделя ( $6...8 \text{ мин}^{-1}$ ). Частота вращения после установки требуемого радиуса подбирается достаточной для обеспечения устойчивого процесса ЭЭО. Первый режим применяют при обработке фасонных полостей (штампы, пресс-формы). Второй и третий режимы применяют при обработке полостей с вертикальными стенками, при этом осуществляют доводку ранее прошитого отверстия (полости).

Конструкция вращающегося стола представлена на рис. 27. Стол с заготовкой 7 устанавливают на подставке 2 на рабочий стол станка 1. Заготовку устанавливают на планшайбу 9 шпинделя 10, получающего вращение от электродвигателя 4 через редуктор 3. Выверка относительного положения электродов производится с помощью регулировочного винта 11. Токоподвод

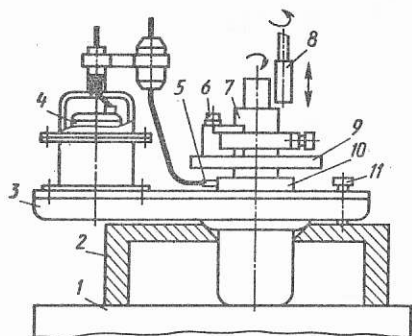


Рис. 27. Вращающийся стол

В качестве примера универсального приспособления рассмотрим одноместное приспособление (рис. 28), которое позволяет устанавливать и закреплять заготовки различного диаметра. Базирование заготовок производится на призме 1, которая лишает ее четырех степеней свободы. Призма выполнена как единое целое с основанием приспособления для установки и крепления на столе станка. Требуемое положение по вертикали достигается использованием установочной поверхности стола станка в качестве опорной базы. Приспособление на столе устанавливают так, чтобы изменение диаметра в партии одноименных заготовок не приводило к появлению погрешности базирования при автоматическом получении размеров.

Универсальность приспособления обеспечивается изменением положения гайки 4, рычага 5 и переворотом на 180° рычага 3 в вилке 2.

Электрододержатель (рис. 29) предназначен для групповой обработки заготовок. Электрододержатель крепится к станку с помощью конуса Морзе 1. Базирование ЭИ 4 происходит по пазу в корпусе 2, который лишает его пяти степеней свободы. Надежность базирования обеспечивается винтом 3. Для компенсации износа ЭИ по длине служат винты 3. При применении графитовых ЭИ для исключения повреждений его поверхности (полочки) под винт 3 ставят металлическую проставку. Данный электрододержатель обладает определенной технологической гибкостью для черновой и чистовой обработки. ЭИ для черновой и чистовой обработки располагают через один. В качестве черновых ЭИ используют использованные (отработанные) чистовые. Обрабатывают параллельно три заготовки. Переналадку осуществляют поворотом электрододержателя или многоместного приспособления с заготовками.

Приспособление для групповой обработки заготовок 3 (колец) представлено на рис. 30. Заготовки устанавливают на

к вращающемуся шпинделю осуществляется через меднографитовые щетки 5. Заготовку на планшайбе можно устанавливать с помощью призматического держателя 6. Стрелками показаны направление движения заготовки 7 и ЭИ 8.

**Приспособления для серийного и массового производства.** По мере роста объема производства от серийного к массовому применяют приспособления, универсальность которых снижается.

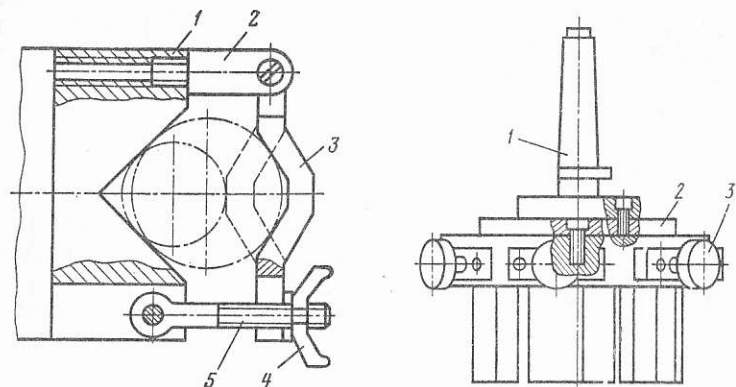


Рис. 28. Универсальное приспособление для установки заготовки переменного сечения

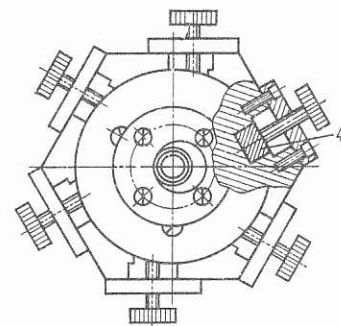


Рис. 29. Электрододержатель для групповой обработки

пальцы 5, лишаящие их двух степеней свободы (двойная опорная база), с упором в торец, который используют как установочную базу. В пальцах предусмотрена полость для работы ЭИ 1 напроход. Сами пальцы установлены на приспособлении 6, выполненном в виде сварного кронштейна. На пальцы надевают быстросъемные шайбы 4, которые поджимаются винтами 7. Наличие быстросъемной шайбы сокращает вспомогательное время на смену заготовки. ЭИ ориентируются в пазах направляющих планок 8 и лишены пяти степеней свободы. Регулирование ЭИ по высоте и закрепление их производят с помощью винтов 2. Направляющая планка через жесткую плиту соединена с конусом Морзе, обеспечивающим установку электрододержателя на станке.

При групповой многоэлектродной обработке трудоемкими операциями являются базирование и закрепление заготовок, ограничивающие производительность обработки. Для сокращения времени на смену заготовок в ряде случаев используют их конструктивные особенности.

Например, в приспособлении, представленном на рис. 31, заготовку 4 располагают горизонтально на призме 5 (двойная на-



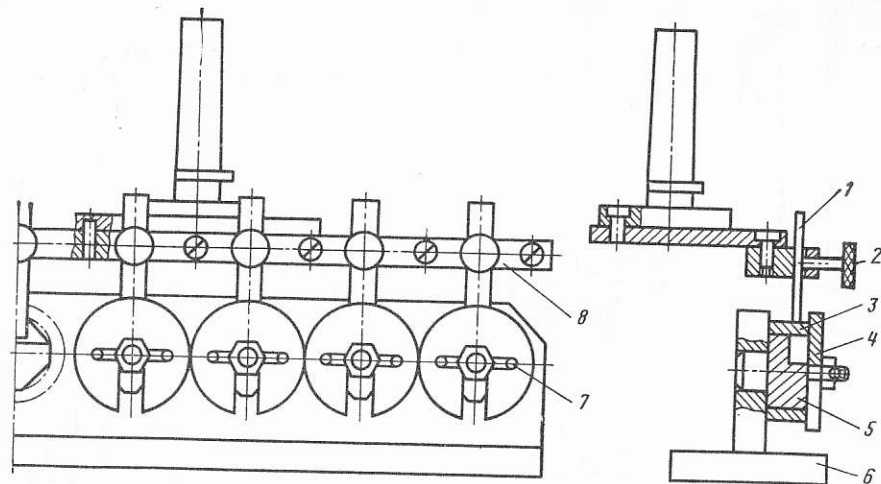


Рис. 30. Приспособление для групповой обработки колец

правляющая база) с упором левым торцом в планку 7, которая крепится к призме 5. Необходимое положение заготовки по шестому направлению (поворот вокруг своей оси) обеспечивается по лыске, имеющейся на наружной поверхности заготовки.

Вставка-клин 8 придает необходимое положение заготовке и облегчает закрепление ее в опорах. Приспособление для установ-

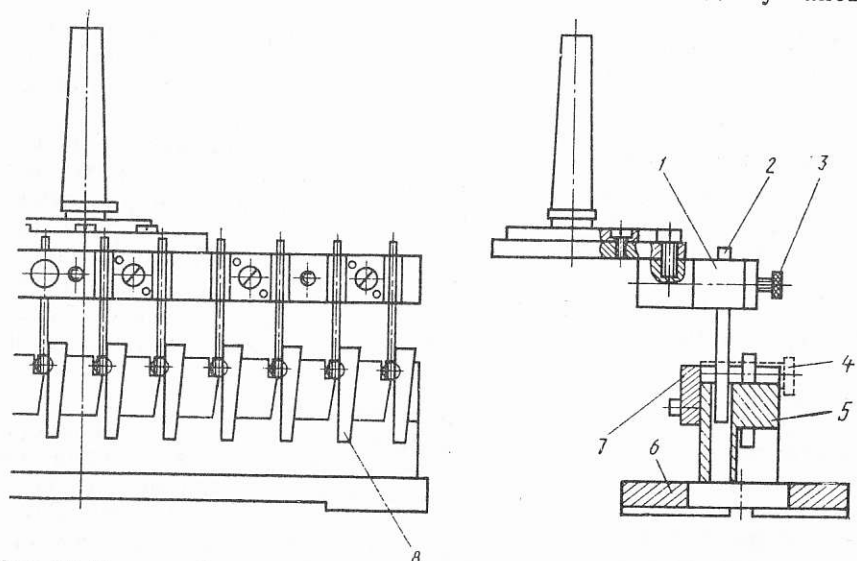


Рис. 31. Приспособление с клиновым закреплением заготовки

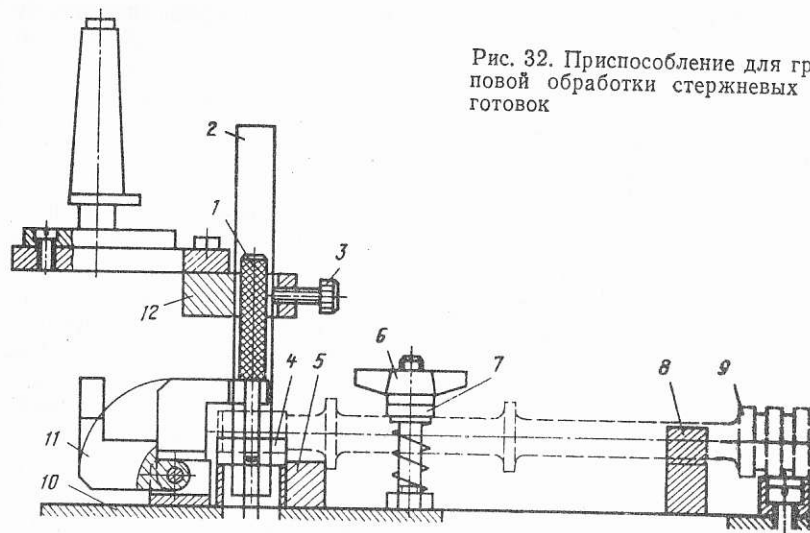


Рис. 32. Приспособление для групповой обработки стержневых заготовок

ки заготовок представляет собой сварную конструкцию из основания 6 и призмы 5. Электроды 2 устанавливают над заготовками в направляющие пазы электрододержателя 1, которые лишают их пяти степеней свободы. Настройка по высоте и закрепление ЭИ производится с помощью винтов 3.

Приспособление для групповой обработки отверстий в стержневых заготовках представлено на рис. 32. Приспособление представляет собой разборную конструкцию. Плита 10 является его основанием. ЭИ 2 установлены в направляющие пазы планки 12 и крепятся винтами 3.

В этом приспособлении заготовку 9 устанавливают на две призматические опоры 4 и 8 с упором торца выступа заготовки в планку 5. С помощью откидной направляющей 11 и фиксатора 1 обеспечивается требуемое положение заготовки. Закрепление заготовок производится с помощью планки 7 и гайки 6 винтового подпружиненного зажима. Нагревающийся в результате прошивки левый конец заготовки имеет возможность свободно удлиняться в левую сторону. Поэтому в результате нагрева не происходит нагружения базовых опор приспособления от удлинения заготовок, заготовки не деформируются.

Одной из разновидностей приспособлений, учитывающих температурные деформации (удлинение) заготовки, является приспособление, представленное на рис. 33. Базирование заготовки производится по втулке 9 с упором в правый торец. Заготовку крепят с помощью винта 8. Втулка 9 запрессована в кронштейн 6, установленный на основании 7. ЭИ 3 устанавливают

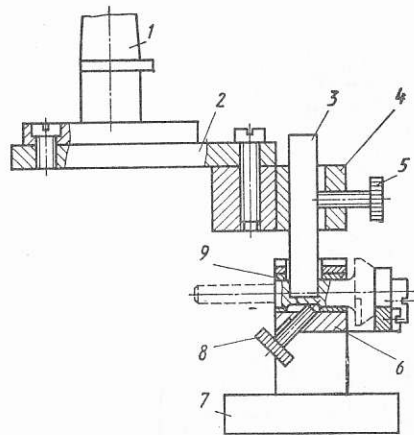


Рис. 33. Приспособление для обработки стержневых заготовок

по пазу в электрододержателе 4 и крепят винтом 5. Хвостовик 1 соединяется с электрододержателем через переходную плиту 2.

В ряде случаев при ЭО отверстий малого диаметра процесс обработки становится нестабильным. ЭИ получает значительные поперечные колебания, перекрывающие межэлектродный зазор. Это приводит к ложным срабатываниям системы управления привода рабочей подачи станка, к резкому снижению производительности и точности обработки. В таких случаях эффективно применение кондукторов, повышающих жесткость ЭИ, надежность и точность его направления.

Многоместное приспособление для обработки гаек представлено на рис. 34, в котором кондукторная плита выполнена как единое целое с приспособлением для установки заготовки. Цанговые зажимы 4 и кондукторные втулки 5 лишают ЭИ 1 четырех степеней свободы. Заготовки (гайки) 6 в приспособлении лишены всех шести степеней свободы: нижняя грань — установочная база, ребро — направляющая база и торец — опорная база. Смена заготовок производится после отвода вручную подпружиненного прижима 7. Точность положения приспособления на станке достигается за счет установочной планки 8. Элементы для установки, закрепления заготовки и крепления кондукторных втулок смонтированы на корпусе приспособления, который выполнен в виде тавра из плиты 10, стойки 9 и планки 2, кондукторные втулки крепятся гайками 3.

Технологические возможности электроэрозионных станков могут быть расширены за счет использования специальных приспособлений. Приспособление (рис. 35) обеспечивает получение винтовых канавок в отверстиях заготовки при обработке на станке, имеющем только поступательное движение подачи.

При поступательном движении ЭИ 15 электрододержатель 2, свободно вращаясь вокруг оси в верхней опоре 1, получает от винтового копирного паза 3 требуемый угол поворота. Для повышения производительности обработки ЭИ выполнен ступенчатым для черновой и чистовой обработки за один рабочий ход. ЭИ, выполненный в виде втулки, надевают на палец электрододержателя и крепят снизу через шайбу 5 гайкой 12. При установке приспособления на станке совместную выверку электро-

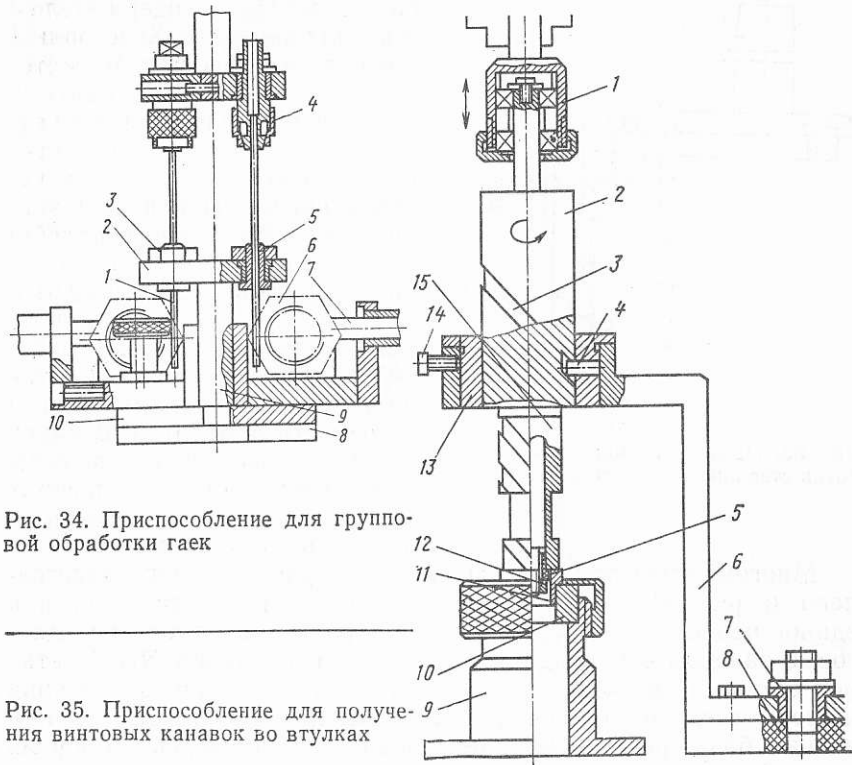


Рис. 34. Приспособление для групповой обработки гаек

Рис. 35. Приспособление для получения винтовых канавок во втулках

дов производят по эталонной детали 11, на место которой затем устанавливают обрабатываемые заготовки. Приспособление для установки заготовки состоит из корпуса 9 и базового кольца 10, закрепленного гайкой. Дополнительное движение вращения электрододержателя образуется при его поступательном движении за счет штифта 4, который закреплен во втулке 13. Втулка установлена без натяга в кронштейне 6, который с помощью диэлектрической втулки 7 и пластин 8 изолирован от рабочего стола. Поворотом втулки 13 можно изменять положение начала захода винтовой канавки на заготовке в окружном направлении. Винтом 14 обеспечивается фиксация этого положения.

При групповой ЭО суммарную погрешность обработки в ряде случаев определяет погрешность относительного положения поверхности. Уменьшить эту составляющую погрешности обработки можно за счет повышения точности совмещения координатных систем электрододержателя и приспособления для установки заготовки. В таких случаях эффективно объединять в

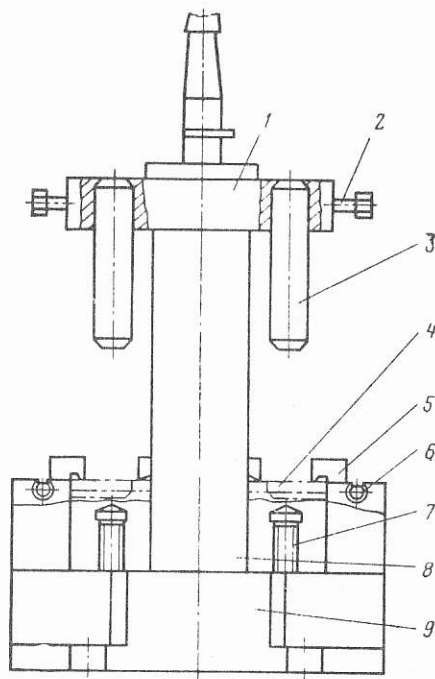
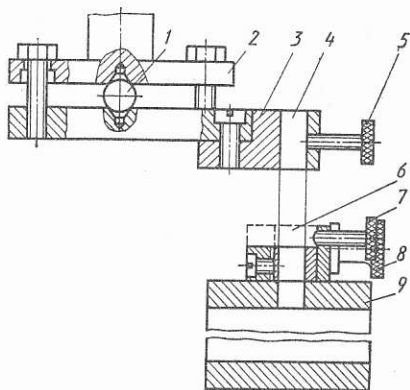


Рис. 36. Приспособление с направляющими для групповой обработки

Рис. 37. Приспособление с регулируемой шариковой опорой для электрододержателя



одну конструкцию электрододержатель и приспособление с помощью общих направляющих. Приспособление такого типа представлено на рис. 36. Электрододержатель 1 имеет четыре паза для установки ЭИ 3, которые крепятся винтами 2. Пазы выполняют роль двойной направляющей базы. Установка заготовок 4 обеспечивается с помощью съемных оправок 6, регулируемой опоры 7 и прихватов 5.

Точность направления подачи электрододержателя обеспечивается с помощью направляющих 8, закрепленных на основании 9 приспособления для установки заготовки.

В приспособлении (рис. 37) электрододержатель 3 имеет возможность устанавливаться с помощью четырех болтов и шаровой опоры 1 относительно плиты 2. ЭИ 4 базируются по пазу электрододержателя и закрепляются винтом 5. Заготовку 6 помещают на установочные элементы приспособления 9 и закрепляют винтами 7 и 8. Применение шаровой опоры в электрододержателе позволяет быстро и точно произвести выверку взаимного положения электродов.

В приспособлении (рис. 38) при изготовлении полостей штампов используют колончатые направляющие, которые позволяют достигнуть точного расположения ЭИ 6 относительно заготовки

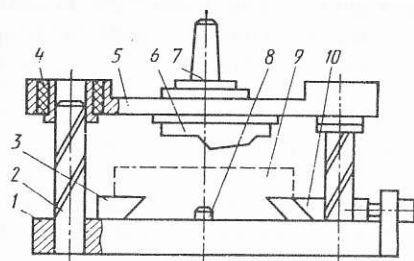
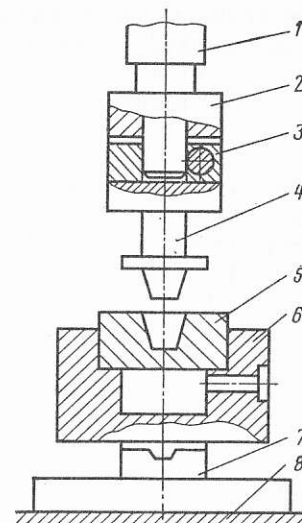


Рис. 38. Приспособление для обработки штампов

Рис. 39. Схема обработки электродом инструментом заготовки при ее базировании с помощью деталей системы ИМЕА



(штампа) 9, базирующейся упорами 8 и 3. Упор 3 входит в направляющие типа «ласточкин хвост» заготовки штампа. Закрепление заготовки производят упором 10. Заготовку и направляющие колонны 2 устанавливают на основании 1. Верхняя плита 5 обеспечивает установку ЭИ и подсоединение к электрододержателю станка с помощью конусного хвостовика 7. Изолирование между электродами обеспечивается диэлектрической втулкой 4. Для повышения точности выверки относительного положения ЭИ применяют систему ИМЕА, предложенную швейцарской фирмой [66].

Эта система (рис. 39) обеспечивает точное совмещение координатных систем электрододержателя 3 с ЭИ 4 относительно заготовки 5, закрепленной в приспособлении 6. Приспособление 6 устанавливается на верхней части призмы 7, нижняя часть которой устанавливается на столе 8 станка. Положение электрододержателя 3 относительно шпинделя 1 станка определяется переходником 2.

При поступательном перемещении шпинделя 1 вниз достигается точное относительное положение электродов.

Приспособление для групповой обработки выступов на торцах колец 11 фасонными трубчатыми ЭИ представлено на рис. 40. Электрододержатель 3 крепится к станку с помощью конического хвостовика 2. Необходимое положение ЭИ 4 обеспечивается направляющими втулками, винтом 5 в электрододержателе и планкой 10, расположенной на приспособлении 7. Заготовки базируются по торцовой установочной базе на плите 8 и по наружной двойной опорной базе двух призм 1 и 9. С по-



мощью винта 6 заготовка прижимается подвижной призмой 9 к неподвижной 1. Данная конструкция позволяет осуществлять групповую обработку с быстрой сменой заготовок.

Приспособление для многоэлектродной прошивки радиальных отверстий в заготовке представлено на рис. 41. Заготовку 3 устанавливают на рабочий стол на цилиндрическую оправку и сверху поджимают прижимом. С помощью рычагов 6 обеспечивается радиальная подача всех ЭИ 5 от единой тяги 2, присоединенной к механизму подачи станка. Рычаги 6 крепят к тяге 2 с помощью съемной шайбы 7. Для возможности поворота рычагов 6 служат крестообразные пружины 8. ЭИ перемещаются в направляющих втулках 4 из диэлектрического материала. Все устройства смонтированы на корпусе 1.

При ЭЭО нежесткими ЭИ техническими трудностями являются не только создание устройств, повышающих надежность

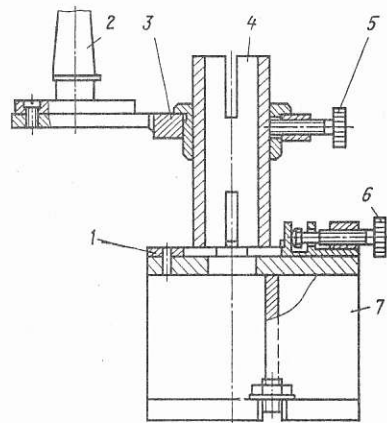


Рис. 40. Приспособление для групповой обработки торцов колец

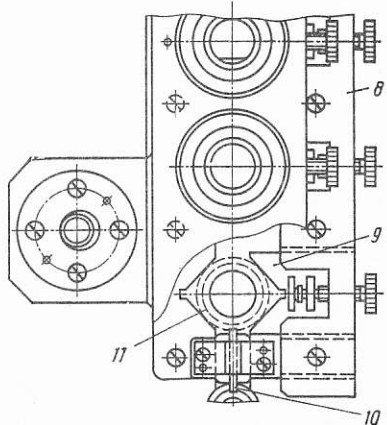
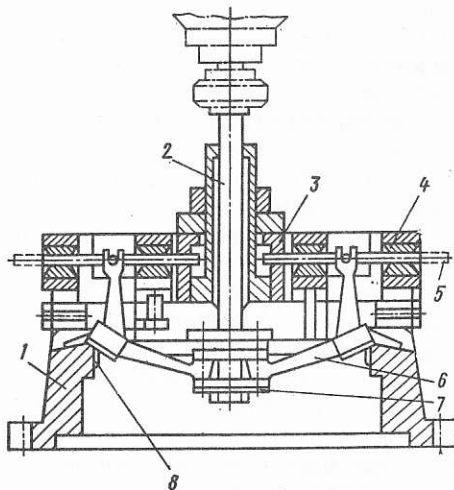


Рис. 41. Приспособление для одновременной прошивки отверстий



направления их подачи, но и возможность компенсации износа. Приспособления, автоматически поднастраивающиеся по мере износа ЭИ — проволоки 3, представлены на рис. 42 и 43. Приспособление (см. рис. 42) предназначено для изготовления отверстий в сферических ситах. Приспособление подсоединяется к станку с помощью цилиндрического хвостовика 6, соединенного с плитой 7. Как единое целое с плитой выполнен электрододержатель 1, имеющий отверстия для установки ЭИ и кольцевые проточки для установки хомутов 2. С помощью хомутов ЭИ прижимаются к электрододержателю на своем поясе. Надежность направления ЭИ обеспечивается кондуктором 15, изготовленным из диэлектрика. Кондуктор соединен через промежуточные планки 14 и 13 с ползуном 4, который сверху оканчивается рифлением. С помощью деталей 8, 10 обеспечивается настройка на перемещение ползуна в направляющих 12 и 11. Заготовка устанавливается под кондуктором 15. При прошивке отверстий по мере износа ЭИ — проволоки планка 14, ударяясь нижней поверхностью (напротив ползуна 4) об упор в приспособлении смещает ползун 4 вверх до выхода ЭИ — проволоки из кондуктора 15. Для исключения самопроизвольного падения ползуна вниз предусмотрена подпружиненная защелка 5, западающая в рифление ползуна.

Аналогичное приспособление (см. рис. 43) предназначено для прошивки охлаждающих канавок в лопатках энергетических установок. ЭИ 3 прижимаются к электрододержателю 8 с пазами через резиновую прокладку планкой 2 и гайкой 1. Роль кондуктора выполняет диэлектрическая накладка 11, прикрепленная к плите 10. Ползун 9 свободно перемещается в направляющей 7. Легкость хода ползуна обеспечивается с помощью винта 6 и поджимной планки 12. Самопроизвольное падение ползуна вниз исключается защелкой 5, которая фиксируется в рифлении на ползуне 9. Приспособление подсоединяется к станку с помощью цилиндрического хвостовика 4.

**Автоматизация приспособлений (оснастки) для ЭЭО.** Целесообразность и степень автоматизации приспособлений (оснастки) зависят от типа производства и форм его организации. Особенности процесса ЭЭО накладывают ограничения на автоматизацию приспособлений (оснастки). ЭЭО обычно организуется в отдельных специально оборудованных помещениях. Оборудование (станки) размещают по типу, оно не объединено жесткой транспортной системой в единый технологический поток.

Наибольшее распространение ЭЭО получило в условиях, когда машинное время обработки перекрывает в десятки раз вспомогательное время на смену заготовок. Поэтому операции смены заготовок в большинстве случаев выполняют с помощью механизированных и ручных приспособлений. Силовые приводы, как правило, ручные. При современных тенденциях создания

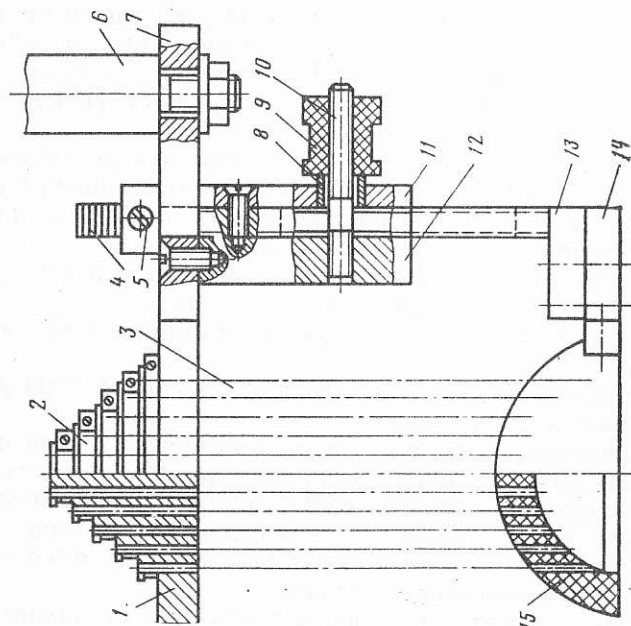
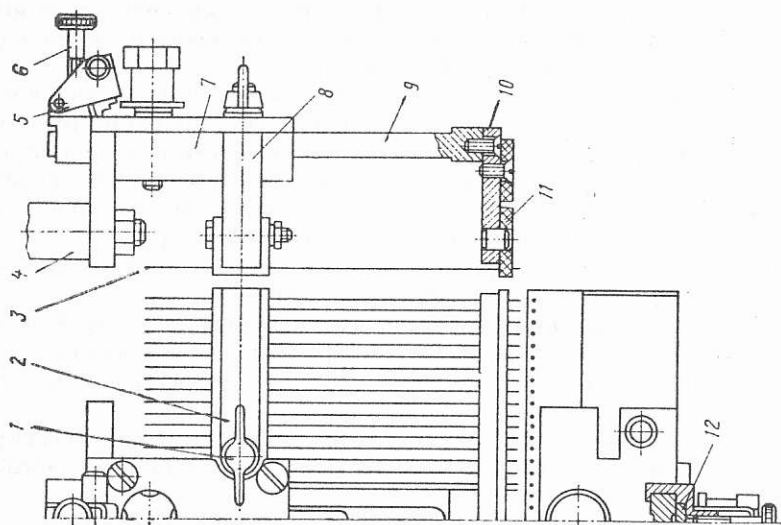


Рис. 42. Приспособление для изготовления сит с автоматической компенсацией износа проволоки

Рис. 43. Приспособление для многоэлектродной прошивки отверстий с автоматической компенсацией износа проволоки

трудосберегающей технологии, максимального высвобождения ручного труда, обеспечения многостаночного обслуживания автоматизация приспособлений (оснастки) должна решаться комплексно с учетом форм организации производства и степени роботизации технологических процессов.

При ЭО большая доля труда приходится на установку и выверку средств технологического оснащения особенно при смене ЭИ. Поэтому конструкция ЭИ должна позволять проводить настроечные работы вне зоны станка в специальных помещениях, оснащенных настроечными приспособлениями. Присоединительные элементы электрододержателей и приспособлений должны быть унифицированными и иметь однотипные поверхности. Конструкция этих элементов должна быть согласована с конструкцией захватных устройств транспортных роботов и манипуляторов, осуществляющих смену ЭИ и приспособлений. В настоящее время создают инструментальные магазины для ЭИ с автоматической их заменой на станке.

При групповой обработке заготовок необходимо стремиться к загрузке ЭИ в кассеты, с наполнением их вне зоны обработки.

#### ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ И ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

**Физические основы размерной УЗО.** Ультразвуковая размерная обработка (УЗО) деталей из твердых и хрупких материалов состоит в направленном разрушении обрабатываемого материала микродозами при ударном воздействии (микрорезании) абразивных зерен, находящихся между обрабатываемой поверхностью заготовки и рабочей поверхностью инструмента, колеблющегося с ультразвуковой частотой.

Процесс УЗО включает две фазы: ударное внедрение абразивных зерен, вызывающих выкалывание частиц обрабатываемой заготовки, и циркуляцию рабочей жидкости с абразивными зернами, обеспечивающими эвакуацию из рабочей зоны выколотых частиц заготовки, изношенных абразивных зерен и доставку новых абразивных зерен.

Производительность УЗО определяется интенсивностью этих фаз.

Различные вопросы теории и практики размерной УЗО рассмотрены в работах [6, 38, 39].

Микрорезание при УЗО заключается в основном в образовании и распространении микро- и макротрещин, которые, накладываясь друг на друга, создают механически ослабленный слой, легко разрушающийся при повторном воздействии торца колеблющегося инструмента на абразивные зерна, лежащие на поверхности обрабатываемой заготовки.

Глубина распространения трещины зависит от характера ударов по абразивным зернам, от критерия хрупкости обраба-

тываемого материала, состояния его поверхностного слоя. Зависимость удельной производительности при УЗО (съем обрабатываемого металла с единицы площади в единицу времени) оценивается следующим выражением:

$$q = k\varphi(d_a) [\xi_{\max} P_{\text{ст}}]^a f^b,$$

где  $k$  — постоянная, зависящая от свойств обрабатываемого материала и материала абразива;  $\varphi(d_a)$  — функциональный коэффициент, зависящий от среднего размера абразивных зерен и их типа;  $a$  и  $b$  — показатели степени для различных условий обработки (изменяются в пределах 0,5 ... 1);  $\xi_{\max}$  — амплитуда ультразвуковых колебаний;  $P_{\text{ст}}$  — статическое давление инструмента на деталь.

Наиболее эффективным способом повышения производительности УЗО являются:

интенсификация ударного воздействия абразивных зерен и создание оптимальной концентрации абразивных зерен под торцом инструмента;

улучшение условий циркуляции абразивной суспензии в рабочей зоне, применение отсоса абразивной суспензии или нагнетание ее под давлением;

оптимизация режимов УЗО, применение рациональных технологических схем, например, периодический отвод КИ от обрабатываемой поверхности детали, низкочастотная вибрация КИ; комбинирование процесса УЗО, т. е. наряду с механизмом ультразвукового съема использовать электрохимическое растворение, электроэрозионные процессы.

Точность УЗО определяется многочисленными факторами, которые можно разделить на две группы.

Первую группу составляют факторы, не связанные непосредственно с механизмом ультразвукового съема обрабатываемого металла: точность ультразвукового станка, приспособления, точность изготовления КИ и точность его координации относительно заготовки.

Ко второй группе факторов относятся специфические параметры, присущие процессу УЗО: размер абразивных зерен и интенсивность их смены в рабочем зазоре, стабильность рабочего зазора, износ инструмента, его геометрия и интенсивность поперечных колебаний.

**Особенности приспособлений для УЗО.** Конструкция приспособления для размерной УЗО в основном определяется технологической схемой обработки, достигаемыми технологическими показателями, конфигурацией обрабатываемых заготовок, размерами и геометрической формой обрабатываемой поверхности, программой изготовления деталей и типом применяемого оборудования.

Из анализа механизма УЗО вытекают следующие особенности приспособлений для этого способа обработки.

На обрабатываемую заготовку действует статическая сила прижима КИ к обрабатываемой поверхности заготовки, определяемая величиной давления  $p = 0,03 \dots 0,3$  МПа, условиями процесса УЗО и площадью обработки.

Колебательные системы современных ультразвуковых станков позволяют обрабатывать заготовки с площадью обрабатываемой поверхности  $F \leq 1200$  мм<sup>2</sup>, обеспечивая при этом силу прижима  $P_{\text{ст}} \leq 300$  Н.

В большинстве случаев при УЗО заготовок средних размеров величина статической силы прижима инструмента к обрабатываемой заготовке составляет  $P_{\text{ст}} = 20 \dots 80$  Н.

В интервалах между импульсами сила, действующая на обрабатываемую заготовку, равна нулю, однако мгновенное значение силы в импульсе в несколько раз превышает значение силы подачи  $P_{\text{ст}}$ .

По данным [39] установлено, что возникающая при ударе инструмента по абразивным зернам динамическая сила  $P_d$  примерно пропорциональна амплитуде колебания  $A$  торца КИ.

$$P_d \approx 4P_{\text{ст}}$$

Кроме того, на обрабатываемую заготовку помимо силы, вызванной главным рабочим движением, действуют силы, вызванные вспомогательными движениями, например сила подачи при ультразвуковом плоском или круглом шлифовании.

В процессе УЗО съем обрабатываемого металла осуществляется микродозами при постоянном прижатии КИ к обрабатываемой поверхности. В последние моменты обработки при шлифовании отверстия, разрезке, контурном вырезании остается весьма тонкий слой обрабатываемого материала, который, как правило, скалывается, порождая дефект на обрабатываемой поверхности. Для предотвращения сколов на выходе инструмента из рабочей зоны в конструкции приспособления для УЗО предусматривают определенные технические решения:

наклеивание заготовок на подкладку из хорошо обрабатываемого материала методом УЗО, для этого чаще всего применяют стеклянные пластины;

вклеивание стержней из хрупких материалов в соответствующие отверстия в заготовке;

программирование силы прижима инструмента к обрабатываемой поверхности заготовки, чтобы обеспечить минимум  $P_{\text{ст}}$  в конце обработки.

Производительность процесса УЗО в значительной мере определяется интенсивностью эвакуации из рабочей зоны выколотых частиц обрабатываемого материала и изношенных абразив-



ных зерен, а также своевременным поступлением в рабочий зазор новых абразивных зерен. В связи с этим при разработке приспособлений необходимо предусматривать ускорение этой лимитирующей стадии процесса УЗО, что достигается, например, сообщением вращения обрабатываемой заготовке;

подачей абразивной суспензии под давлением в рабочую зону или отсосом суспензии из рабочей зоны;

ведением процесса УЗО в циклическом режиме с периодическим отводом инструмента для промывки рабочего зазора.

Приспособления для УЗО должны обеспечивать надежное базирование и закрепление обрабатываемых заготовок относительно КИ; обеспечивать получение заданных технологических показателей; иметь наибольшую степень механизации и автоматизации; быть легкопереналаживаемыми, состоять из нормализованных и стандартных деталей; быть экономичными и отвечать требованиям техники безопасности.

**Проектирование приспособлений для размерной УЗО.** Конструкция приспособления для УЗО зависит от типа производства, формы и размеров обрабатываемой заготовки, типа выполняемой технологической операции, степени автоматизации и гибкости технологического процесса.

Одним из основных факторов, ускоряющих производственный процесс, является гибкость и мобильность станочных приспособлений для УЗО, организация гибкого быстропереналаживаемого производства, способного в короткие сроки с наименьшими затратами осваивать производство новых деталей, обеспечивая их высокое качество.

Конструированию комбинированных приспособлений для перемменно-поточной и групповой обработки предшествует работа по выбору схемы и общей компоновки приспособления. Эту работу выполняют после тщательного подбора обрабатываемых заготовок по общности конструктивных и технологических признаков и разработки технологических процессов обработки отобранных групп заготовок.

Конструкция приспособления для размерной УЗО определяется также формой и размером обрабатываемых заготовок, при этом для базирования заготовок используют плоские поверхности, наружные и внутренние цилиндрические поверхности, комбинированные базы.

Основу конструкции приспособления для УЗО определяет технологическая схема обработки, и в соответствии с этим приспособления классифицируют следующим образом:

для ультразвукового разрезания;

для однооперационной или многооперационной ультразвуковой обработки по наружному контуру;

для ультразвуковой обработки отверстий;

для ультразвукового плоского или круглого шлифования;

для обработки лезвийным инструментом с наложением ультразвуковых колебаний.

В соответствии с базой заготовки выбирают установочные элементы приспособления: установочные пластины, пальцы, установочные призмы, оправки, центры и др.

Специфические условия УЗО обуславливают определенные особенности установочных и зажимных элементов приспособления.

При УЗО заготовок из хрупких материалов (керамики, стекла, ферритов и т. п.) их приклеивают к технологической детали-спутнику. На детали-спутнике выполнены базы, с помощью которых устанавливаются на установочные элементы приспособления. После УЗО деталь-спутник отделяют от обработанной детали (нагревом) и используют ее при обработке следующей заготовки.

При УЗО керамических трубок для предотвращения сколов внутрь обрабатываемой трубки вставляют стеклянный стержень или трубку, которые используют так же, как установочную базу. Иногда для предотвращения сколов на выходе инструмента из зоны обработки наносят клеевой слой (шеллак) определенной толщины со стороны выхода инструмента.

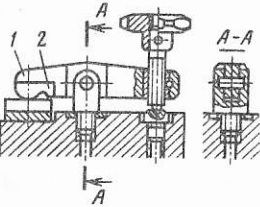
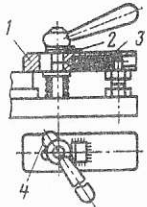
Учитывая, что вспомогательное время при УЗО намного меньше машинного и силы, действующие при обработке, невелики (примерно до 200—280 Н) при УЗО для закрепления обрабатываемых заготовок применяют в основном следующие зажимные и установочно-зажимные устройства: винтовые зажимы; эксцентриковые устройства; пружинно-рычажные зажимы; магнитные и электромагнитные зажимные устройства; установочно-зажимные (самоцентрирующие) устройства с гидропластмассой; призматические центрирующие устройства и др.

Наиболее часто применяемые в приспособлениях для УЗО зажимные устройства приведены в табл. 15.

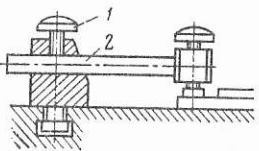
Общей особенностью приведенных зажимных устройств является наличие эластичного элемента, контактирующего с хрупкой заготовкой для предотвращения ее разрушения. При проектировании зажимных устройств следует стремиться к обеспечению наибольшей надежности закрепления заготовки, высокого быстрогодействия зажима, его более широкой переналаживаемости для закрепления заготовок различных по конфигурации.

**Приспособления для ультразвукового разрезания.** Для предотвращения сколов обрабатываемого материала в конце обработки при выходе инструмента заготовку перед обработкой приклеивают шеллаком или мастикой к стеклянной пластине-подкладке, которая имеет базы для ориентации в приспособлении. Для закрепления заготовки с пластинкой-подкладкой применяют один из зажимов с эластичными наконечниками (см. табл. 15).

15. Зажимные устройства

Эскиз зажимного устройства	Принцип действия
	<p>При смене заготовки прихват отводят в сторону. Для поворота следует торцовую часть винта вывести из опорного гнезда. Для предотвращения от растрескивания при закреплении хрупких заготовок рычаг 1 имеет эластичный наконечник 2</p>
	<p>Обеспечивает надежное закрепление прихватом с эластичным наконечником 2 и хороший доступ к месту зажима. Положение прихвата по высоте регулируется винтом 1</p>
	<p>Прихват отводится одновременно с разжимом благодаря воздействию эксцентрикового кулачка 4 на упорный уголок 2. При зажиме эксцентриковый кулачок отводится от уголка и прихват 1 под воздействием пружины 3 возвращается в положение для зажима</p>
	<p>Закрепление стеклянной подкладки с приклеенными заготовками осуществляется вращением винта 1. Для предотвращения поломки подкладок на рычаг 2 приклеена резиновая опора 3</p>
	<p>На конец винта 1, вращением которого закрепляется стеклянная подкладка с наклеенными заготовками, насаживается опора 2 из эластичного материала (капролона, эбонита)</p>

Продолжение табл. 15

Эскиз зажимного устройства	Принцип действия
	<p>Прихват позволяет регулировать точку приложения зажимного усилия путем выдвигания штанги 2, фиксируемой винтом 1</p>

Приспособления для УЗО по наружному контуру аналогичны приспособлению для ультразвукового разрезания.

Приспособления для ультразвуковой обработки отверстий. Приспособления для УЗО отверстий являются наиболее распространенными и могут быть для УЗО односторонним и групповым инструментом.

Ультразвуковым методом обрабатывают отверстия различной конфигурации размером 0,2... 80 мм и глубиной 20... 50 мм.

При УЗО отверстий заготовки наклеивают на стеклянные пластины для предотвращения сколов при выходе инструмента. Для этого также снижают давление инструмента на обрабатываемую заготовку в конце обработки.

Для устранения скругления кромок заготовки на входе инструмента в обрабатываемое отверстие скругления заготовок шлифуют.

УЗО отверстий часто выполняют по накладным шаблонам, выполняющим функции кондукторных втулок в кондукторах при обработке резанием (рис. 44). Шаблон 1 имеет точно выполнен-

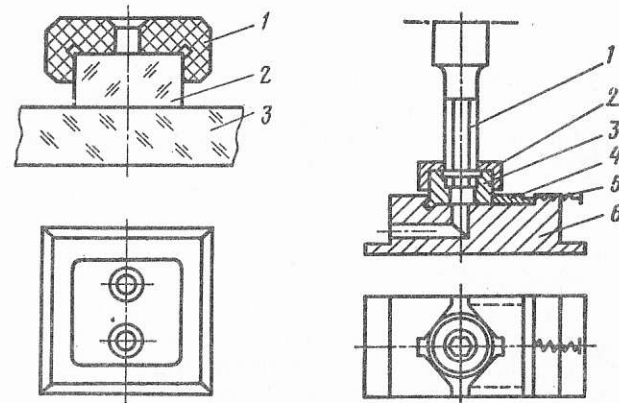


Рис. 44. УЗО отверстий по накладному шаблону

Рис. 45. Приспособление для ультразвукового калибрования матриц

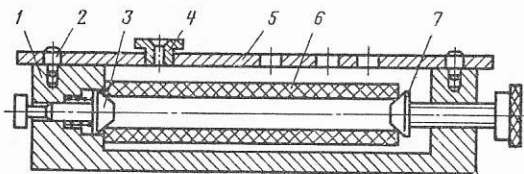


Рис. 46. Приспособление для УЗО отверстий

ное отверстие, в которое вводится инструмент-концентратор, после чего заготовку 2 вместе с подкладкой 3 закрепляют на столе ультразвукового станка, а шаблон 1 снимают. Шаблон может ориентироваться как по наружным, так и по внутренним поверхностям обрабатываемой заготовки.

При УЗО отверстий заготовок, имеющих внутренние сквозные полости, подачу рабочей жидкости с абразивом следует производить под давлением через гидроканал, выполненный в приспособлении для закрепления обрабатываемой заготовки (рис. 45).

Твердосплавная матрица 3 устанавливается в призмах, закрепляется перемещением подвижной призмы 4 при вращении винта 5. Для установки приспособления относительно инструмента-концентратора 1 применяют шаблон 2, который после закрепления прихватами корпуса 6 приспособления к столу ультразвукового станка снимается.

Подача рабочей жидкости под давлением обеспечивает увеличение производительности в 1,5...2 раза, повышает точность УЗО, что обуславливается интенсификацией процессов эвакуации выколотых частиц при обработке и поступления свежих абразивных зерен в рабочую зону.

Процесс ультразвукового калибрования твердосплавных матриц был разработан и исследован при использовании ультразвукового станка 4Д772Э, нагнетание абразивной суспензии — карбида бора № 3 — в рабочий зазор под давлением 0,1...0,5 МПа осуществлялось диафрагменным насосом станка.

При УЗО отверстий, расположенных в один ряд по образующей керамической трубки, целесообразно применять приспособление, приведенное на рис. 46 [6]. В этом приспособлении производилась УЗО отверстий диаметром 8 мм в керамических трубках длиной 250 мм при толщине стенок 6 мм и наружном диаметре 18 мм.

Заготовку 6 центрируют отверстием посредством подпружиненного (плавающего) центра 3 и центра 7, перемещающегося при вращении винта. Подпружиненный центр позволяет совместить установочную базу приспособления и базу заготовки.

Отверстия в шаблоне 5 под сменную втулку 4 выполнены соосно с центрами обрабатываемых отверстий; точная ориентация шаблона в приспособлении достигается с помощью штифтов 2, закрепленных в корпусе 1.

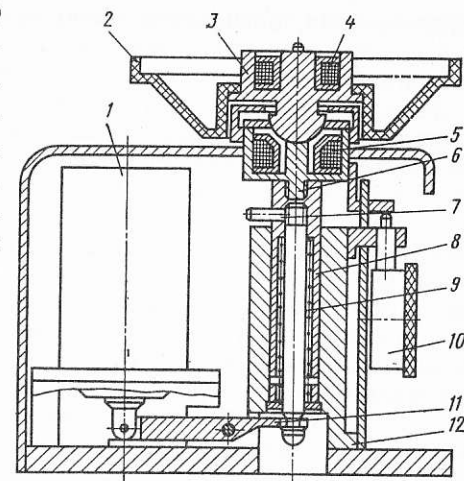


Рис. 47. Приспособление для УЗО групповым КИ

При одновременной УЗО нескольких отверстий групповым инструментом ориентация заготовки по отношению к инструменту осуществляется в основном посредством установочных шаблонов аналогично ориентации заготовок при УЗО одиночных отверстий.

При одновременной обработке групповым инструментом нескольких заготовок применяют кассеты. Особенностью приспособлений для УЗО групповым инструментом является то, что рабочие поверхности торцов инструментов должны совпадать (или параллельны) с

поверхностью заготовки, от которой отсчитывается глубина прошиваемых отверстий. Это необходимо для устранения перекосов и чтобы инструменты одновременно вступали в работу. Это требование обеспечивается применением шаровой опоры в конструкции приспособления (рис. 47) [6].

Заготовку наклеивают на стальную подкладку, которая посредством фиксирующих элементов ориентируется на столе 3 приспособления. Крепление заготовки с подкладкой осуществляется включением электромагнита 4. Посредством сферической опоры стола 3 производится самоустановка заготовки по плоскости рабочих торцов инструментов, после чего включением электромагнита 5, расположенного в корпусе 6, фиксируется положение стола 3. Рабочая подача заготовки на инструмент осуществляется тарированной пружиной 9, перемещающей шток 8, рабочий стол с подкладкой и заготовкой.

Момент окончания обработки определяется по индикатору 10, после чего включается соленоид 1, якорь которого, втягиваясь через рычаг 11, опускает подвижные части приспособления до соприкосновения упора 7 в корпус 12.

Для сбора абразивной суспензии при УЗО служит кожух 2. **Физические основы лазерной обработки.** Технологические операции лазерной обработки основаны на использовании, главным образом, теплового действия лазерного излучения на непрозрачные среды. Процессы взаимодействия лазерного излучения с твердым телом включают несколько стадий: поглощение излучения и передачу энергии тепловым колебаниям решетки



твердого тела, нагревание материала без разрушения, включая плавление, разрушение материала путем испарения и выброса расплава, остывание после окончания воздействия излучения.

Энергия лазерного излучения в технологии машиностроения нашла наибольшее применение для решения следующих технологических задач: лазерное поверхностное упрочнение, лазерная сварка, лазерное прошивание отверстий и лазерная резка как металлических, так и неметаллических материалов.

Лазерный метод упрочнения заключается в высокоскоростном разогреве металла под действием лазерного излучения до температур, превышающих температуру фазовых превращений, но ниже температуры плавления и последующего высокоскоростного охлаждения ( $10^5 \dots 10^6$  градус/с) за счет отвода теплоты в основную массу металла.

При достижении плотности мощности излучения до  $q = 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> лазерный луч производит сварку деталей.

Лазерное излучение с плотностью мощности, соответствующей развитию процесса испарения, используется для размерной обработки материалов.

Определение оптимальных параметров лазерной обработки основывается на решении уравнения теплопроводности при соответствующих начальных и граничных условиях

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \Delta T(x, y, z, t) + q(x, y, z, t) \dots,$$

где  $q$  — мощность теплового источника.

Отношение диаметра пятна  $2a$  лазерного излучения к толщине свариваемого листа  $t$  является важным параметром, с увеличением которого значительно снижается время сварки. Оптимальным отношением  $2a/t$ , обеспечивающим наилучшую геометрию сварки листовых материалов импульсным излучением является 2:1 при отношении температуры верхней поверхности свариваемого листа к температуре нижней поверхности листа 3:1.

Для любого заданного отношения диаметра пятна лазерного излучения к толщине листа время воздействия лазерного излучения возрастает пропорционально квадрату толщины листа, тепловой поток снижается прямо пропорционально толщине листа, а необходимая энергия излучения увеличивается пропорционально кубу толщины листа.

Для значительных отношений диаметра светового пятна к толщине время импульса, обеспечивающее отношение температуры верхней поверхности листа к температуре нижней поверхности листа 3:1, можно оценить выражением  $\theta = 0,4 \frac{t^2}{a}$ .

**Особенности приспособлений для лазерной сварки.** Высокая скорость нагрева при лазерной сварке при высокой плотности

мощности излучения в зоне соединения облегчает сварку металлов, имеющих высокую теплопроводность (медь, золото, серебро) и высокую температуру плавления (молибден, вольфрам, рений и др.).

Высокая концентрация энергии в световом пятне диаметром до нескольких микрометров и малые длительности импульсов излучения  $\theta = 10^{-4} \dots 10^{-2}$  с обеспечивают большие возможности лазерной сварки при соединении деталей толщиной 0,01 ... 0,1 мм, тогда как соединение их другими способами является затруднительным.

Передача теплоты в глубину свариваемых материалов осуществляется в основном за счет теплопроводности, и зона проплавления в этом случае имеет форму, близкую к сферической. Это имеет место, когда плотность мощности в зоне сварки  $q = 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, т. е. когда нет развитого испарения расплавленного металла в лазерном пятне (практически имеет место в определенной степени испарение металлов, но оно не должно быть слишком развитым).

Исходя из механизма образования сварного соединения конструкция приспособления для лазерной сварки проплавлением должна обеспечивать плотный надежный тепловой контакт в зоне образования сварного ядра. Если такой контакт не обеспечен, то, например, при лазерной сварке листовых деталей верхняя деталь «прожигается» и не образуется качественного сварного соединения.

Особенностью приспособлений для лазерной сварки является отсутствие механического контакта между свариваемыми деталями и устройствами для передачи тепловой энергии к месту сварки, что исключает попадание в зону сварки нежелательных веществ, как это имеет место при аргонно-дуговой, электроконтактной и плазменной сварке.

Специфической особенностью приспособлений для лазерной сварки является возможность подвода энергии к нагреваемой площадке через любую пропускающую свет среду, через твердые прозрачные материалы.

В конструкциях приспособлений предусматриваются специальные прозрачные элементы (из стекла, сапфира и др.), которые прижимают соединяемые детали и через них пропускается лазерное излучение.

Кроме того, в конструкции приспособления может быть предусмотрена герметичная камера, в которую подается газ, например аргон, а лазерный луч пропускается через прозрачную стенку этой камеры в зону сварки, осуществляя сварку в атмосфере аргона. Применяя двухкоординатные столы, перемещаемые посредством двух шаговых электродвигателей и системы ЧПУ, можно лазерную сварку производить по определенной программе.

**Приспособления для лазерной сварки проволочек и деталей из листовых материалов.** Приспособления для лазерной сварки проволочек должны обеспечить закрепление свариваемых деталей в необходимом положении и сохранение этой ориентации при действии лазерного луча и давления паров при сварке.

При сварке проволочек встык диаметр светового пятна выбирают примерно равным диаметру проволоки [25, 32]. Если материал проволоки одинаков, то центр светового пятна совмещают с плоскостью стыка. При сварке разнородных материалов центр светового пятна смещают в сторону проволоки из металла, имеющего более высокую теплопроводность, температуру плавления или коэффициент отражения.

При сварке параллельно расположенных проволочек между соприкасающимися цилиндрическими поверхностями соединяемых проволочек образуется клиновидный зазор, играющий роль светоловушки (излучение за счет многократного отражения от поверхностей клина более полно сосредоточивается в зоне сварки).

Лазерная сварка позволяет осуществлять качественное соединение проволочек небольшого диаметра с плоскими или цилиндрическими поверхностями более массивных по сравнению с проволокой деталей.

Наиболее широко применяемые типы соединений лазерной сваркой приведены на рис. 48.

Соединение, при котором проволока или тонкий стержень вставляются в предварительно просверленное отверстие (рис. 48, а), является одним из легко выполнимых, причем диаметр светового пятна следует выбирать равным или немного большим диаметра проволоки. Если конец проволоки выступает на 0,3...0,5 ее диаметра над поверхностью, то при некотором увеличении энергии излучения образуется полусферическая «шляпка», которая приваривается к плоскости и значительно увеличивает прочность соединения [32].

Качество лазерной сварки значительно возрастает при укладке проволоки в канавки или в пазы детали (рис. 48, е).

При лазерной сварке деталей из листовых материалов к более массивным деталям целесообразно сварку осуществлять через предварительно просверленное отверстие, причем диаметр светового пятна выбирают примерно в 2 раза больше, чем диаметр отверстия.

Возможно также соединение со сквозным проплавлением привариваемой листовой детали, в этом случае большое значение имеет хороший контакт свариваемых деталей.

Ниже приведем конструкции приспособлений для лазерной сварки.

В электромагнитном приспособлении (рис. 49) на внутреннее кольцо 2 координатного стола 4 лазерной установки насажена

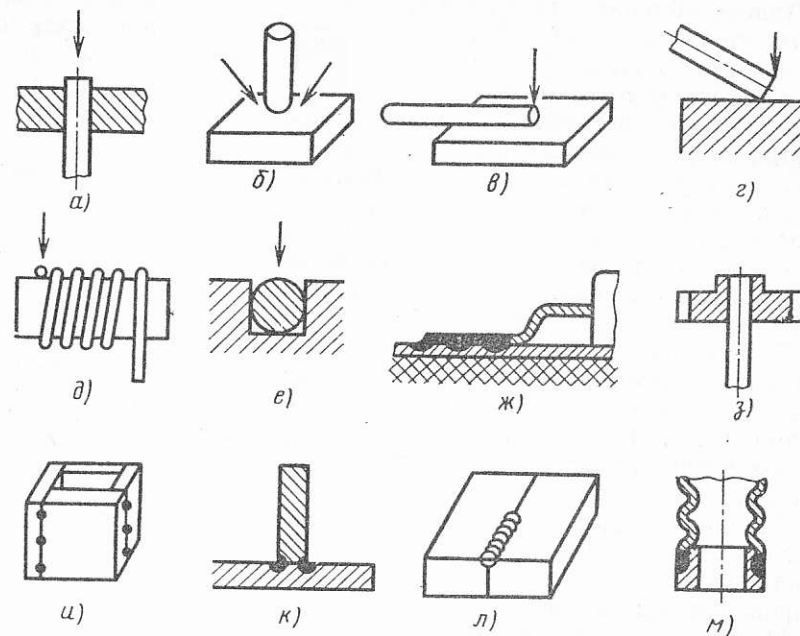


Рис. 48. Типы сварных соединений:

а, з — сварка проволоки или стержня, вставленных в предварительно просверленное отверстие; б — Т-образная сварка с плоской деталью; в, г — сварка проволоки внахлест; д — сварка проволоки, намотанной на массивный стержень; е — укладка проволоки при сварке в канавки или пазы; ж — сварка тонколистовых проводников к печатным платам; и — сварка коробчатого корпуса; к, л — сварка плоских деталей встык; м — сварка

катушка 5. Прижатие проводников осуществляется прижимами 1 и 3 за счет действия электромагнитных сил, создаваемых катушкой. Прижимы расположены в направляющих 6 и 7.

Второй вариант электромагнитного приспособления предусматривает прижатие свариваемых деталей стеклянной пластиной и осуществление сварки лазерным лучом через эту пластину.

Оба варианта приспособления отличаются высокой универсальностью. Путем регулирования тока в электромагнитной системе можно в широких пределах изменять силу прижима соединяемых деталей. При разработке приспособления для лазерной сварки листовой детали проплавлением ее толщины очень важно обеспечить плотный контакт в зоне сварной точки. Для этой цели можно применять пружинные зажимы, а сварку осуществлять через прозрачное стекло, вставленное в металлическую оправу прижима. Иногда в приспособлениях применяют подпружиненный прижим, а лазерную сварку осуществляют через небольшие отверстия в этом прижиге. Для равномерного прижатия проводников в нижней части прижима приклеивается резиновая прокладка.

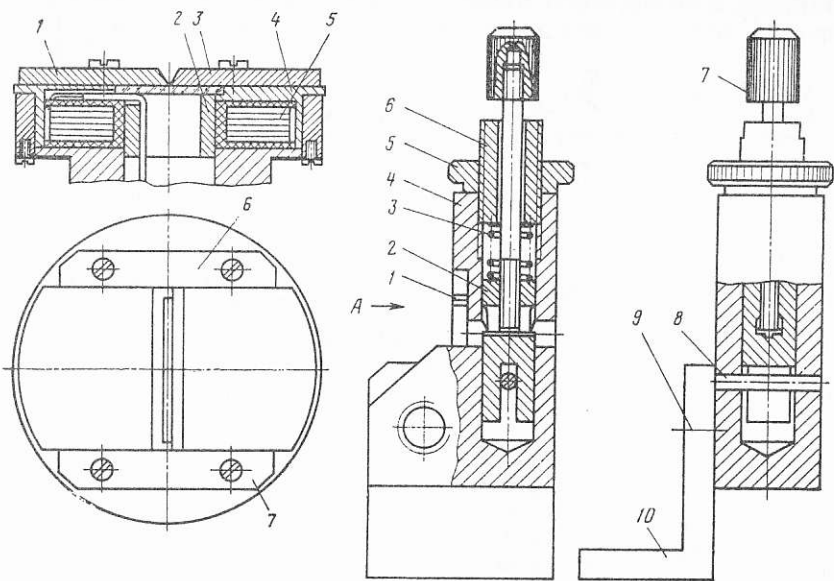


Рис. 49. Приспособление для лазерной сварки проволочек и приварке проволочек к листовым деталям

Рис. 50. Приспособление для лазерной приварки проволоки к кольцу

Приспособление для лазерной приварки проволочки к внутренней поверхности кольца приведено на рис. 50 (кольцо и проволочка изображены штриховой линией, вид А).

В отверстие корпуса 4 вставлен ползун 2, прижимаемый пружиной 3 до упора в штифт 8, который также предотвращает поворот ползуна в отверстии. Для регулирования силы прижима имеется регулировочный винт 6, для предотвращения самопроизвольного перемещения которого имеется гайка 5. Прижатие шины к ползуну осуществляется винтом 7. Приспособление крепится к столу лазерной установки при помощи кронштейна 10. Привариваемое кольцо вставляется в кольцевой вырез (вид А) и закрепляется в корпусе плоской пружиной 1. Проволочка продевается через паз в ползуне и прижимается к кольцу.

Оптимальное направление лазерного луча в зону сварки достигается поворотом корпуса 4 относительно кронштейна 10. Фиксация этого положения производится винтом 9.

Был разработан также второй вариант приспособления с базированием кольца на стеклянной оси, а привариваемая прово-

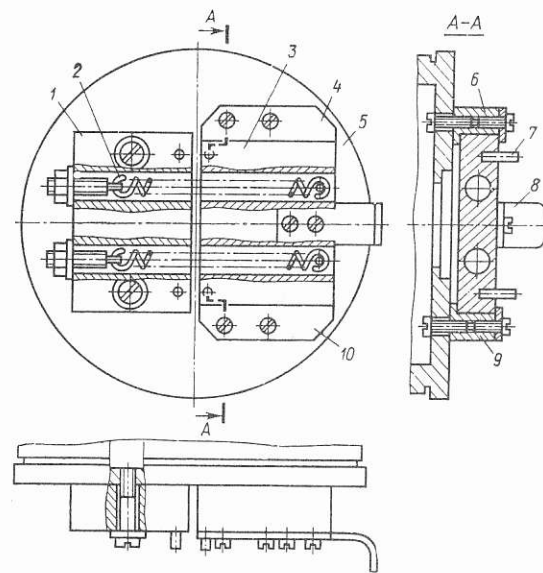


Рис. 51. Приспособление для лазерной сварки встык

лока располагалась в пазу стеклянной оси. Сварка производилась лазерным лучом через стеклянную ось.

Эти приспособления применяют для сварки на лазерной технологической установке «Квант 12».

Конструкция приспособления для лазерной сварки встык с прижатием свариваемых заготовок в процессе сварки приведена на рис. 51. Для уменьшения потери энергии на отражение на свариваемых деталях выполняют специальные кромки, которые образуют клиновидную светоловушку. Светоловушки могут быть образованы путем механической обработки кромок или специальной отбортовкой (загибанием листовых деталей).

Приспособление устанавливают на координатном столе 5 лазерной установки. Оно состоит из неподвижного корпуса 1 и подвижного корпуса 3, который может перемещаться с помощью рукоятки 8 по направляющим 6 и 9. Перемещение подвижного корпуса вверх и выход его из направляющих ограничены пластинами 4 и 10. Свариваемые детали базируются на штыри 7. Сила прижима свариваемых заготовок осуществляется двумя пружинами 2, смонтированными внутри подвижного и неподвижного корпусов.

Это приспособление применяют для лазерной сварки разъемов на технологической лазерной установке «Квант 16».

**Приспособления для лазерной сварки ленточных проводников.** Для получения качественной сварки ленточных проводников толщиной 0,10... 0,2 мм между собой необходимо обеспечить плотный, надежный тепловой контакт свариваемых проводников.



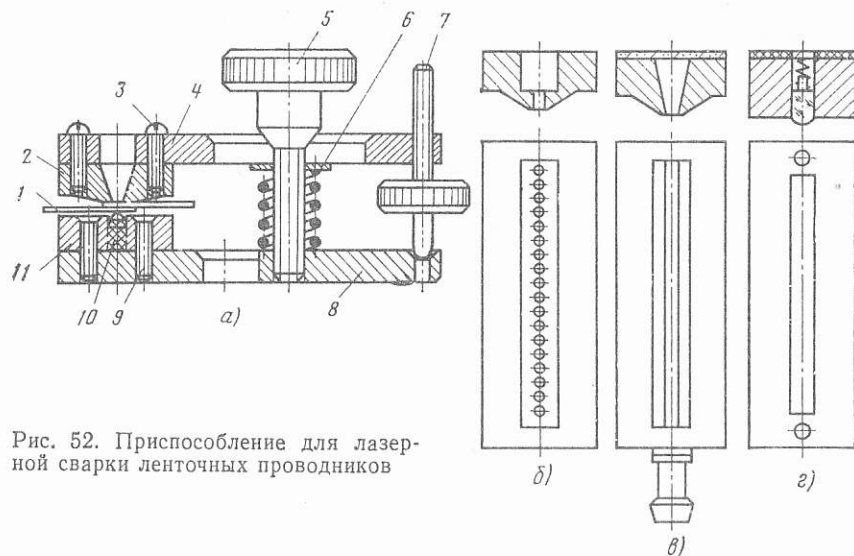


Рис. 52. Приспособление для лазерной сварки ленточных проводников

С учетом этого требования было разработано приспособление для лазерной сварки ленточных проводников толщиной 0,05... 0,1 мм и шириной до 50 мм (рис. 52, а) применительно к лазерной технологической установке «Квант 12».

Плоские проводники 1 зажимают между губками 2 и 11, привинчиваемыми к верхней 4 и нижней 8 планкам винтами 3 и 9. Необходимая сила прижима создается вращением винта 5, а регулирование приспособления осуществляется винтом 7 и пружиной 6. Плоские проводники устанавливаются на призматический клин 10, базирующийся на гидропластмассовой подложке.

Верхняя губка выполнялась нескольких конструкций: с отверстиями, через которые производится сварка (рис. 52, б);

со сквозным пазом и подачей аргона (воздуха), осуществляющего надежный контакт свариваемых проводников (рис. 52, в); с подпружиненной стеклянной пластиной (рис. 52, г).

Для получения качественного контактного соединения необходимо, чтобы температура на нижней поверхности нижнего ленточного проводника достигала температуры плавления, например при сварке медных проводников 1083°C, а на верхней поверхности верхнего проводника не происходило интенсивного испарения металла.

Для получения надежного контактного соединения поверхность, на которую опирается ленточный проводник, должна быть гибкой, самоустанавливающейся по форме верхней прижимающей губки и в то же время должна быть жаростойкой, т. е. при

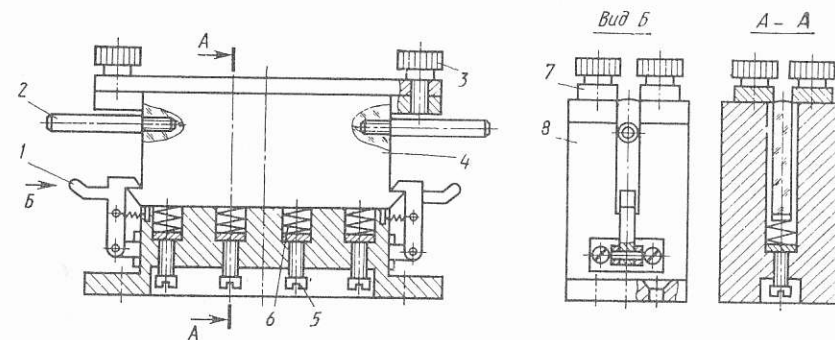


Рис. 53. Приспособление для лазерной сварки узких ленточных проводников

сварке импульсным излучением поверхность не должна привариваться и пригорать.

При плохом контакте свариваемых ленточных проводников верхний проводник пробивается лазерным лучом, а нижний разогревается недостаточно (непровар).

Наиболее эффективной конструкцией опоры является конструкция опоры с песком впазу, в котором перемещается клин. При перемещении клина песок вытесняется, при этом по всей контактной поверхности проводников создаются одинаковые равномерные давления, т. е. обеспечивается надежный тепловой контакт по всей свариваемой поверхности.

Для лазерной сварки узких ленточных проводников шириной до 25 мм было разработано приспособление, приведенное на рис. 53. Плотный контакт свариваемых ленточных проводников по всей ширине осуществляется опорной пластиной 4, подпружиненной четырьмя пружинами 6, сила поджатия которых регулируется винтами 5 с шайбами. Ограничение перемещения опорной пластины 4 в верхнем направлении обеспечивается штифтами 2, выполняющими одновременно роль ручек. Закрепление свариваемых ленточных проводников происходит винтами 3 через планки 7. После этого откидываются фиксаторы 1 и пластина 4 посредством пружин сжимает ленточные проводники в месте сварки. Большинство деталей приспособления изготовлено из дюралюминия, в том числе и корпус 8 приспособления.

Разработанная конструкция приспособления показала удовлетворительные результаты в процессе лазерной сварки на установке «Квант 12».

Наиболее перспективным является приспособление для закрепления плоских ленточных проводников, позволяющее производить сварку в среде аргона, который создает не только защитную атмосферу, но и необходимое контактное давление, равномерно распределенное по всему контуру сварки.

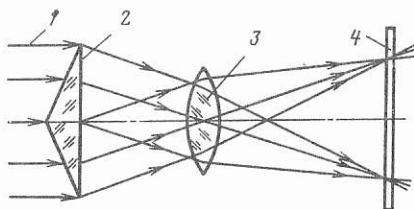


Рис. 54. Оптическая система с аксиконом:

1 — лазерное излучение; 2 — линза аксиконная; 3 — линза сферическая; 4 — обрабатываемая заготовка

**Приспособление для лазерной размерной обработки.** В технологии машиностроения в настоящее время получили наибольшее применение два метода размерной лазерной обработки:

метод копирования, при котором обрабатываемая поверхность повторяет с определенной точностью форму лазерного луча;

метод обработки по контуру, когда обрабатываемый контур определяется траекторией лазерного луча.

Образование отверстий лазерным излучением средней плотности мощности осуществляется в основном за счет испарения и плавления материала заготовки, причем отверстие увеличивается в глубину главным образом путем испарения материала заготовки, а по диаметру за счет плавления стенок и вытеснения расплавленного металла давлением паров.

Приспособления для лазерной размерной обработки имеют те же особенности, что и приспособления для лазерной сварки.

Своеобразие приспособлений для размерной лазерной обработки состоит в том, что часто требуется более точная координация заготовки относительно оси лазерного луча, например при прошивании  $n$ -го числа точно расположенных отверстий. Для этого применяют приспособления с шаговыми электродвигателями, управляемыми от системы ЧПУ. Точность координирования достигается 0,03 мм.

Спецификой приспособлений для лазерного сверления отверстий, а также для лазерной резки и размерного контурного вырезания является наличие специальных экранов, предотвращающих попадание жидких частиц металла на поверхность линзы объектива.

Цилиндрические отверстия чаще всего образуются при фокусировании лазерного излучения с активными элементами круглого сечения без применения диафрагм и масок, формирующих лазерный луч.

Проекционный метод позволяет получать самые различные по форме профильные отверстия, а образование круглых отверстий этим способом осуществляется более точно за счет равномерного распределения плотности мощности в световом пятне.

Для лазерного сверления отверстий значительных диаметров лазерное излучение формируют с помощью аксиконов (рис. 54)

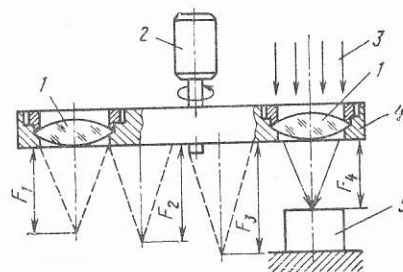


Рис. 55. Револьверная оптическая головка:

1 — линза; 2 — привод головки; 3 — лазерное излучение; 4 — головка поворотная; 5 — обрабатываемая заготовка

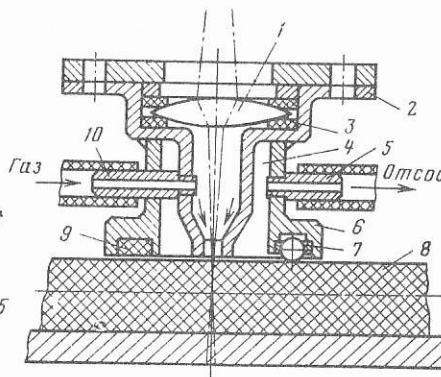


Рис. 56. Приспособление для лазерного разрезания

на кольцевую площадку, с которой происходит удаление металла (лазерная трепанация) [60].

Ширина кольцевой площадки зависит от фокусного расстояния. Аксиконная система может применяться при обработке отверстий больших диаметров в тонких пластинах, поскольку фокальной плоскостью обработки производится расходящимся лазерным пучком, что ведет к резкому уменьшению концентрации энергии в зоне обработки.

Для обработки глубоких отверстий применяют revolverную оптическую головку с линзами, расположенными на различных фокусных расстояниях  $F_1, F_2, \dots, F_n$  (рис. 55) [60].

Многоимпульсная обработка отверстия в этом случае осуществляется при автоматизированном повороте revolverной головки при переходе от импульса к импульсу. При этом за счет автоматизированной поднастройки лазерного луча можно высококачественно обрабатывать глубокие отверстия.

Конструкция приспособления (рис. 56) для лазерного разрезания, в котором для более качественного раскроя диэлектрических и текстильных материалов применяется охлаждение разрезаемого материала и удаление продуктов сгорания, состоит из корпуса 2, перемещаемого совместно с зеркалом, установленным на подвижном мосту лазерной установки над поверхностью разрезаемого материала 8, фокусирующей линзы 1 и уплотнения 3, препятствующего проникновению подаваемого газа вверх за линзу. На корпусе 2 установлена кольцеобразная камера 6, соединенная с вакуумом-отсосом патрубком 5.

При резании материала через штуцер 10 подается газ, который через сопло поступает в зону резания, одновременно через патрубков 5 и полость 4 производится отсос воздуха, который эвакуирует продукты сгорания из зоны резания. Для надежного локального отсоса продуктов сгорания, а также свободного перемещения камеры 6 относительно разрезаемого материала основание камеры может быть выполнено в виде пластины 9 или в виде набора шариков 7. Такая конструкция основания камеры обеспечивает удержание от подъема разрезаемого материала при перемещении лазерного луча в любом направлении [40].

**Приспособления для электронно-лучевой обработки (ЭЛО).** При ЭЛО используют сфокусированный пучок электронов, движущихся с большой скоростью за счет ускорения в электрических полях высокого потенциала в электронных пушках.

ЭЛО применяют при выполнении различных технологических операций: электронно-лучевой размерной обработки, сварки, плавки, нанесения покрытия.

Так же как и при лазерной обработке, технологические возможности ЭЛО определяются в основном диаметром электронного луча и плотностью мощности потока в зоне обработки: плотность мощности при размерной ЭЛО составляет  $10^7 \dots 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, при электронно-лучевой сварке —  $10^5 \dots 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>, при металлургических операциях (плавка, зонная очистка) —  $10^3 \dots 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>.

ЭЛО имеет следующие особенности: возможность широкого регулирования режимов и управления тепловыми процессами, возможность сварки и плавки легкоокисляющихся, активных, тугоплавких металлов, так как обработка осуществляется в вакууме, высокая химическая чистота обработки, обработка весьма малых отверстий и миниатюрных деталей.

Существенным недостатком ЭЛО является необходимость создания вакуума.

Технологическая оснастка для ЭЛО во многом аналогична технологической оснастке для лазерной обработки, но в соответствии с особенностями оснастка для ЭЛО имеет определенную специфику.

Методика проектирования зажимных устройств, установочных элементов приспособлений во многом аналогична методике разработки приспособлений для лазерной сварки.

Конструкция приспособления для сварки трубчатых монокристаллов при изготовлении прямолинейных труб из тугоплавких металлов и их сплавов приведена на рис. 57.

Приспособление включает в себя упругую шпильку 1 с подвижными центрирующими конусами 2 и компенсационной пружиной 3. Трубчатые монокристаллы диаметром до 30 мм и длиной до 300 мм собираются на шпильке из стали 12Х18Н9Т, фик-

сируются конусами и затягиваются через пружину гайками 4. Собранные трубные заготовки 5 закрепляют в патроне низковольтной электронно-лучевой установки.

Назначение шпильки — предотвратить разъединение собранного плотно стыка от угловых перемещений заготовок и дать свариваемым заготовкам в сборе свободу перемещения от термических расширений по трем осям. Это позволяет снизить напряжения — один из источников зарождения поликристаллической структуры.

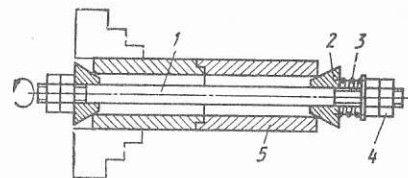


Рис. 57. Приспособление для электронно-лучевой сварки

## ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ЭХО

**Основы размерной ЭХО.** При размерной ЭХО используют принцип анодного растворения материала обрабатываемой заготовки при интенсивной прокачке электролита в МЭП.

Электрохимическая размерная обработка характеризуется комплексом технологических показателей: производительностью и энергоемкостью процесса формообразования, точностью обработки, качеством обработанной поверхности, физико-механическими свойствами поверхностного слоя, эксплуатационными показателями: пределом выносливости, износостойкостью, коррозионной стойкостью и др.

Используя закон Ома  $j = \frac{U - \Delta U}{\rho S}$ , закон Фарадея  $m = \eta \epsilon I t$ , для удельной скорости съема, характеризующей производительность ЭХО, получим:

$$v = \frac{\eta \epsilon \kappa (U - \Delta U)}{S} = \frac{A}{S}, \quad (14)$$

где  $\eta$  — анодный выход по току;  $\epsilon$  — электрохимический эквивалент, мм<sup>3</sup>/(А·с);  $\kappa$  — удельная электрическая проводимость электролита, См/м;  $\rho$  — удельное сопротивление электролита, Ом·мм;  $U$  — напряжение на МЭЗ, В;  $\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2$  — падение напряжения, В;  $\Delta U_1$  — падение напряжения, обусловленное процессами в приэлектродных слоях, В;  $\Delta U_2$  — падение напряжения, обусловленное сопротивлением проводников, В;  $j$  — плотность технологического тока, А/мм<sup>2</sup>;  $t$  — время электрохимиче-



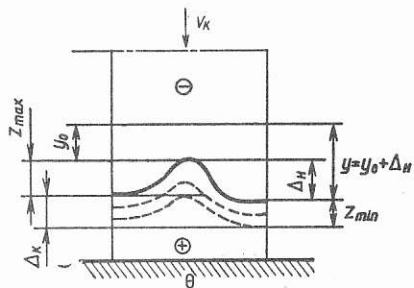


Рис. 58. Схема уменьшения исходной погрешности при ЭХО

Уменьшение исходной погрешности заготовки до заданной (допустимой) погрешности обработанной детали определяется изменением МЭЗ по его длине и во времени.

При этом различают два характерных случая ЭХО: при неподвижных электродах; перемещающимся ЭИ относительно заготовки (рис. 58).

Рассмотрим изменение МЭЗ для единичной площади  $F=1$  для идеализированного процесса ЭХО, т. е. полагаем, что электропроводность электролита  $\kappa = \text{const}$  (пренебрегаем влиянием температуры и газонаполнения), электрохимические реакции на аноде протекают с постоянным выходом по току  $\eta$ , и изменение потенциалов электродов при пропускании тока мало и значительно меньше омического падения напряжения на столбе электролита в МЭЗ.

В этом случае изменение плоского МЭЗ во времени составит

$$\frac{dy}{dt} = v_{\text{эx}} - v_{\kappa} = \frac{A}{S} - v_{\kappa}, \quad (15)$$

где  $v_{\kappa}$  — скорость движения ЭИ.

Решение (15) при  $t=0$ ;  $S=S_0$  дает

$$\begin{aligned} t &= \frac{1}{v_{\kappa}} \left( S - S_{\kappa} + S_y \ln \frac{S_0 - S_y}{S_{\kappa} - S_y} \right)_t = \\ &= \frac{S_0 - S_{\kappa}}{v_{\kappa}} + \frac{A}{v_{\kappa}^2} \ln \frac{(v_{\kappa} S_0 / A) - 1}{(v_{\kappa} S / A) - 1}, \end{aligned} \quad (16)$$

а припуск, снятый за время  $t$ ,

$$z = S_y \ln \frac{S_0 + S_y}{S_{\kappa} - S_y},$$

где  $S_y = \frac{A}{v_{\kappa}}$  — установившееся значение МЭЗ, его можно найти

ского растворения,  $c$ ;  $S$  — величина МЭЗ, мм;  $A$  — характеристика процесса ЭХО, мм<sup>2</sup>/с.

Производительность и энергоёмкость ЭХО определяются в основном электродными процессами и процессами массопереноса, эффективной валентностью растворяемого металла.

Увеличением электропроводности электролита, снижением поляризационного сопротивления можно уменьшить энергоёмкость процесса ЭХО.

из (15) при  $\frac{dy}{dt} = 0$ , т. е. когда линейная скорость анодного растворения равняется скорости подачи  $v_{\kappa}$  электрода-инструмента.

При ЭХО неподвижным ЭИ, т. е. при  $v_{\kappa} \rightarrow 0$ , в пределе из (16) находим:

$$t = \frac{1}{2A} (S^2 - S_0^2); \quad (17)$$

$$S = \sqrt{S_0^2 + 2At}. \quad (18)$$

Выражения (14)–(18) получены при условии, что вектор подачи ЭИ перпендикулярен анодной поверхности растворения. В наименее и наиболее удаленных от ЭИ точках обрабатываемой поверхности:

$$-\frac{d\Delta}{dt} = \frac{A}{y} - \frac{A}{y + \Delta}, \quad (19)$$

где  $\Delta$  — погрешность формообразования в момент  $t$ .

Интегрируя (19) от  $\Delta_H$  до  $\Delta_{\kappa}$ , находим время изменения погрешности (время движения заданной точности) [69]

$$t = \frac{1}{v} (\Delta_H - \Delta_{\kappa} + z_{\text{min}}),$$

где  $\Delta_H$  и  $\Delta_{\kappa}$  — соответственно начальная и конечная погрешности обрабатываемой поверхности;  $z_{\text{min}}$  — припуск, удаляемый за это время с дальнего участка,

$$z_{\text{min}} = y_0 \ln \frac{\Delta_H}{\Delta_{\kappa}}.$$

В реальных условиях процесс генерации поверхности при ЭХО определяется полем скоростей растворения в МЭЗ, а положение в пространстве поверхности растворения определяется также степенью локализации электрохимического растворения.

Степень локализации оценивается отношением скоростей растворения на площадках  $I$  и  $II$ , расположенных на расстоянии, равном единице длины:

$$L = \frac{v_I}{v_{II}} = \frac{j_0 \eta_0}{j \eta}.$$

Полагая первичное распределение тока, для оценки точностных возможностей электролитов можно использовать выражение

$$L = \frac{\eta_0 S}{\eta S_0},$$

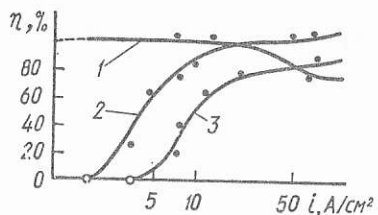


Рис. 59. Влияние плотности тока на выход по току:

1 — NaCl; 2 — NaNO<sub>3</sub>; 3 — NaClO<sub>3</sub>

при  $\eta = \eta_0 = \text{const}$  степень локализации зависит только от отношения величин МЭЗ.

При ЭХО в пассивирующих, кислородсодержащих электролитах, например NaClO<sub>3</sub>, NaNO<sub>3</sub>, выход по току в значительной мере зависит от плотности тока (рис. 59) [45] и  $L$  будет тем больше, чем больше отношение  $j_0/j$  при максимальном отношении  $\eta_0/\eta$ .

С учетом электродных потенциалов и эффективной электропроводности степень локализации можно записать

$$L = \frac{\eta_0 (U - \Delta U_0) S \kappa_0}{\eta (U - \Delta U) S_0 \kappa}$$

где  $\kappa$  и  $\kappa_0$  — эффективная локальная удельная электрическая проводимость соответственно в зонах с зазорами  $S$  и  $S_0$  при плотностях тока  $j$  и  $j_0$ .

Погрешности обработки, обусловленные температурными и упругими деформациями элементов системы станок — приспособление — инструмент-электрод — заготовка в совокупности с другими погрешностями не должны превышать величину допуска на выдерживаемый размер:

$$\delta \geq \sum \Delta_{\text{сп}} + \sum \Delta_3 \pm \sum \Delta_{\text{в}}$$

где  $\sum \Delta_{\text{сп}}$  — векторная сумма систематических постоянных погрешностей;  $\sum \Delta_3$  — векторная сумма погрешностей, изменяющихся по известному закону (функциональные);  $\sum \Delta_{\text{в}}$  — совокупность случайных погрешностей.

Структура погрешностей и их величина определяются технологической схемой ЭХО, характеристиками оборудования, режимами ЭХО, конструкцией приспособления.

При анализе точности ЭХО целесообразно выделять группу погрешностей, присущих операциям металлообработки резанием, и погрешностей, определяемых особенностями процесса ЭХО.

Первичные погрешности ЭХО, обусловленные нестабильностью входных параметров — напряжения на МЭЗ, подачи ЭИ, изменения  $\kappa$  электролита при изменении его концентрации, температуры электролита в баке, — определяют размерную точность ЭХО.

Из анализа размерной цепи, замыкающим звеном которой является выдерживаемый размер и в которую непременно вхо-

дит величина МЭЗ, изменение МЭЗ обусловлено нестабильностью входных параметров ЭХО

$$\Delta^1 = \Delta_y + \Delta_n + \Delta_{\text{и}} + \Delta_{\text{д}} + \Delta_{\text{т}} + \Delta_{\text{с}}$$

где  $\Delta_y$  — погрешность установки;  $\Delta_n$  — погрешность настройки;  $\Delta_{\text{и}}$  — погрешность, связанная с ЭИ;  $\Delta_{\text{д}}$  — погрешность, обусловленная упругими деформациями элементов системы станок — приспособление — инструмент (электрод) — заготовка;  $\Delta_{\text{т}}$  — погрешность, обусловленная температурными деформациями при ЭХО;  $\Delta_{\text{с}}$  — погрешность, вызванная изменением величины МЭЗ.

При изменении параметров, определяющих значение МЭЗ, из (14) находим

$$dS = \frac{dS}{d\eta} d\eta + \frac{\partial S}{\partial \kappa} d\kappa + \frac{\partial S}{\partial U} dU + \frac{\partial S}{\partial \Delta U} d\Delta U + \frac{\partial S}{\partial v} dv. \quad (20)$$

Размерная точность ЭХО может быть повышена увеличением жесткости системы станок — приспособление — инструмент (электрод) — заготовка, улучшением условий теплоотвода, совмещением измерительной и установочной баз, повышением точности изготовления ЭИ, а также согласно (20) стабилизацией основных параметров ЭХО: температуры электролита, его рН, давления нагнетания электролита, его гидрокинематических параметров, напряжения на МЭЗ, скорости подачи ЭИ и др.

При анализе первичных погрешностей ЭХО для каждой технологической схемы следует определять наиболее существенные погрешности и при проектировании технологической оснастки (в том числе и приспособлений) необходимо предусматривать технические мероприятия, уменьшающие погрешности.

Вторичные погрешности при размерной ЭХО обусловлены изменением физико-химических свойств электролита, скорости течения электролита, его температуры по обрабатываемой поверхности (при двухмерной задаче — по длине МЭП) и во времени.

Внутренние возмущения процесса ЭХО вызывают изменения (деформацию) эпюры плотностей технологических токов, эпюры локальных скоростей съема металла по обрабатываемой поверхности, что в свою очередь приводит к возникновению погрешности формы поверхности (погрешности копирования), которая определяется как максимальная разность отклонений точек получаемого профиля от номинального профиля.

Учет вторичных погрешностей имеет особую значимость при проектировании технологических процессов, приспособлений и оборудования для электрохимического сложнофасонного формообразования (копировально-прошивочные операции, ЭХО пера лопаток и др.).

Уменьшение вторичных погрешностей при ЭХО достигается применением скорректированного ЭИ [8]; импульсных токов,

импульсно-циклических схем ЭХО [9, 10]; ЭХО со сложной кинематикой движения ЭИ; осциллирующим ЭИ в МЭЗ [59]; специальных схем подачи электролита в МЭЗ и эвакуации продуктов реакции [44]; электролитов, обеспечивающих минимальное газообразование в МЭЗ.

#### **КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ДЛЯ ЭХО ПО ТИПУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ**

В промышленности эксплуатируется большое число станков, и соответственно приспособлений, отличающихся по технологическому назначению. Существует ряд признаков, которые могут быть положены в основу общей классификации приспособлений для ЭХО. Важнейшими из них являются технологическое назначение, степень универсальности и уровень автоматизации.

Технологическое назначение приспособления определяется как характером обрабатываемых на нем заготовок (вид и габариты заготовки, форма, размеры, точность и качество обработанных поверхностей), так и производственными требованиями (производительность и номенклатура обрабатываемых заготовок). В промышленности значительное место занимают станки и приспособления для выполнения установленных технологических операций. Технологическое назначение определяет конструкцию приспособления. Конструкция основных механизмов и некоторые особенности приспособлений непосредственно зависят от его функционального назначения. Это служит основанием для систематизации конструктивных особенностей приспособлений для ЭХО в соответствии с их технологической классификацией.

Приспособления современных электрохимических станков можно объединить в следующие группы:

для обработки штампов, пресс-форм, литейных форм, фасонных полостей заготовок деталей машин, трепанации отверстий;  
для обработки пера лопаток;

для обработки цилиндрических заготовок;

для удаления заусенцев;

для маркирования.

**Приспособления для ЭХО штампов, пресс-форм, прошивки отверстий.** Приспособления для обработки гравюр ковочных штампов, пресс-форм, литейных форм, прошивки отверстий цилиндрического и фасонного профиля широко применяются на станках копировально-прошивочной группы. Так как контуры заготовок штампов и пресс-форм литейных форм имеют относительно простые формы и точность размеров гравюры определяется точностью изготовления рабочей части катода-инструмента и параметрами процесса ЭХО, то базирование заготовки сводится к ориентированию баз заготовки относительно баз катода-

инструмента. Во многих случаях заготовки устанавливают на столе станка, ориентируют относительно катода-инструмента и закрепляют прихватами.

Ориентирование заготовок относительно катода-инструмента производят с помощью штифтов, вставляемых в отверстия заготовки и инструмента; выверкой с помощью индикаторов и лимбов перемещения стола станка, с помощью установленных на столе станка упоров, положение которых скоординировано относительно катода-инструмента. Однако в условиях мелкосерийного инструментального производства, когда на одном станке обрабатывается большая номенклатура штампов по их габаритам и форме, целесообразно использовать быстропереналаживаемые приспособления или устройства для автоматического базирования заготовок разных типоразмеров на столе станка.

Прошивку отверстий диаметром более 30 мм проводят трубчатым электродом. При этом в конечный момент прошивки сквозного отверстия остающийся керн может вызвать короткое замыкание. Поэтому при проектировании приспособления для прошивки сквозных отверстий необходимо предусматривать устройства, фиксирующие керн в конечный момент обработки.

**Приспособления для обработки лопаток.** Приспособления для обработки профильной части турбинных лопаток широко используют на специальных станках. Базирование и крепление лопаток осуществляют непосредственно в приспособлении, установленном на станке; с предварительной установкой базирующих элементов на лопатку вне станка с последующим базированием и закреплением их в приспособлении; с базированием лопатки в приспособлении-спутнике. При проектировании приспособления для обработки лопаток необходимо предусматривать элементы, повышающие ее жесткость, а также значительную мощность токоподвода. Так, при обработке лопаток больших размеров сила тока достигает 20 кА.

**Приспособления для обработки цилиндрических деталей.** При ЭХО цилиндрических заготовок имеют место операции обработки глубоких отверстий, обработка наружных поверхностей длинномерных и тонкостенных труб, разрезки труб и прутков.

При ЭХО глубоких отверстий используют схемы обработки с неподвижным в осевом направлении относительно заготовки катодом и с подвижным катодом. И в этом и в другом случаях роль приспособления сводится к закреплению заготовки на станке, обеспечению герметизации отверстия, где прокачивается под давлением электролит, осуществлению подвода тока, обеспечения минимальное падение напряжения по длине заготовки. Базирование катода-инструмента осуществляется, как правило, по поверхности отверстия предварительно обрабо-



При обработке наружных поверхностей труб и прутков, особенно тонкостенных и длинномерных, приспособления базируют обрабатываемые поверхности относительно рабочих участков катода-инструмента, причем часто обработка производится с перемещением базирующих элементов или всего приспособления в целом относительно заготовки.

**Приспособления для маркирования.** Маркирование заготовок, особенно крупногабаритных, часто осуществляют автономной головкой (штемпелем) со сменной информацией на рабочей части катода. Базирующим элементом в этом случае являются трафарет, пористая прокладка, сетка из нетокопроводящего материала. Применяют для маркировки и стационарные приспособления с использованием элементов базирования и закрепления.

**Приспособления для снятия заусенцев** и (одновременно) скругления острых кромок в подавляющем большинстве случаев содержат все элементы базирования и закрепления, а также одновременно и элементы базирования и закрепления катодов-инструментов, так называемые катодные устройства.

#### ТРЕБОВАНИЯ К ПРИСПОСОБЛЕНИЯМ ДЛЯ ЭХО

Приспособления для ЭХО должны удовлетворять определенным требованиям.

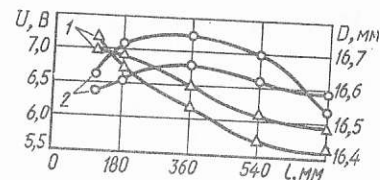
Общие требования вытекают из необходимости обеспечения наиболее высоких технико-экономических показателей технологической оснастки. Основные из них — точность приспособления, необходимая жесткость конструкции, быстродействие, компактность, удобство и безопасность в работе, технологичность конструкции, возможность автоматизации, отсутствие выверки заготовок относительно электрода-инструмента, возможность обработки одновременно нескольких заготовок, возможность контроля параметров в процессе ЭХО, возможность перемещения заготовок, широкая стандартизация и унификация элементов, возможность многократного применения деталей приспособлений в других компоновках (универсально-сборных) приспособлений.

Специальные требования, в свою очередь, подразделяют на комплексные, относящиеся к приспособлению для ЭХО в целом, и частные, применяемые к отдельным его элементам — токоподводу, тракту подвода электролита. Комплексные требования сохраняют свое значение практически во всех случаях, частные в значительной степени зависят от функционального назначения конкретного приспособления для ЭХО.

Наиболее важным из специальных требований комплексного характера, которым должна удовлетворять оснастка для ЭХО, является коррозионная стойкость.

Рис. 60. Распределение напряжения между электродами (кривые в центре) и диаметров отверстий по длине трубы после ЭХО:

1 — токоподвод на конце заготовки; 2 — токоподвод посередине заготовки



Специальные требования частного характера предъявляются к отдельным элементам приспособления.

Важным требованием к приспособлению для ЭХО является жесткость, необходимая для предотвращения вибрации заготовки и инструмента.

Силы, действующие на приспособление при ЭХО, создаются преимущественно гидростатическим и динамическим давлением электролита. При больших площадях обработки или при использовании схемы с обратным потоком электролита статические нагрузки достигают весьма больших значений. Обработка с боковым подводом электролита, а также формообразование асимметричных поверхностей сопровождается значительным действием боковых сил. При обработке в импульсно-циклическом режиме осевая сила приобретает динамический характер с частотой ударов, соответствующей частоте следования импульсов тока или изменения направления перемещения электродов. При недостаточной жесткости приспособления отклонения взаимного положения электрода и заготовки могут снизить точность обработки и послужить причиной короткого замыкания.

Одним из важных требований к приспособлению является обеспечение надежности токоподвода к заготовке. Для обеспечения минимального анодного растворения элементов приспособления целесообразно технологический ток подводить непосредственно к заготовке, что часто связано с определенными трудностями, усугубляемыми при ЭХО относительно длинных заготовок с небольшой площадью поперечного сечения, например турбинных лопаток, длинномерных тонкостенных труб, тонких пленок.

Обеспечение надежного токоподвода в этих случаях осложняется малой площадью контактных поверхностей, малой жесткостью заготовок и относительно большим электросопротивлением, обусловленным небольшой площадью сечения проводника и большой его длиной.

Так, исследованиями установлено, что при подводе тока к цилиндрической детали одним токоподводящим элементом, расположенным в различных частях заготовки по длине не удастся получить отверстие строго цилиндрической формы. Отклонения от цилиндричности соответствуют закону распределения напряжения по длине заготовки (рис. 60).

К токоподводам во время эксплуатации предъявляют следующие специальные требования: коррозионная стойкость в агрессивной среде; конструкционная стабильность (отсутствие растрескивания сопряжения шина — элементы приспособления — заготовка); недопустимость нарушения контакта в результате вибраций.

#### ЗАЩИТА ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ОТ КОРРОЗИИ

В условиях ЭХО основной причиной коррозии элементов приспособлений является протекание на их поверхности окислительно-восстановительных процессов под воздействием рабочих растворов электролитов, компонентов атмосферы и электрического тока. Электролиты, применяемые в процессе ЭХО, при наложении электрического тока становятся особенно активны.

При ЭХО коррозия протекает по электрохимическому механизму, т. е. вследствие возникновения замкнутых электрических цепей с участием проводников II рода. Скорость коррозии определяется физико-химическими свойствами граничащих фаз, а точнее электродным потенциалом, возникающим на границе раздела этих фаз или контактирующих металлов.

Средствами защиты от коррозии в растворах электролитов является применение коррозионно-стойких металлов (или повышение их стойкости за счет легирования или защитных покрытий), разрыв возникающих электрических цепей, введение в эти цепи больших сопротивлений (например, за счет ингибиторов), подбор контактирующих металлических деталей с близкими значениями электродных потенциалов.

Для конструкций приспособлений в некоторых случаях можно подобрать металл с требуемой коррозионной стойкостью исходя из значения его электрохимического потенциала в рассматриваемой среде. Следует отметить, что положение металлов в электрохимическом ряду может существенно изменяться в зависимости от свойств рабочего электролита. Так, если нормальный стандартный потенциал титана составляет 1,63 В, то в 3%-ном растворе хлористого натрия его установившийся потенциал равен +0,09 В. Столь высокое положительное значение потенциала титана определяет его повышенную способность к стойкому пассивированию и является показателем исключительных антикоррозионных свойств титана и сплавов на его основе. Это позволяет использовать их в качестве конструкционных материалов в приспособлениях для ЭХО. Коррозионной стойкостью в большинстве водных растворов электролитов обладают и сплавы на основе хрома, ниобия, циркония, молибдена, вольфрама.

Недостатком сплавов на основе этих металлов являются их худшая обрабатываемость резанием и высокая стоимость.

Для облегчения и удешевления изготовления приспособлений для ЭХО дорогостоящие коррозионно-стойкие сплавы могут быть заменены обычными конструкционными сталями с нанесенными защитными (в том числе неметаллическими) покрытиями, а также стойкими в условиях ЭХО неметаллическими материалами (в частности, керамикой и пластмассами).

Условия эксплуатации покрытий при ЭХО весьма сложные, так как кроме стойкости к коррозии покрытия должны выдерживать истирание и случайные повреждения. Важны при этом и электроизоляционные свойства, так как необходимо сопротивление до напряжений в 30 В и более без пробоя. Толщина покрытия зависит от применяемого материала и должна обеспечивать отсутствие проникновения электролита к поверхности металла.

Определенное значение для защиты приспособлений от коррозии имеет так называемая анодная и особенно катодная защита, осуществляемая подключением защищаемой конструкции к отрицательному или положительному полюсу внешнего источника постоянного тока.

Необходимым условием надежной эксплуатации электрохимических приспособлений является рациональное конструирование, а также технология изготовления их деталей.

Элементы приспособлений для ЭХО можно условно разделить на две группы:

1. Рабочие поверхности, которые находятся в непосредственной близости к зоне обработки.
2. Конструктивные элементы приспособлений, удаленные непосредственно от рабочей зоны.

Элементы приспособления, которые находятся в непосредственной близости к зоне обработки и особенно контактирующие с заготовкой подвергаются наряду с коррозией и анодному растворению. Поэтому приспособление необходимо проектировать с подводом технологического тока непосредственно к заготовке или максимально уменьшить число металлических деталей, контактирующих с заготовкой и токоподводом. Для уменьшения анодного травления деталей приспособления (например, базовых опор) целесообразно их изготавливать из токонепроводящих материалов (пластмасс, керамики) или из металлов, анодно-поляризующихся в рабочих электролитах, например из титана или ниобия при работе в водных растворах хлорида натрия.

При проектировании необходимо учитывать значение электрохимических потенциалов металлов, из которых изготовлены контактирующие в сборочных единицах детали, поскольку некоторые сопряжения являются нежелательными. Так, недопустимы контакты коррозионно-стойких хромоникелевых сталей и титановых сплавов с медными сплавами, цинковыми и кадмиевыми покрытиями.

16. Рекомендуемые и не рекомендуемые контакты материалов с покрытиями и материалами без покрытий в условиях атмосферы и кратковременного погружения в электролит при ЭХО

Материал	Покрытие						Коррозионно-стойкая сталь	Медь и ее сплавы	Титан и его сплавы	Алюминий и его сплавы с обработкой хромпиком
	хромовое	никелевое	оловянное и оловянно-свинцовое на меди и ее сплавах	кадмиевое хромированное	цинковое хромированное	Коррозионно-стойкая сталь				
Покрытие: хромовое	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
никелевое	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
оловянное и оловянно-свинцовое на меди и ее сплавах	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
кадмиевое хромированное	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
цинковое хромированное	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Коррозионно-стойкая сталь	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Медь и ее сплавы	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Титан и его сплавы	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Алюминий и его сплавы с обработкой хромпиком	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Примечание. + коррозии нет, — коррозия есть.

17. Рекомендуемые и не рекомендуемые контакты материалов с покрытиями и материалов без покрытий в условиях постоянного погружения в электролит при ЭХО

Материал	Покрытие				Коррозионно-стойкая сталь	Медь и ее сплавы	Титан и его сплавы
	хромовое	никелевое	оловянное и оловянно-свинцовое на меди и ее сплавах	кадмий-фосфатное с пропиткой лаком			
Покрытие: хромовое	+	+	+	—	+	—	+
никелевое	+	+	+	—	+	—	+
оловянное и оловянно-свинцовое на меди и ее сплавах	+	+	+	—	—	+	+
кадмий-фосфатное с пропиткой лаком	—	—	—	+	—	—	—
Коррозионно-стойкая сталь	+	+	—	—	+	—	+
Медь и ее сплавы	—	—	+	—	—	+	—
Титан и его сплавы	+	+	+	—	+	—	+

Примечание. + коррозии нет; — коррозия есть.

Характеристика контактов материалов деталей с покрытиями и без покрытий в условиях атмосферы и кратковременного погружения, а также постоянного погружения в электролит приведены соответственно в табл. 16, 17 [14].

Установлено, что ЭДС гальванического элемента, образованного разнородными металлами, не должна превышать 0,25 В.

В случае, если по конструктивным соображениям необходимо иметь сопряжение деталей, образующих не рекомендуемые электрохимические пары, следует разделить их слоем неметаллического материала (лака, смолы, пластмассы и т. п.).

Элементы приспособлений, удаленные непосредственно от рабочей зоны, не несущие повышенных механических нагрузок, целесообразно изготавливать из низколегированных или углеродистых сталей с соответствующей антикоррозионной защитой путем нанесения металлических и неметаллических покрытий, анодной или катодной защиты. Обработывая поверхность металла химическим путем, можно получить защитные пленки, коррозионно-стойкие в слабоагрессивных средах. К такой обработке относятся оксидирование, фосфатирование и азотирование. В связи с малой коррозионной стойкостью двух первых покрытий они не получили распространения в качестве само-



стоятельных защитных покрытий при ЭХО. В отличие от этого защитный слой, полученный при азотировании (раствор нитрида железа в железе) и отличающийся повышенной твердостью (как у хромового покрытия) удовлетворяет коррозионным условиям эксплуатации, относясь к защитно-износостойким покрытиям. Поэтому азотированию рекомендуется подвергать детали, работающие в условиях коррозионного воздействия и трения.

В качестве металлических покрытий широко используют хромовые, никелевые, свинцовые, цинковые, кадмиевые, оловянные. Неметаллические покрытия применяют для защиты от коррозии электроизоляции и других целей. Основными видами таких покрытий при ЭХО являются: лакокрасочные, синтетические смолы, каучуки (резины), смазочные материалы, пасты, силикатные эмали.

Во всех случаях при удовлетворении требований прочности, жесткости, сохранения формы и размеров, электропроводности необходимо использовать пластмассы для изготовления деталей приспособлений. Характеристики пластмасс приведены в табл. 18.

При проектировании приспособлений необходимо учитывать и технологические особенности изготовления их деталей и сборочных единиц. В частности, сваривать конструкции необходимо тем же металлом или металлом с более положительным потенциалом в определенных электролитах, а зазоры после сварки следует устранять чеканкой швов. Подбирая материал для деталей, необходимо учитывать его состояние и возможное взаимодействие с компонентами электролита. Так, неотожженная латунь, контактируя с аммиаком, коррозионно растрескивается.

18. Характеристика антикоррозионных материалов и неметаллических покрытий, применяемых для деталей приспособлений

Материал покрытия	Временное сопротивление, МПа	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Химическая стойкость в растворах			Водопоглощаемость, %
			HCl, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	NaCl	NaOH	
Эпоксидные смолы	28...95	1,00...1,35	У	У	У	0,08...1,1
Капролон	90...95	1,15...1,16	Н	У	Н	10,9
Текстолит	85...100	1,6...1,8	У	У	У	0,8...0,7
Пластмасса АСТ-Т	45...50	1,14...1,18	У	У	Н	0,14
Фторопласт	20...22,5	2,19	У	У	У	0
Резина кислотостойкая	4,5		У	У	У	0
Щелочестойкая Полиуретан	80...60	1,17...1,21	У	У	У	2,5

Примечание. У — стойкость удовлетворительная; Н — стойкость неудовлетворительная.

Катодная защита элементов приспособления, станка, а также необрабатываемых поверхностей заготовки в процессе ЭХО осуществляется посредством присоединения к защищаемой конструкции протектора из металла с более отрицательным равновесным потенциалом, соединения конструкции с отрицательным полюсом отдельного источника постоянного тока или установки дополнительного электрода-протектора с подключением его к индивидуальному источнику питания. При этом происходит перераспределение потенциалов, вследствие чего электрод-протектор растворяется.

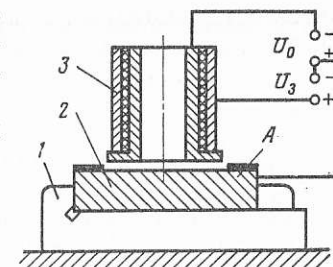


Рис. 61. Схема катодной защиты

При катодной защите (рис. 61) с использованием дополнительного электрода-протектора 3 и подключением его к индивидуальному источнику тока величина напряжения защиты  $U_3$  элементов приспособления 1 станка и необрабатываемых поверхностей А заготовки 2 от растравливания в процессе ЭХО подбирается экспериментально ввиду трудности учета всех составляющих потенциала растравливания. Защита элементов приспособлений от коррозии в нерабочие периоды производится путем присоединения к приспособлению элемента из металла, имеющего более отрицательный стандартный потенциал, чем защищаемый металл. Так, для защиты деталей приспособлений из сталей используют цинк, магний.

#### ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОКОПОДВОДОВ

Токоподводы, применяемые в конструкциях приспособлений, бывают неподвижные и подвижные. Неподвижные токоподводы, применяемые в конструкциях приспособлений, бывают двух видов — неразъемные и разъемные.

Неразъемные токоподводы используются при соединении токоведущей шины и приспособления. Разъемные токоподводы применяют в технологической оснастке для обеспечения непосредственной электрической связи между токоподводом и поверхностью заготовки сложной пространственной формы, например, при ЭХО лопаток турбин и компрессоров.

Подвижные токоподводы применяют для обеспечения электрической связи между вращающимися элементами приспособления и неподвижными токоподводами; вращающейся заготовкой и неподвижными элементами приспособления, для обеспечения минимального падения напряжения на длинномерных заготовках.

При проектировании токоподвода необходимо обеспечить коррозионную стойкость его элементов, это достигается применением антикоррозионных материалов, например меди, алюминия, их сплавов, а также антикоррозионных покрытий.

Проектирование токоподвода включает проектирование токоподводящих шин и проектирование собственно токоподвода.

При проектировании необходимо учитывать:

свойства материалов токоподводящей шины и элементов приспособления;

максимально допустимую температуру нагрева;

максимальную силу технологического тока.

**Проектирование токоподводящих шин.** Сечение шины рассчитывают на силу тока (приходящуюся на одну шину)

$$I \leq I_{\text{доп}},$$

где  $I_{\text{доп}}$  — максимальная сила тока в шине, при которой ее температура не превышает допустимую ( $70^\circ\text{C}$ ).

Допустимая сила тока определяется по формуле

$$I_{\text{доп}} = n \sqrt{Q/r}, \quad (21)$$

где  $n$  — количество шин;  $Q$  — теплоотдача шины, Вт;  $r$  — электрическое сопротивление шины, Ом.

Теплоотдача шины производится за счет конвекции  $Q_k$  и излучения  $Q_{\text{и}}$ . При допустимой температуре шины при ЭХО  $Q_{\text{и}} \ll Q_k$ , следовательно, величиной  $Q_{\text{и}}$  можно пренебречь. Тогда

$$Q = Q_k = \alpha_k \Delta T F = 1,5 \cdot 10^{-1} (\Delta T)^{1,35} F,$$

где  $\alpha_k$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(мм<sup>2</sup>·°C);  $\Delta T$  — перепад температур окружающей среды и шины, °C;  $F$  — площадь поверхности шины, мм<sup>2</sup>.

Площадь поверхности шины

прямоугольного сечения  $F = 2(h+a)l$ ;

круглого сечения  $F = 2\pi Rl$ ,

где  $h$  — высота шины, мм;  $a$  — толщина шины, мм;  $l$  — длина шины, мм;  $2(h+a)$ ,  $2\pi R$  — периметры сечения шин, мм.

Сопротивление шины

$$r = \frac{\rho_m (1 + \alpha T) l}{S \cdot 10^3},$$

где  $\rho_m$  — удельное сопротивление материала шины при  $0^\circ\text{C}$ , Ом·мм<sup>2</sup>/м (для меди  $\rho_m = 0,0162$  Ом·мм<sup>2</sup>/м; для алюминия  $\rho_m = 0,0285$  Ом·мм<sup>2</sup>/м);  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления (для меди  $\alpha = 0,04$ ; для алюминия  $\alpha = 0,0037$ );  $S$  — площадь сечения шины, мм<sup>2</sup>.

Подставив значения  $Q$  и  $r$  в выражение (21), получим

$$I_{\text{доп}} = n \sqrt{\frac{1,5 \cdot 10^{-1} (\Delta T)^{1,35} 2(h+a)ha}{\rho_m (1 + \alpha T)}}. \quad (22)$$

При ЭХО используют шины с различным профилем сечения — прямоугольным, квадратным, круглым и пр. В случае применения плоской шины, когда  $h \gg a$ , составляющей  $a$  в числителе выражения (22) можно пренебречь, тогда ширина шины  $h$  при заданной составляющей  $a$

$$h \geq \frac{I_{\text{доп}}}{n} \sqrt{\frac{\rho (1 + \alpha T)}{1,5 \cdot 10^{-1} (\Delta T)^{1,35} 2a}}.$$

В случае, когда сечение шин predetermined заранее, число шин с прямоугольным сечением  $n$

$$n \geq \frac{I_{\text{доп}}}{\sqrt{\frac{1,5 \cdot 10^{-1} (\Delta T)^{1,35} 2(h+a)ha}{\rho_m (1 + \alpha T)}}};$$

число шин с круглым сечением

$$n \geq \frac{I_{\text{доп}}}{\sqrt{\frac{1,5 \cdot 10^{-1} (\Delta T)^{1,35} 2\pi^2 R^3}{\rho (1 + \alpha T)}}},$$

где  $R$  — радиус профиля сечения шины, мм.

Для обеспечения заданной точности обработки длинномерных деталей необходимо определить число и месторасположение токоподводов по длине заготовки.

Так, при ЭХО цилиндрических отверстий длинномерных деталей неподвижным длинным катодом (рис. 62) припуск, удаляемый за время  $t$ , определяется из (18)

$$z = \sqrt{S_0^2 + 2\eta \varepsilon (U + \Delta U) \pi t S_0}.$$

Изменение составляющей  $\Delta U_2$  приводит к изменению величины снимаемого припуска при ЭХО неподвижным катодом

$$\Delta z = \frac{\partial z}{\partial \Delta U_2} \Delta U_2 = - \frac{z(z + 2S_0)}{2(z + S_0)(U - \Delta U_1)} \Delta U_2.$$

Откуда, если  $\Delta z$  задано, найдем максимально допустимое значение  $\Delta U_2$ :

$$|\Delta U_2| \leq \frac{2(z + S_0)(U - \Delta U_1) |\Delta z|}{z(z + 2S_0)}.$$

Падение напряжения в проводнике (заготовке) определяет

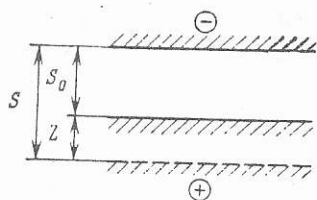


Рис. 62. К определению припуска

ся следующим образом:

$$\Delta U_2 = \frac{1}{2} \frac{I}{n_T} \frac{l_T \rho_M}{S},$$

где  $n_T$  — число токоподводов;  $l_T = L_d/n$  — расстояние между токоподводами, м;  $L_d$  — длина детали, м.

Число токоподводов выбирается из условия

$$n \geq \sqrt{\frac{z(z+2S_0) l L_d \rho_M}{4(z+S_0)(U-\Delta U_1)|\Delta z| S}}.$$

**Проектирование неподвижных токоподводов.** Расчет неподвижного токоподвода заключается в определении площади контакта шины с элементом приспособления и силы прижатия.

В месте контакта допустимая температура нагрева согласно «Правилам устройства электрохимических установок» зависит от вида сборочного соединения (табл. 19).

Расчет площади контакта и силы прижатия затруднен из-за сложности оценки истинной площади контакта. Площадь наложения шины на поверхность элемента приспособления включает в себя участки с металлическим контактом и участки, покрытые непроводящими окисными пленками. Площадь контакта зависит от силы прижатия, формы контактирующих поверхностей, величины и формы микронеровностей, материала контакта.

Электрическое сопротивление  $r_{н.к}$  контактного соединения складывается из сопротивления собственно контакта  $r_k$  и сопротивления участка шины на длине  $l$  стыковки  $r_c$  (рис. 63)

$$r_{н.к} = r_k + r_c.$$

Электрическое сопротивление контакта должно быть не более чем на 5...10% больше электрического сопротивления цельного проводника на длине, равной длине контактного соединения. Электрическое сопротивление собственно контакта может

#### 19. Допустимые температурные параметры контактных соединений

Вид сборочного соединения	Допустимая температура, °C	
	максимальная	перегрева относительно шины
Болтовое, заклепочное из меди	80	45
Пружинное из меди	75	40
Сварное из меди	120	85
Металлокерамическое	100	65

быть оценено по формуле

$$r_k \approx \frac{\rho_M}{2} \sqrt{\frac{\pi \sigma_B}{P k_1}} = \frac{\varepsilon}{\sqrt{P k_1}},$$

где  $\sigma_B$  — временное сопротивление, Па;  $P$  — нормальная сила стыковки, Н;  $k_1$  — коэффициент, учитывающий число площадок касания на площади наложения;  $k_1 = 0,5; 0,87$  и  $1$  соответственно для точечного, линейного и плоского контактов;  $\varepsilon$  — обобщенный коэффициент, зависит от материала контакта и состояния контактных поверхностей,  $\text{Ом} \cdot \text{Н}^{0,5}$ :

Материал контакта	Значение коэффициента $\varepsilon \cdot 10^4$
Медь — медь . . . . .	0,8...1,4
Медь — медь с покрытием оловом . . . . .	0,9...1,1
Алюминий — медь . . . . .	10
Сталь — медь . . . . .	30
Сталь — сталь . . . . .	75—80

Электрическое сопротивление участка шины на длине стыковки

$$r_c = \rho_M (l/S) k_2,$$

где  $k_2$  — коэффициент, учитывающий прямолинейность шины и зависящий от отношения  $h/l$ .

При проектировании места стыковки шины с элементом приспособления необходимо обеспечить минимальную длину  $l$ . Исходя из этого рекомендуется обеспечить соотношения  $h/l < 0,1$ , тогда коэффициент  $k_2 = 0,5$ . При таком значении в дальнейших расчетах  $r_c$  можно пренебречь.

Электрическое сопротивление контактного соединения определяет его температуру. Повышение температуры точки касания относительно температуры шины определяется соотношением

$$\Delta T_k = \frac{U_{н.к}^2 \cdot 10^3}{8 \lambda \rho_M},$$

где  $U_{н.к} = I r_{н.к}$  — падение напряжения в месте контактного соединения;  $\lambda$  — теплопроводность материала контакта,  $\text{Вт}/(\text{мм} \cdot ^\circ\text{C})$ .

Надежная и долговечная работа контактного соединения обеспечивается, если температура его в месте стыка не превышает допустимой величины  $\Delta T_{к доп}$ . Следовательно,

$$\Delta T_k = \frac{I^2 z^2 \cdot 10^3}{8 \lambda P k_1 \rho_M} \leq \Delta T_{к доп}.$$

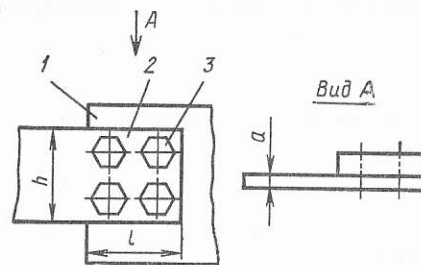


Рис. 63. Схема токоподвода к элементу приспособления:

1 — элемент приспособления; 2 — шина; 3 — болты крепления



Сила прижатия шины к элементу приспособления

$$P \geq \frac{I^2 \epsilon^2 \cdot 10^3}{8 \lambda k_1 \Delta T_{\text{к доп}} \rho_M}$$

Зная силу прижатия, можно определить площадь наложения шины

$$П = P / f_{\text{уд}}$$

где  $f_{\text{уд}}$  — давление стыковки, которое зависит от материала шины.

Материал шины	Давление, МПа
Медь с покрытием оловом . . . . .	4...10
Медь, латунь . . . . .	6...12
Алюминий . . . . .	25
Сталь с покрытием оловом . . . . .	10...15
Сталь . . . . .	60

Проектирование неподвижных разъемных токоподводов. ЭХО подвергаются заготовки с самыми различными характеристиками по жесткости и прочности, по форме и размерам, и обработка производится при использовании силы технологических токов 10...20 кА.

Если в случае ЭХО жестких заготовок с достаточной площадью контакта (заготовки штампов и пресс-форм) обеспечение надежного токоподвода не вызывает трудностей, то при ЭХО некоторых нежестких заготовок с фасонным профилем и малой площадью контакта (лопатки турбин, длинномерные тонкостенные трубы) это сопряжено с определенными трудностями.

Поэтому при проектировании токоподводов, например, к заготовкам турбинных лопаток, по рекомендациям специального проектно-конструкторского технологического бюро электрообработки (СПКТБЭО), необходимо учитывать ряд специфических требований:

исключить влияние на точность базирования заготовки силового воздействия со стороны токоподвода;

обеспечить надежную работу токоподвода (при наличии опасности эрозионного, химического или электрохимического воздействия на контактирующие поверхности токоподвода);

обеспечить минимальное падение напряжения по длине заготовки.

Как показали исследования, выполненные в СПКТБЭО, а также авторами работы [30], для надежного выполнения токоподводом своих функций необходимо обеспечить давление в месте контакта 5...10 МПа. При этом может быть достигнута средняя плотность тока через номинальную поверхность токоподвода до 9 А/мм<sup>2</sup>, а сила общего тока до 20 кА.

Требуемая точность базирования заготовки (например, лопатки) достигается посредством определенных конструктивных

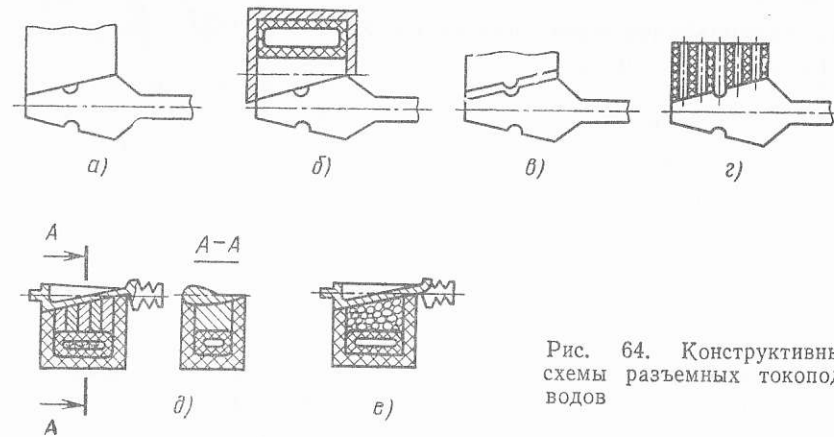


Рис. 64. Конструктивные схемы разъемных токоподводов

решений при разработке приспособления в целом. Обеспечение минимально допустимых величин давлений еще не гарантирует надежного функционирования токоподвода. При проектировании токоподвода необходимо учитывать обеспечение минимальной величины контактного сопротивления на стыке токоподвод—заготовка. Это обеспечивается правильным выбором удельного давления элемента токоподвода на контактную поверхность заготовки, а также выбором конструкции контактного элемента токоподвода и его материала.

Конструктивное решение имеет существенное значение, так как места контакта заготовки с токоподводом имеют часто сложный геометрический профиль.

Контактирование может быть осуществлено по трем основным схемам:

токоподводящего элемента с заготовкой лопатки в ее замковой части;

в двух зонах заготовки (в замковой части и по поверхностям технологической бобышки);

по профилю пера лопатки.

Первую и вторую схемы контактирования применяют при двусторонней обработке лопаток, причем вторая схема обеспечивает минимальное падение напряжения по длине лопатки. Третья схема контактирования применима лишь при односторонней, последовательной обработке пера со стороны спинки и корыта.

Некоторые конструктивные схемы токоподводов приведены на рис. 64. Каждая из них имеет свои особенности. Например, при обычном монолитном контактном элементе (рис. 64, а) число пятен с гарантированным электрическим контактом может быть увеличено за счет использования плавающего элемента (рис. 64, б), более мягкого металла или сетки (рис. 64, в). При

этом значительная часть площадки фасонной поверхности замка находится во впадине.

Разработаны также конструкции токоподводов, контактные элементы которых выполнены в виде стержней, покрытых резиной (рис. 64, *з*), пластин (рис. 64, *д*) или шариков (рис. 64, *е*), самоустанавливающихся по контактной поверхности заготовки под действием силы прижима. Недостатком большинства конструкций являются их сложность и невысокая надежность в эксплуатации.

**Проектирование подвижных токоподводов.** При проектировании подвижного токоподвода необходимо обеспечить минимальные электрические потери и износ контактной пары. Этим требованиям в большей мере удовлетворяют медно-графитовые композиционные марки щеток типа МГ и МГСО.

Расчет подвижного токоподвода заключается в определении числа щеток, их сечения и электрических потерь в контакте.

Суммарная площадь щеток  $S_{\Sigma}$  определяется из условия обеспечения заданной плотности тока в контакте

$$S_{\Sigma} = I / j_k,$$

где  $j_k$  — плотность тока в контакте.

По данным института электросварки им. Е. О. Патона, рекомендуемая плотность тока в контакте составляет 1...20 А/мм<sup>2</sup>. С увеличением силы тока и уменьшением скорости скольжения контактирующих поверхностей менее 5 м/с, допустимая плотность тока уменьшается.

Число щеток в контакте определяется по формуле

$$n_{щ} = S_{\Sigma} / S_{щ},$$

где  $S_{щ}$  — площадь сечения щетки.

При проектировании токоподвода с использованием медно-графитовых щеток требуется обеспечить необходимую силу прижима исходя из давления  $f_{уд} = 0,0175$  МПа и температуру нагрева в месте контакта не выше 30 °С.

Потери электрической мощности

$$\Delta N = \Delta N_{эл} + \Delta N_{мех} = I \Delta U + 9,81 f_{уд} \mu v S_{\Sigma},$$

где  $\Delta N_{эл}$  — составляющая электрических потерь мощности, Вт;  $\Delta N_{мех}$  — составляющая механических потерь мощности, Вт;  $\Delta U$  — переходное падение напряжения, В;  $\mu$  — коэффициент трения;  $v$  — окружная скорость на поверхности скольжения, м/с.

#### КОНСТРУКЦИИ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ДЛЯ ЭХО

**Приспособления для обработки штампов, пресс-форм, литейных форм.** При обработке гравюр штампов, пресс-форм, литейных форм, фасонных полостей заготовок деталей машин имеют

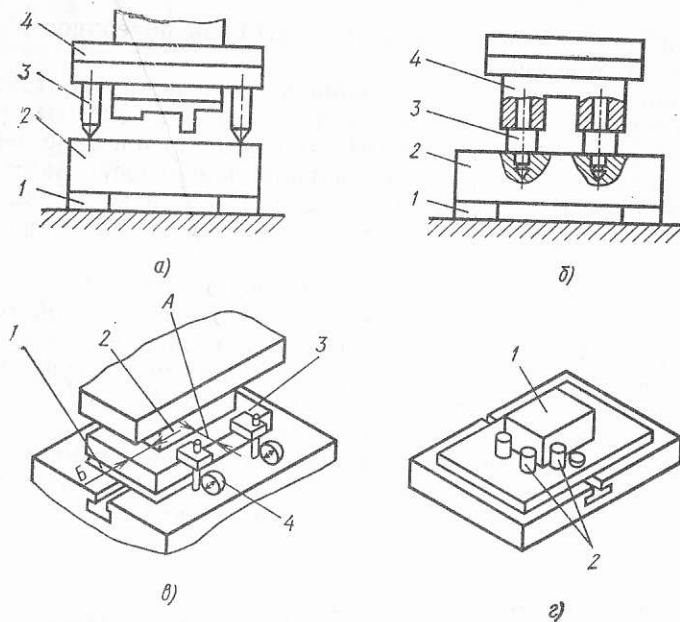


Рис. 65. Схема ориентирования заготовок относительно электрода-инструмента

место операции ориентирования и закрепления заготовки относительно ЭИ и крепления ее на столе станка или в приспособлении.

Схемы ориентирования заготовок на столе станка приведены на рис. 65 [1].

При базировании по штифтам заготовку 2 устанавливают на две мерные плоскопараллельные подкладки 1, расположенные на столе станка. Пиноль станка с установленным в ней катодом-инструментом 4 и штифтами 3 опускают до касания острия штифтов поверхности заготовки. Легким постукиванием по боковым поверхностям заготовки ее перемещают до совмещения штифтов с двумя контрольными точками, нанесенными предварительно на верхнюю поверхность заготовки (рис. 65, *а*). Точность базирования  $\pm 0,25$  мм.

При установке штифтов в контрольные отверстия заготовки совмещают их с отверстиями для подачи электролита в катод (рис. 65, *б*). Точность базирования в этом случае  $\pm 0,1$  мм.

Ориентирование заготовки с помощью индикатора и лимба перемещения стола станка (рис. 65, *в*) осуществляется следующим образом. Заготовку 3 устанавливают на мерные плоскопараллельные пластины 1. Перемещением заготовки добиваются параллельности баз заготовки и катода 2, которая обеспечива-

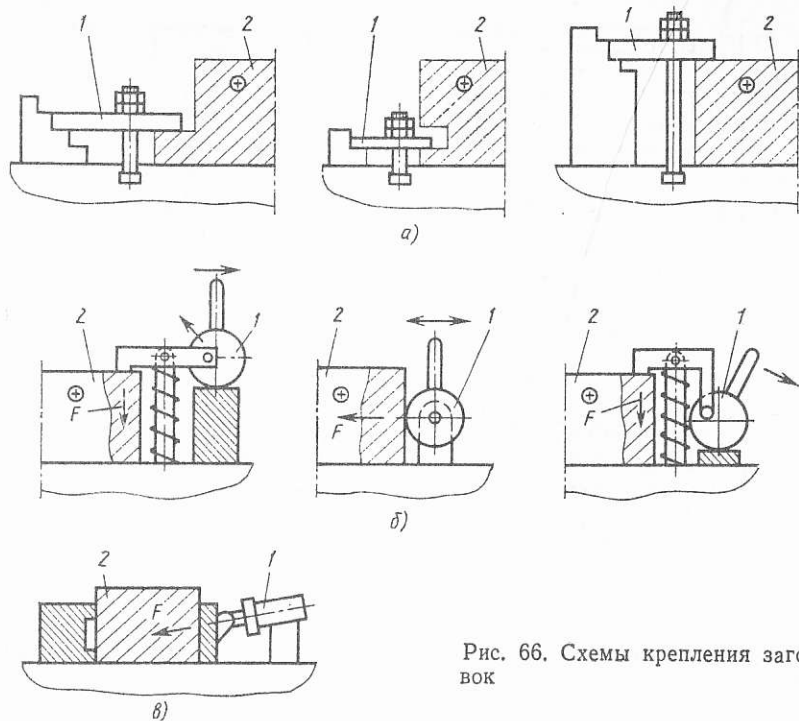


Рис. 66. Схемы крепления заготовок

ется при одинаковых показаниях индикатора 4 на концах базовых поверхностей заготовки. Затем перемещением стола на станке с заготовкой устанавливают размеры  $A$  и  $B$ , отсчитываемые относительно базовых поверхностей заготовки и катода-инструмента.

Рассмотренные способы базирования заготовок целесообразно применять в единичном и мелкосерийном производстве, так как в этих случаях время на установку заготовки относительно велико. Для сокращения вспомогательного времени целесообразно использовать схему, показанную на рис. 65, г. В этом случае заготовку 1 устанавливают в приспособление или на стол станка и перемещают до упоров 2, положение которых заранее выверено относительно базовых поверхностей катода-инструмента. Точность базирования  $\pm 0,1$  мм. Однако большая номенклатура типоразмеров заготовок, различное положение по высоте их базовых поверхностей вызывают затруднения применения этого способа.

Для быстрой переналадки станка при различных типоразмерах заготовок целесообразно осуществлять ее посредством механизированной переустановки базовых упоров на столе станка или в приспособлении.

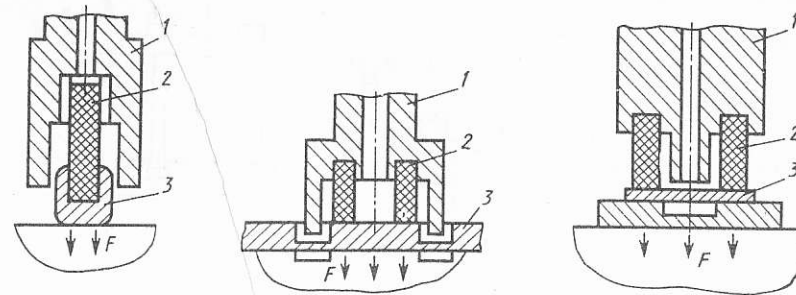


Рис. 67. Схемы крепления заготовок при помощи упругих элементов

При ЭХО штампов, пресс-форм, крупногабаритных заготовок ориентирование и крепление их в большинстве случаев осуществляется непосредственно на столе станка. Устройства для крепления кроме надежной фиксации заготовки в процессе обработки должны обеспечивать плотный контакт между поверхностями заготовки и стола, так как во многих случаях через стол подводится рабочий ток. Крепление заготовок 2 штампов осуществляют с помощью прихватов 1 [72] (рис. 66, а), с помощью эксцентриковых зажимов (рис. 66, б), отличающихся большим быстродействием по сравнению с креплением прихватами, и посредством механизированного зажима 1 (рис. 66, в), например, гидро- или пневмоцилиндра. В этом случае привод целесообразно располагать вне рабочей камеры или, по крайней мере, вне зоны воздействия электрического поля катода-инструмента.

Примеры крепления обрабатываемых заготовок 3, при помощи упругих элементов 2, выполненных в основном из резины, показаны на рис. 67. По мере подачи инструмента 1 упругий элемент сжимается, а так как сжатие не бесконечно, то этот способ целесообразно применять при незначительных глубинах обработки заготовок.

При электрохимической прошивке сквозных отверстий трубчатым электродом-инструментом в конце обработки вследствие перераспределения потока электролита в момент отделения керна от заготовки часто происходят короткое замыкание, повреждение рабочего участка электрода, его изоляции. Поэтому в этот момент необходимо фиксировать керн относительно инструмента.

Фиксирование керна производится одним из способов, показанных на рис. 68.

Фиксирование керна может производиться путем приклеивания к опорной поверхности заготовки 3 прокладки 1, изготовленной из токонепроводящего материала (рис. 68, а). После отделения керна 2 от заготовки прокладка под давлением электролита



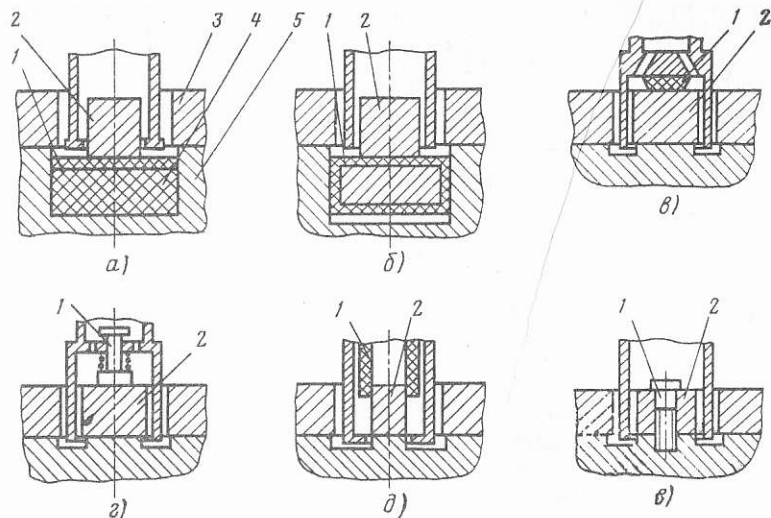


Рис. 68. Способы фиксирования керна при прошивке отверстий

смещается вниз, сжимая опору 4 из губчатой резины, которая установлена в полости подкладки 5. В качестве фиксирующего элемента может использоваться изолированный магнит 1, который также смещается вниз с керном 2 в конечный момент обработки (рис. 68, б). Способ применим только для магнитных металлов.

Фиксирование кернов 2 производится упругими элементами 1, в первом случае резиновым, во втором — подпружиненным (рис. 68, в, г), а также втулкой 2 (рис. 68, д) из токонепроводящего материала.

Рассмотренные способы фиксирования керна целесообразно применять в серийном производстве. В мелкосерийном и единичном при возможности целесообразно фиксирование керна 2 с помощью болта 1 (рис. 68, е).

**Приспособления для ЭХО пера лопаток.** Турбинные лопатки большинства агрегатов являются объектами массового производства. Турбинная лопатка является специфической деталью как по формам обрабатываемых поверхностей, так и по особенностям базирования ее в приспособлении.

При проектировании приспособлений для ЭХО лопаток необходимо учитывать тот факт, что при двусторонней обработке ее профильной части подвод тока осуществляется, как правило, к хвостовой части лопатки, которая имеет фасонный профиль поверхностей, что затрудняет обеспечение плотного контакта токоподвода, или к технологической бобышке. Применение значи-

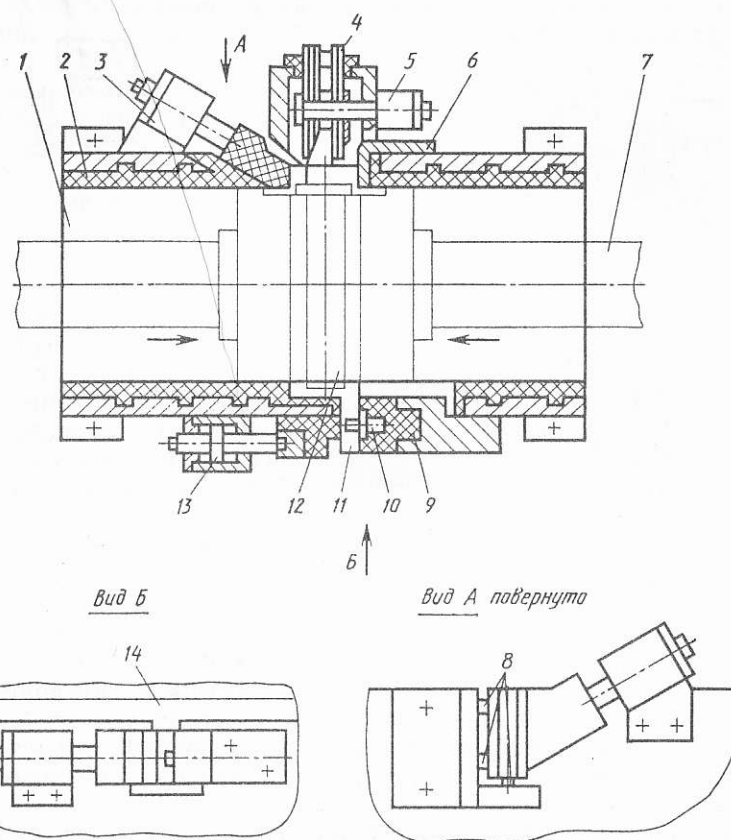


Рис. 69. Приспособление для ЭХО лопаток

тельных сил зажима токоподвода может вызвать деформацию заготовки.

Приспособление для двусторонней ЭХО лопаток с подводом тока к хвостовику (рис. 69) имеет основание 1 П-образного сечения с изоляцией 2 по внутренней поверхности. Заготовку 11 устанавливают хвостовиком на базовые элементы 8 опоры 6, а отверстием бобышки на штифт 10 опоры 9. Закрепление заготовки осуществляют от гидроцилиндров 3 и 13. Подвод тока осуществляют через шины 4 от гидроцилиндра 5. ЭИ 7 перемещают (по стрелкам) в приспособлении с направлением их боковыми стенками 14. Электролит в рабочую зону подают через отверстие 12 в основании.

При обработке лопатки с хвостовиком и бобышкой цилиндрической формы базирование и закрепление заготовки 4 лопат-

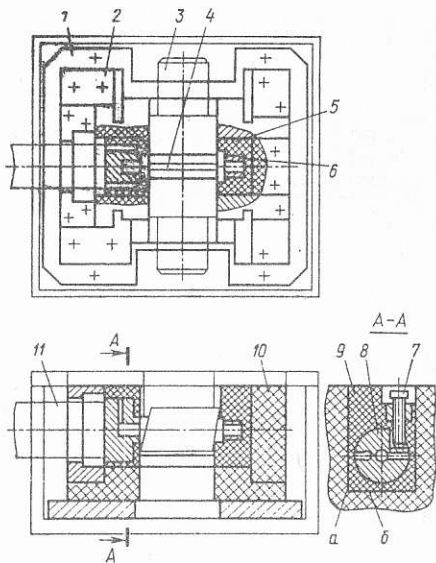


Рис. 70. Приспособление для ЭХО лопаток с предварительно установленными базовыми элементами

Заготовку 4 с базовыми элементами 5 и 9 устанавливают в пазах вкладыша 10. Закрепление заготовки осуществляют штоком 11, который одновременно выполняет функцию токоподвода от гидроцилиндра, установленного вне камеры. Электроды-инструменты 3 перемещаются по направляющим поверхностям вкладыша 10. Электролит подается в рабочую зону через отверстие в плите 1 и сливается через отверстие в камере.

Приспособление-спутник (рис. 71) для окончательной обработки поверхностей радиально расположенных лопаток монолитного ротора имеет плиту 1 с закрепленными стойками 5 и 15. В стойке 15 имеется центр 9, в стойке 5 — посадочное отверстие. На заготовку 10 предварительно устанавливают два диска 4 и 11 из токопроводящего материала для формирования потока электролита в зоне обработки. Диск 4 зафиксирован на заготовке стопорным винтом 12 и является одновременно делительным.

Заготовку ротора 10 с предварительно обработанными радиальными лопатками, на которой закреплены диски, устанавливают на опоры приспособления, базируя на центр 9 и отверстие стойки 5, и закрепляют хомутиком 3. При этом фиксатор делительного устройства 2 входит в одно из отверстий делительного диска 4. Затем приспособление устанавливают на пластины 14 камеры станка, базируя по пальцам 7.

ки в приспособлении (рис. 70) целесообразно производить с помощью установки на нее базовых элементов 5 и 9 вне станка в специальном приспособлении.

Плоскости *a* и *б* элемента 9 сориентированы относительно обрабатываемых поверхностей лопатки. Закрепление элемента 9 осуществляется посредством разрезной металлической втулки 8 и болта 7. Элемент 5 устанавливают на бобышку по скользящей посадке. Для уменьшения износа элемента 5 предусмотрена металлическая втулка 6.

Приспособление имеет плиту 1 со стойками 2, на которых закреплен вкладыш 10 из токопроводящего материала.

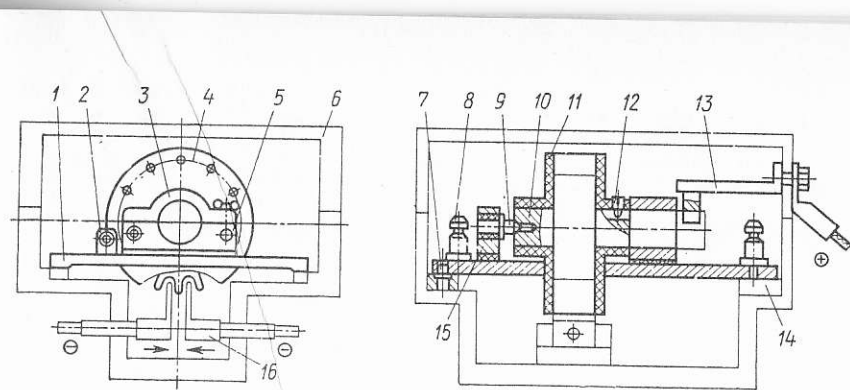


Рис. 71. Приспособление-спутник для ЭХО лопаток монолитного ротора

Подвод тока осуществляется подпружиненным токоподводом 13, закрепленным на крышке 6 камеры. ЭИ 16 подаются (по стрелкам) от привода, расположенного вне камеры.

После обработки одной лопатки процесс прерывается, открывается крышка 6 камеры, заготовку поворачивают на угол деления и процесс повторяется. Для удобства установки приспособления в камеру на нем предусмотрены пальцы 8 для захвата его загрузочным устройством.

**Приспособления для обработки цилиндрических заготовок.** Электрохимическую обработку широко применяют для формообразования поверхностей на деталях типа тел вращения. Обработке подвергают внутренние (в том числе и глубокие отверстия) и наружные поверхности (в том числе на длинномерных тонкостенных трубах). ЭХО цилиндрических поверхностей осуществляют с неподвижным ЭИ и с подвижным электродом. В первом случае электрод или вообще не имеет перемещений относительно заготовки, или имеет только вращательное движение. Во втором — электрод, как правило, имеет вращательное и поступательное движение.

При ЭХО отверстий подвижным электродом базирование его осуществляют по предварительно обработанному отверстию (аналогично схеме развертывания отверстия). При ЭХО неподвижным электродом базирование его осуществляют как по предварительно обработанному отверстию, так и по базовым элементам приспособления.

Приспособление для ЭХО глубоких отверстий (рис. 72) имеет две стойки 8 и 12, установленные на направляющих 10 станка. На заготовку 4 устанавливают по скользящей посадке базовые элементы 2 и 6, закрепляемые болтами 3. Заготовку с базовыми элементами устанавливают на стойки 8 и 12 и закрепляют хомутами 7 и 1 соответственно. В отверстие заготовки вводится ЭИ 5 с элементами, которые базируют электрод по отверстию заготовки.

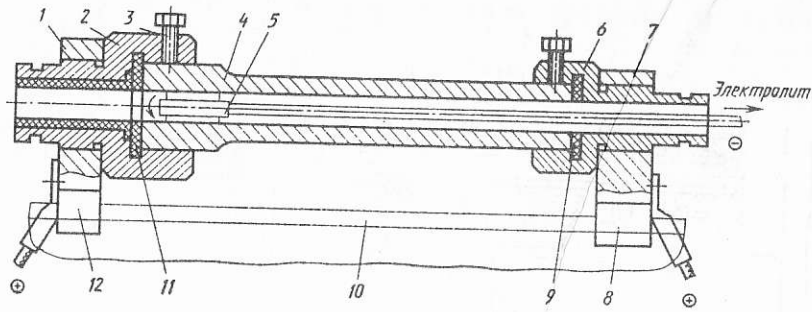


Рис. 72. Приспособление для ЭХО отверстий в заготовке с предварительно установленными базовыми элементами

Электролит подается в зону обработки или через отверстие одного из базовых элементов, или через электрод, а сливается через отверстие другого базового элемента. Для герметизации рабочей зоны предусмотрены уплотнения 9 и 11.

Подвод тока осуществляется через базовые элементы. Обработка производится при поступательном и вращательном движении ЭИ.

Приспособление для ЭХО глубоких отверстий неподвижным ЭИ (рис. 73) имеет основание 1, на котором закреплены две стойки 2 и 13. В стойке 2 установлена неподвижная опора 4, в стойке 13 установлен гидроцилиндр 12 с подвижной опорой 9.

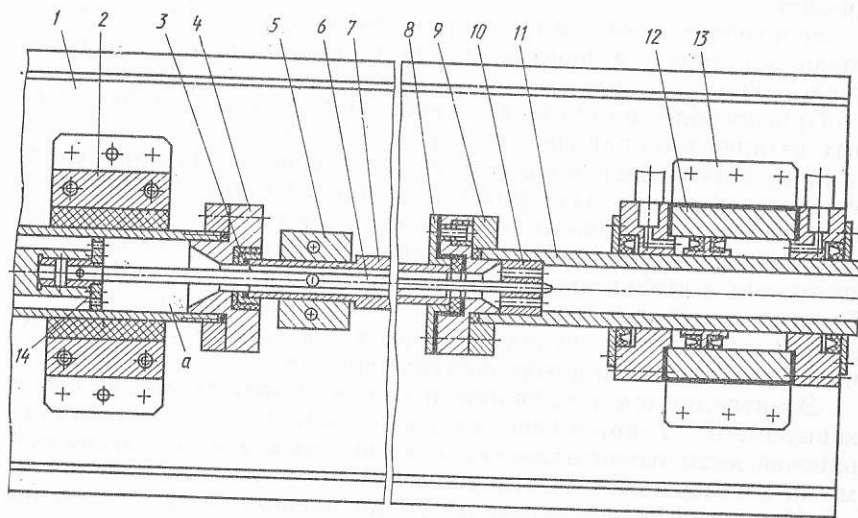


Рис. 73. Приспособление для ЭХО отверстий неподвижным ЭИ

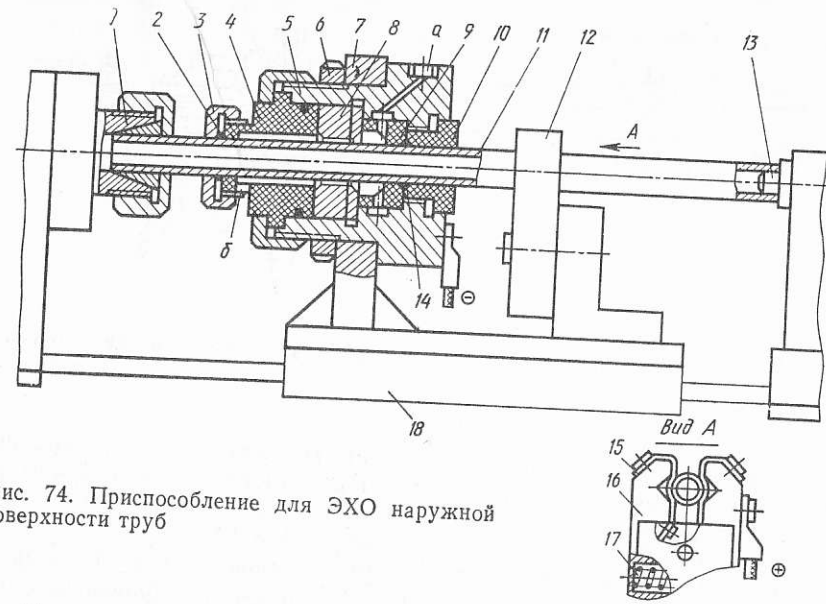


Рис. 74. Приспособление для ЭХО наружной поверхности труб

Заготовку 7 с закрепленным токоподводом 5 устанавливают в базовые отверстия втулок 3 и 8 и зажимают по торцу штоком 11 гидроцилиндра 12.

ЭИ 6 вводят в отверстие заготовки, базируя его по отверстиям втулок 10 и 14, обработанным соосно с базовыми отверстиями опор.

Электролит в зону обработки подводят через полость *a* в неподвижной опоре, а через отверстие в подвижной опоре проходит на слив.

Приспособление для ЭХО наружной поверхности длинномерных деталей цилиндрической формы (рис. 74), например тонкостенных труб, имеет основание 7, установленное на подвижном суппорте 18 станка. На основании 7 гайкой 6 закреплен корпус 5. В корпусе установлены базовые втулки 4 и 9.

Один конец заготовки 11 закрепляют цангой 1 передней бабки станка и второй поддерживает пальцем 13 задней бабки. Базирование заготовки относительно ЭИ 8 осуществляется втулками 4 и 9 приспособления. Базовые отверстия втулок обработаны соосно с рабочей поверхностью катода 8.

Электролит в зону обработки подается через отверстие *a* в корпусе 5 и сливается через отверстие *b* втулки 4. Герметизация рабочей зоны осуществляется уплотнениями 2 и 14, поджимаемыми к поверхности заготовки гайками 3 и 10 соответственно.

Обработка осуществляется при продольном перемещении (в случае необходимости и при вращении заготовки) приспособления вместе с суппортом станка.



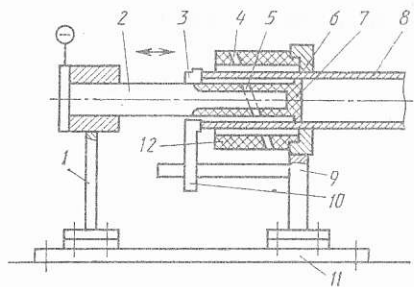


Рис. 75. Приспособление для разрезания тонкостенных труб

для разрезания тонкостенных труб [67] имеет плиту 11 с двумя стойками 1 и 9. Стойка 1 подвижна относительно плиты, стойка 9 неподвижна. В стойках 1 и 9 закреплены соответственно внутренний ЭИ 2, располагаемый внутри заготовки, и электрод 12 с рабочими участками 4 и 5 с формой, соответствующей форме реза.

Заготовку 8 вставляют в отверстие наружного электрода 12, базируя ее по втулке 6 до упора 10. В заготовку путем перемещения стойки 1 до упора 3 вставляют электрод, базируя его по втулке 7 относительно внутренней поверхности трубы.

Электролит подают в зазоры между поверхностями заготовки и электродов инструментов.

**Приспособления для снятия заусенцев.** Процесс снятия заусенцев и притупления кромок электрохимическим методом производится на приспособлениях, являющихся устройствами одноили многоместными, содержащими элементы базирования и крепления заготовок, токоподводящие элементы, каналы для протока электролита, средства герметизации. Многие приспособления для снятия заусенцев содержат и катоды.

Производительность процесса зависит от величины МЭЗ, который определяется размером заусенца, образующегося после

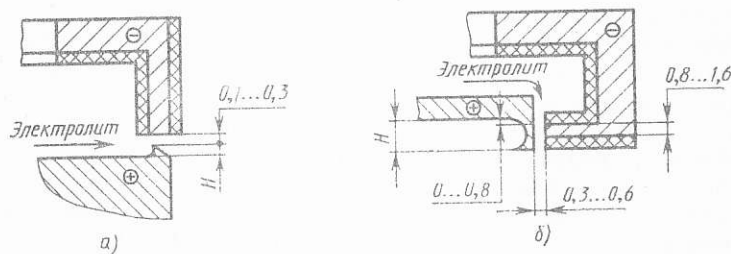


Рис. 76. Схема расположения рабочих элементов катода относительно заусенцев:

а — схема общего травления; б — схема травления под корень заусенца

Для уменьшения падения напряжения на участке от токоподвода до зоны обработки (длина заготовок до 3000 мм) токоподвод 12 выполнен скользящим. Токоподвод состоит из двух рычагов 16, на которых закреплены латунные сетки 15. Рычаги поджимаются пружиной 17, обеспечивая хороший контакт сетки 15 с поверхностью заготовки.

Приспособления (рис. 75) для разрезания тонкостенных

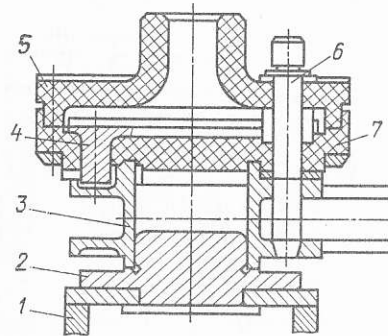


Рис. 77. Приспособление для снятия заусенцев

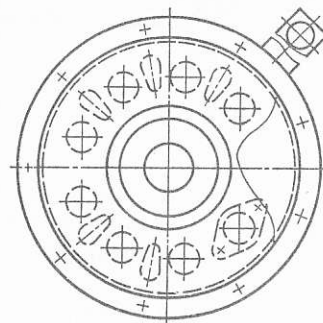
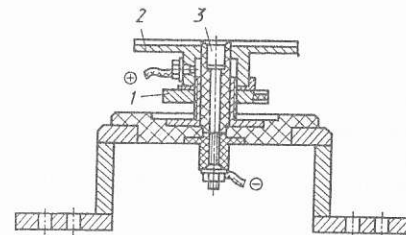


Рис. 78. Универсальное приспособление для установки катодных устройств



механической обработки:  $a = (0,1 \dots 0,3) + H$ , мм, где 0,1...0,3 — дополнительный гарантированный зазор, мм;  $H$  — максимальная высота заусенцев, мм. Следовательно, при большой высоте заусенцев зазор также возрастает и соответственно увеличивается время обработки [22].

Для уменьшения времени обработки используются различные схемы обработки (рис. 76): схема общего травления (рис. 76, а) и схема травления заусенцев под корень (рис. 76, б). При значительном различии высоты заусенцев на одной заготовке производят предварительную деформацию заусенцев перед ЭХО до одной максимальной величины  $H$ . Схему общего травления рекомендуется применять для удаления мелких заусенцев высотой 0,3...1,2 мм; схему травления под корень при большей высоте (до 10 мм) заусенцев. При обработке по последней схеме заусенцы подтравливаются у корня, отваливаются и уносятся электролитом, что позволяет обеспечить высокую производительность, малую энергоемкость. Такая схема является предпочтительной.

Приспособления для снятия заусенцев по конструкции могут быть открытого и закрытого типа. В первых электролит, пройдя через МЭЗ, сливается в рабочую ванну станка. В последнем слу-

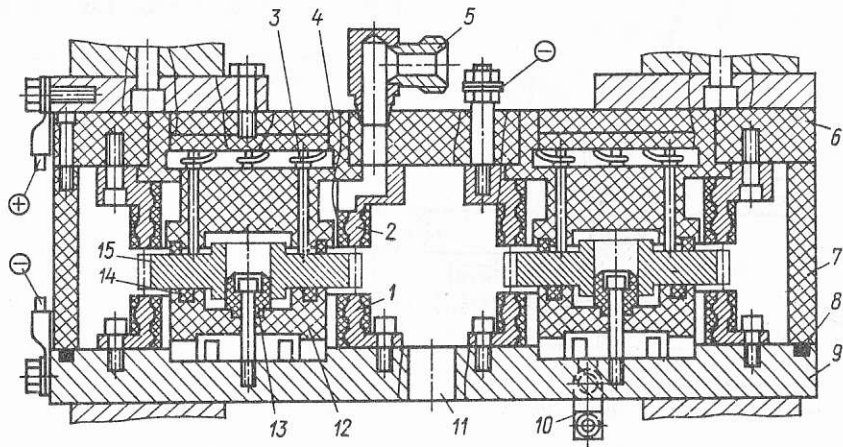


Рис. 79. Приспособление для снятия заусенцев и притупления острых кромок на зубчатых колесах

чае электролит, пройдя через МЭЗ, проходит в ванну через каналы приспособления. При этом образуется подпор электролита, что в большинстве случаев благоприятно сказывается на качестве обработанной поверхности.

Приспособление и катодное устройство для одновременной обработки семи полостей главного шатуна двигателя показано на рис. 77. Шатун устанавливают на базовый фланец 2 приспособления 1. Катодное устройство устанавливают на шатун 3. Для базирования катодного устройства относительно шатуна служат центрирующее кольцо 7 и обойма 5. Фиксатор 6 предназначен для точной установки катодов 4 в полостях шатуна. Обрабатывают одновременно семь полостей сначала с одной стороны, затем после переустановки шатуна и катодного устройства — с другой.

Для установки различных заготовок и катодных устройств служит универсальный столик (рис. 78). Обрабатываемую заготовку с установленным промежуточным элементом на ней центрируют по посадочной втулке 3 и прижимают к столику 2 катодным устройством, закрепленным неподвижно на шпинделе станка. Торцовый МЭЗ устанавливают регулировочной гайкой 1, которая прижата к столику катодным устройством.

Приспособление — катодное устройство для снятия заусенцев высотой 1,2 мм и скругления кромок на зубчатых колесах с двух сторон венца общим травлением — показано на рис. 79 [22].

Устройство закрытого типа, двухместное. Нижняя и верхняя части приспособления состоят из плит 6 и 9, в расточках которых крепятся сменные опоры 4 и 12 с втулками 13, служащими

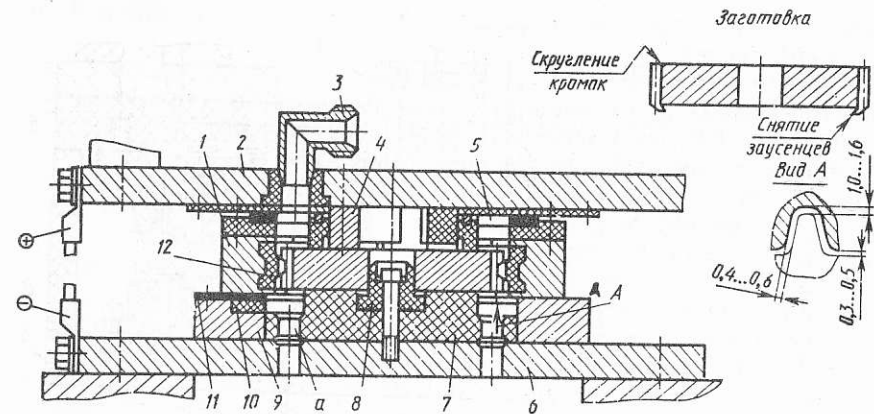


Рис. 80. Приспособление для скругления кромок и снятия заусенцев травлением под корень

для базирования заготовок 15 зубчатых колес. Сменные катоды 1 и 2 также крепятся на плитах. Для увеличения срока службы приспособления в торец опоры запрессовано металлическое кольцо 14. Нерабочие поверхности катода, металлические детали, находящиеся в зоне действия электрического поля при обработке изолированы пластмассой.

МЭЗ со стороны нижнего торца заготовки устанавливается равным наибольшей высоте заусенцев  $H$  плюс минимальный зазор для ЭХО. Зазор со стороны верхнего торца в связи с отсутствием заусенцев устанавливается на 0,3...0,5 мм большим, чем зазор со стороны нижнего торца.

При определении режима ЭХО необходимо учитывать, что зазор со стороны верхнего торца зависит от допуска на ширину венца обрабатываемого зубчатого колеса, так как верхняя часть устройства, опускаясь, упирается кожухом 7 в нижнюю плиту, что определяет постоянную высоту устройства.

Через штуцеры 5, 10 и каналы в плитах электролит подается под опоры и далее по каналам опор попадает в зону обработки. Для слива электролита служит отверстие 11 в плите 9. Герметизация приспособления обеспечивается прокладкой 8 из губчатой резины.

Подвод тока к заготовке и катоду осуществляется соответственно через плиту 6 и токоподводы 3.

Приспособление — катодное устройство (рис. 80) — предназначено для скругления острых кромок и снятия заусенцев высотой 1,2...4 мм на венцах цилиндрических зубчатых колес.

Устройство закрытого типа — одноместное переналаживаемое

мое — состоит из нижней неподвижной, верхней подвижной и съемной частей.

Нижняя часть состоит из плиты 6, опоры 7 с элементом 8 для центрирования и токоподвода 9, который в случае обработки небольших зубчатых колес (диаметром до 80 мм) выполняется жестким, а для колес диаметром свыше 80 мм — податливым (из фольги 11, поджимаемой резиновым кольцом 10). Варианты конструкции токоподводов изображены на правой и левой половинах рисунка соответственно.

Съемная часть имеет зубчатый катод 1, втулку 12 с центрирующим пояском и резиновое кольцо 5 для прижима катода 1 до упора к токоподводу, что обеспечивается при условии, если кольцо 5 будет жестче, чем кольцо 10. Съемная часть устанавливается на заготовку вручную, центрируясь зубчатым пояском на втулке 12 непосредственно по зубчатому венцу заготовки. Для прохода электролита зубчатый поясok на втулке имеет неполный профиль зубьев.

Верхняя часть приспособления крепится к траверсе станка и состоит из плиты 2, на которой закреплен токоподвод 4, обеспечивающий подвод тока к заготовке.

Электролит в приспособление подается через штуцер 3, проходит по каналам, образованным частично срезанными зубьями центрирующего пояска на втулке, и через МЭЗ и отверстие а в опоре 7 поступает на слив.

Съемный зубчатый катод 1 имеет два рабочих участка: нижний — для удаления заусенцев (на нижнем торце заготовки) и верхний для скругления острых кромок (на верхнем торце).

Нижний катодный участок имеет зубчатый профиль для травления заусенцев под корень (вид А), а верхний идентичен нижнему, но расположен выше верхнего торца заготовки на 0,4... 0,8 мм.

Особенностью приспособления (рис. 81) для скругления кромок и снятия заусенцев на венцах цилиндрических зубчатых колес и звездочек (сдвоенных) с двух сторон венца является наличие подпружиненного выталкивателя, который облегчает извлечение заготовок из приспособления, позволяет обходиться без съемных катодов и тем самым сократить вспомогательное время и создать условия для автоматической загрузки заготовок.

Приспособление двухместное, закрытого типа, оно состоит из нижней и верхней частей, закрепляемых соответственно на столе и пиноли станка.

Нижняя часть приспособления состоит из плиты 7, на которой закреплены катоды 8 с втулками 11 и 12 и зубчатыми ориентирующими дисками 6; в отверстиях плиты 7 установлены подпружиненные выталкиватели 10 с колпачками 9.

Верхняя часть приспособления состоит из плиты 1, на кото-

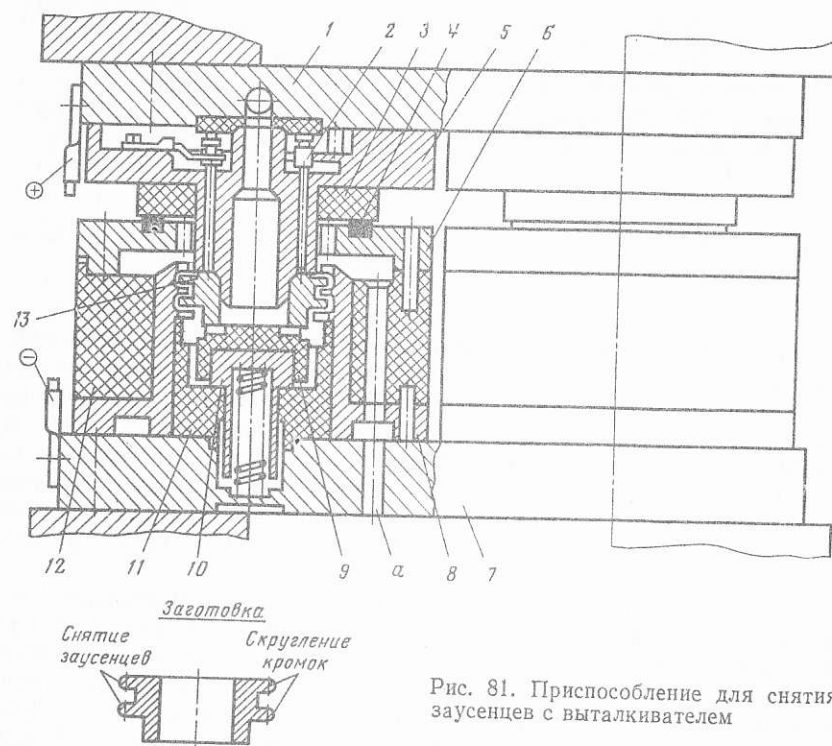


Рис. 81. Приспособление для снятия заусенцев с выталкивателем

рой закреплены фланцы 5 с токоподводами 2 и втулками 3 с уплотнительными кольцами 4.

Фланец 5 обеспечивает базирование заготовок по внутреннему отверстию, а диск 6 — их ориентацию по углу относительно зубчатого катода 8, а также отгибает случайно загнутые или высокие заусенцы. Базирование заготовки 13 по нижнему торцу в осевом направлении и закрепление ее осуществляется колпачком 9 при движении верхней части вниз и упоре буртика выталкивателя в торец расточки втулки 11.

Электролит подается через каналы в плите 1, центральное отверстие фланца 5 и по пазам в колпачках 9 в зону обработки, далее — по отверстиям а во втулках 12 и плите 7 — на слив.

Приспособления для электрохимического маркирования. Электрохимическое маркирование (ЭХМ) производится в проточном и непроточном электролите. Соответственно приспособления для ЭХМ проектируют с учетом этого фактора.

Одним из важных элементов приспособлений для ЭХМ являются трафареты, которые применяют как при проточном, так и при непроточном электролите. Трафарет представляет собой элемент, изготавливаемый из диэлектрических материалов: стекло-



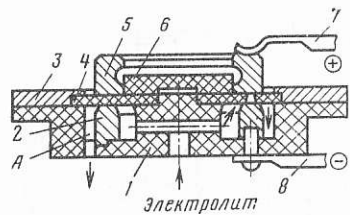


Рис. 82. Приспособление для маркирования колец

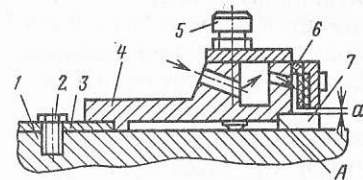


Рис. 83. Приспособление для маркирования линеек

текстолита, полимерных пленок, гетинакса, органического стекла и других диэлектриков, на которых выполнена в виде прорезей наносимая информация. Трафарет выполняет функции установочного элемента, обеспечивая необходимую величину МЭЗ, и инструмента, обеспечивая растворение материала заготовки только в местах прорезей трафарета. При проектировании приспособления с использованием трафарета необходимо обеспечить требующуюся из условий ЭХО величину МЭЗ, равную обычно 0,1...1,0 мм.

При проектировании трафарета необходимо учитывать, что механическая прочность трафарета вследствие наличия прорезей меньше, чем прочность сплошного материала. Прочность трафарета должна составлять не менее 50% прочности сплошного материала. При проектировании трафаретов для маркирования буквенно-цифровой информации товарных знаков, в элементах которых имеются замкнутые площади, например буквы О, Р, цифры 6, 8, 0, необходимо предусматривать перемычки.

Приспособление (рис. 82) [49] для маркирования колец подшипников с использованием трафарета 4 имеет основание 1 с установленным на нем электродом 2, прижимное 3 и базовое 6 из токонепроводящего материала кольца. На трафарете 4 выполнены прорези в соответствии с наносимой информацией.

Заготовку 5 устанавливают на трафарет 4 с опорой на ЭИ 2, центрируя ее по базовому кольцу 6. Рабочий ток подводится через токоподводы 7 и 8. Токоподвод 7 подпружинен. Электролит подается через каналы А между корпусом и электродом.

Приспособление (рис. 83) для маркирования плоских заготовок [34] содержит электромагнитную плиту 1 с закрепленным на ней болтом 2 ЭИ с пружиной 3. ЭИ имеет корпус 4 с каналами для подвода электролита, сборные секции 6 для нанесения буквенно-цифровой информации на обрабатываемую заготовку 7 и пружинные упоры 5 для отвода электрода на необходимое расстояние от плиты.

Заготовку устанавливают на магнитную плиту 1, базируя ее по поверхности А электрода. При подаче напряжения на элект-

ромагнитную плиту электрод притягивается к обрабатываемой заготовке, образуя необходимый рабочий зазор *a* (настроенный предварительно), и закрепляет ее. При отключении напряжения электрод отводится от заготовки пружинными упорами 5.

Особенностью приспособления (рис. 84) для маркирования колец является совмещение элементов базирования и крепления заготовок [2]. Приспособление содержит ванну 9, внутри которой установлен корпус камеры 8 с крышкой 7. На крышке 7 через изолирующую прокладку 6 размещен опорный столик 5, в котором закреплены ЭИ 4 и базовое кольцо 1. Между формообразующей поверхностью ЭИ и опорной поверхностью столика имеется зазор 0,07...0,1 мм.

Заготовку 2 устанавливают на столик 5, центрируя ее по кольцу 1. Крышка 7 поджата пружиной 10 до ограничителя на ванне 9. При этом открыты отверстия А в корпусе камеры 8 и электролит находится внутри камеры.

При подаче воздуха в пневмоцилиндр 3 его шток перемещается и прижимает заготовку 2 к столику. При дальнейшем перемещении штока столик с заготовкой и крышка также перемещаются вниз. Электролит из внутренней полости, образованной поверхностями крышки 7 и корпуса 8, подается в зазор между электродами. Процесс маркирования осуществляется за время перемещения крышки со столиком и заготовкой.

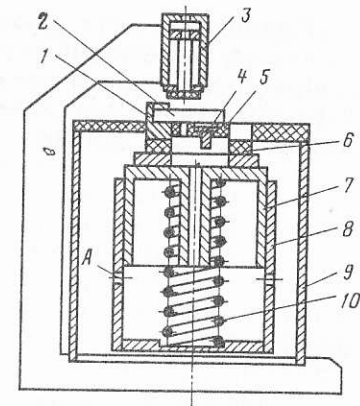


Рис. 84. Приспособление механизированное для маркирования колец

## ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

### ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

К комбинированным методам обработки (КМО) относятся технологические процессы размерного формообразования, совмещающие в едином механизме разрушения слоя-припуска различные виды физико-химических воздействий.

Примерами могут служить следующие широко применяемые сочетания воздействий: электрохимического и механического, электроэрозионного и механического, электроэрозионного и электрохимического, ультразвукового и механического, ультразвукового и электрохимического воздействия и др.

В соответствии с применяемой совокупностью воздействий в промышленности наибольшее применение получили следующие способы комбинированной обработки.

1. Электрохимическая комбинированная обработка — анодно-механическая обработка (шлифование, заточка); алмазно-электрохимическое шлифование (АЭХШ); электрохимическая и ультразвуковая; электроэрозионно-химическая обработка (ЭЭХО).

2. Электроэрозионная комбинированная обработка — алмазно-электроэрозионное шлифование (АЭЭШ), электроконтактно-абразивное резание.

3. Ультразвуковая комбинированная обработка — механическое резание с вводом ультразвуковых колебаний, абразивное шлифование с ультразвуком, нарезание резьбы с вводом ультразвуковых колебаний, суперфиниширование с применением ультразвуковых колебаний.

Применение комбинированных методов обработки обеспечивает повышение как производительности обработки, так и качества деталей, в ряде случаев позволяет значительно увеличить прочность, износостойкость и достигнуть других повышенных эксплуатационных характеристик обрабатываемых деталей.

Основной особенностью и преимуществом КМО является повышенная эффективность по сравнению с отдельными методами, составляющими этот метод комбинированной обработки.

При КМО воздействие двух физических или химических процессов нельзя рассматривать как арифметическую сумму, так как иногда совмещение двух физических воздействий может дать новые технические эффекты, обеспечивающие значительное повышение производительности обработки, стойкости инструмента и качества изготовления детали.

Для этого типа совмещенных процессов их количественные характеристики, а также последовательность действия подбираются таким образом, чтобы они взаимно активизировали друг друга.

Например, при АЭХШ съем металла осуществляется в результате анодного растворения, механического резания алмазными зернами и электроэрозии. Анодное растворение обрабатываемого металла происходит при интенсивной смене электролита в МЭЗ, разрушении пассивных пленок алмазными зернами, при интенсивной активации поверхности растворения. С другой стороны, абразивное микрорезание облегчается из-за разупрочнения поверхностных слоев обрабатываемого металла по причи-

не адсорбционного понижения прочности, окисления металла, в результате избирательного растворения отдельных фаз сплавов.

Помимо этого, АЭХШ сопровождается электроэрозионными и электроконтактными явлениями в МЭЗ, повышающими интенсивность растворения металла, повышающими интенсивности алмазных зерен шлифовального круга.

В итоге АЭХШ твердого сплава обеспечивает повышение производительности в 2,5...3 раза по сравнению с алмазным шлифованием, уменьшение удельного износа алмазных кругов, снижение себестоимости обработки.

При АЭХШ происходит также разупрочнение (предразрушение) снимаемого поверхностного слоя за счет электрических разрядов в МЭП, кроме того, электрические разряды между заготовкой и шлифовальным кругом обеспечивают сгорание микростружек и непрерывную правку круга, поддерживая хороший рельеф рабочей поверхности круга.

По сравнению с обычным алмазным шлифованием при АЭЭШ повышается стойкость кругов в 20—60 раз, снижаются затраты мощности на резание в 1,8—3 раза, можно обрабатывать твердый сплав совместно со сталью [48].

В случае электроэрозионно-химической обработки съем металла происходит в результате анодного растворения и электрической эрозии в результате разрядов в потоке электролита, который прокачивают через МЭП.

Если мгновенное напряжение на МЭП меньше  $U_{пр}$ , то формирование происходит только анодным растворением.

При  $U > U_{пр}$  в месте меньшей электрической прочности МЭП электрически пробивается, образуется канал разряда.

В зоне электродного пятна на обрабатываемой поверхности происходит проплавление металла заготовки, заканчивающееся образованием лунки и выбросом расплава из нее, а вне этой зоны по всей остальной поверхности металл переходит в раствор в ионной форме в результате анодного процесса.

Наиболее эффективным способом повышения производительности ультразвуковой обработки твердых сплавов и других высокопрочных электропроводных материалов является применение ультразвуковой комбинированной обработки, которая заключается в рациональном совмещении ультразвукового механизма съема и электрохимического процесса анодного растворения обрабатываемого металла.

Производительность этого метода для твердых сплавов в 50 раз выше электроэрозионного метода обработки и в 10 раз выше обычной ультразвуковой обработки, причем в 8—10 раз снижается износ инструмента, в 3—5 раз снижается энергоемкость процесса, представляется возможность заменить карбид бора значительно более дешевым абразивом — карбидом кремния [38].

Вследствие одновременного протекания процессов анодного растворения и ультразвуковой обработки облегчаются условия работы абразивных зерен и обеспечивается близкий к 100 %-ному выход по току.

Для твердых сплавов в результате преимущественного растворения кобальтовой связки как электрохимически более активной зерна карбидов вольфрама WC (в случае двухкарбидного твердого сплава также карбидные зерна титана — TiC) обнажаются, прочность их связи с массой сплава уменьшается, что в значительной степени облегчает работу абразивным зернам по выкалыванию карбидных фаз.

При увеличении технологического тока, т. е. при усилении электрохимической стадии процесса, увеличивается число карбидных зерен, полностью освобожденных из массы сплава за счет электрохимического растворения связки.

В то же время при воздействии ультразвука за счет турбулизации электролита в рабочем зазоре уменьшается толщина пограничного диффузного слоя (уменьшается «диффузионное сопротивление» реагирующим ионам), что снижает пассивацию анодной поверхности.

#### КОНСТРУКЦИИ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

При электрохимической комбинированной обработке, такой как анодно-механическая (шлифование, заточка, резка), абразивно- и алмазно-электрохимическая (отрезка, прошивка, шлифование поверхностей), электрохимическая и ультразвуковая (прошивка, отрезка) для ориентирования и закрепления заготовок применяют тиски с плоскими или фасонными губками, плоские и призматические подкладки, магнитные столы, специальные приспособления.

К приспособлениям для комбинированной обработки наряду с требованиями, предъявляемыми к приспособлениям для ЭХО, предъявляются повышенные требования по износостойкости их элементов.

Эти требования обусловлены наличием в электролите абразивных частиц, образующихся в результате износа инструмента (частицы абразива, алмазные зерна) и в результате съема материала (стружка, грат).

На машиностроительных предприятиях все шире используют алмазно-электрохимическое шлифование на плоско- и круглошлифовальных станках как специально выпускаемых промышленностью для АЭХШ, так и обычных шлифовальных станках, модернизированных для АЭХШ.

Схемы способов ориентирования и крепления твердосплавных перетачиваемых пластин на плоскошлифовальном станке

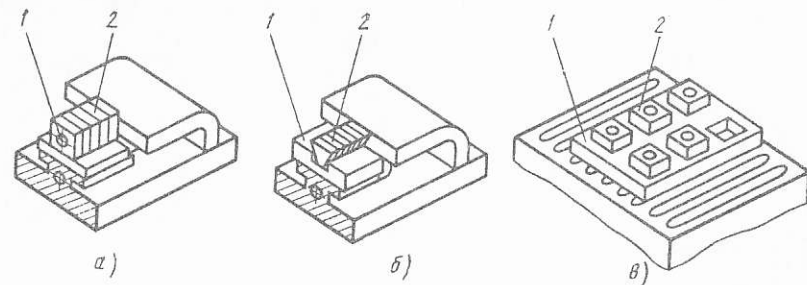


Рис. 85. Схемы ориентирования и крепления пластин

торцом шлифовального круга показаны на рис. 85 [1]. Пластины 2 вначале шлифуют по боковым плоскостям, устанавливая их пакетом на оправку 1 (рис. 85, а) или в специальную призму 1 с профилем, соответствующим профилю пластин (рис. 85, б). Шлифование пластин по передней грани и опорной плоскости производят в специальных кассетах 1 (рис. 85, в) за два перехода. Кассета закреплена на магнитном столе станка.

При АЭХШ наружных цилиндрических поверхностей в значительной мере используются модернизированные круглошлифовальные станки. В этих станках для базирования и закрепления заготовок используют центры, изолированные от станины, используют подвижные токоподводы.

Для изоляции неподвижного заднего центра 1 круглошлифовального станка (рис. 86) нанесен тонкий изоляционный слой 2 из эпоксидной смолы, который после затвердения обтачивается до толщины 0,5...0,8 мм. Центр с изоляционным слоем установлен в переходную втулку 3 и закреплен болтом 5 через изоляционную втулку 6. Такая предварительно напряженная конструкция центра, при определенной силе затяжки болта, позволяет

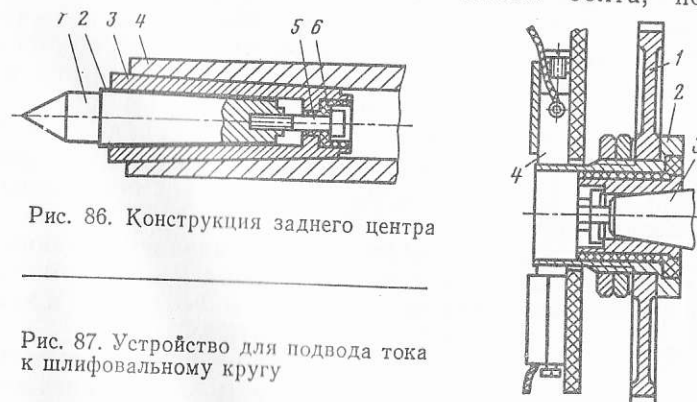


Рис. 86. Конструкция заднего центра

Рис. 87. Устройство для подвода тока к шлифовальному кругу



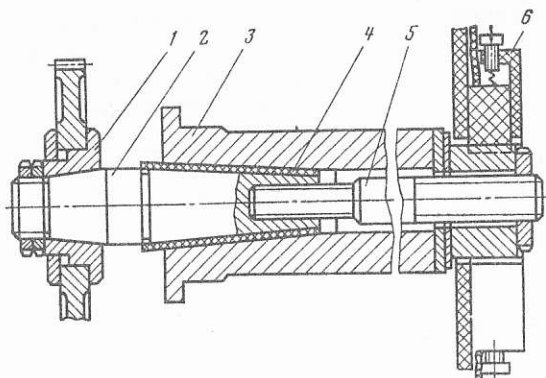


Рис. 88. Устройство для подвода тока к кругу через полый шпиндель

надежно изолировать центр от пиноли 4 станка и максимально уменьшить смещение (вследствие деформации изоляционного слоя).

В устройстве (рис. 87) для подвода тока к шлифовальному кругу инструмент 1 установлен на шпинделе 3 сплошного сечения. Подвод тока осуществляется щетками 4 через втулку 2. Если имеется возможность использовать полый шпиндель 3 целесообразно применить конструкцию, изображенную на рис. 88. Конструкция практически устраняет при определенной силе затяжки шомпола 5 упругие деформации изоляционного слоя 4 конуса 2, на котором установлен круг 1, а также воздействие электролита на токоподвод 6.

Подвод тока к заготовке может осуществляться через передний центр по схеме, аналогичной подводу тока к кругу (см. рис. 88) или через задний центр. Устройство для подвода тока через задний центр 4 (рис. 89) имеет корпус 3, выполненный из токонепроводящего материала, токосъемную шайбу 1, которая поджимается к торцу заготовки под действием силы пружины 2.

Комбинированные методы обработки применяют при отрезке литниковых систем [31]. Приспособление (рис. 90) с ручным быстродействующим зажимом для отрезки литников содержит основание 6, на стойках которого закреплены прямой центр 3 и обратный центр 5. На прямом центре установлены пружина 2 и рукоятка 1.

Заготовку 4 устанавливают одним концом в обратный центр 5 и при помощи рукоятки 1 и пружины 2 базируют и закрепляют прямым центром 3.

Приспособление с пневмозажимом для отрезки литников (рис. 91) содержит основание 6 со стойкой 4. На стойке шар-

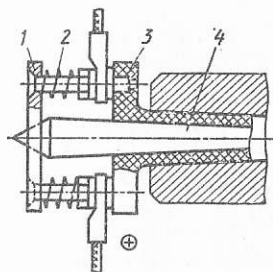


Рис. 89. Устройство для подвода тока к заготовке

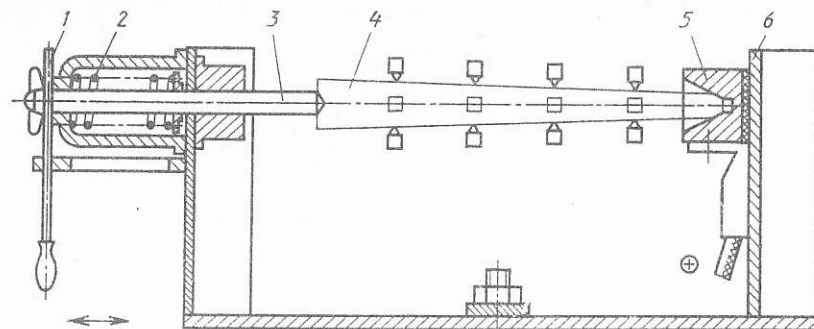


Рис. 90. Приспособление с быстродействующим зажимом для отрезки литников

нирно закреплено коромысло 3 с прижимом 2. На основании закреплен пневмоцилиндр 5.

Заготовку 1 устанавливают на опорную плоскость стойки 4 и закрепляют коромыслом 3 с помощью пневмоцилиндра 5. Для настройки на необходимый типоразмер заготовки прижим 2 предусмотрен быстроотъемным.

Одним из перспективных способов обработки турбинных лопаток из труднообрабатываемых материалов является алмазно-электрохимическое шлифование поверхности при вращении лопатки. Обработка производится периферией круга при вращении лопатки и одновременном согласованном изменении расстояния между центрами вращения круга и лопатки в течение одного оборота и перемещении круга вдоль лопатки на величину подачи каждого оборота лопатки.

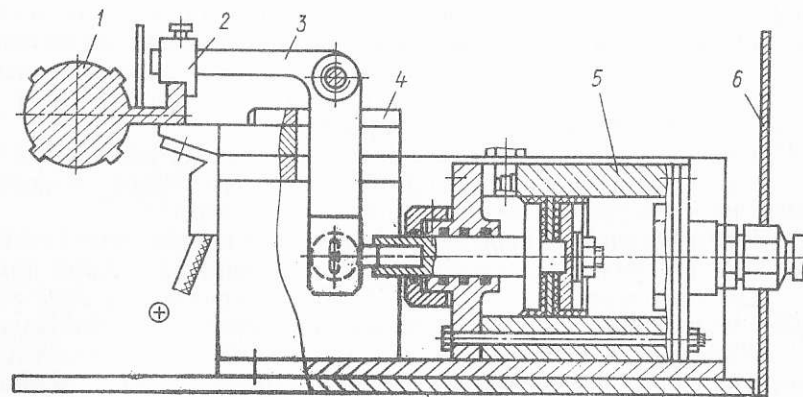


Рис. 91. Приспособление для отрезки литников

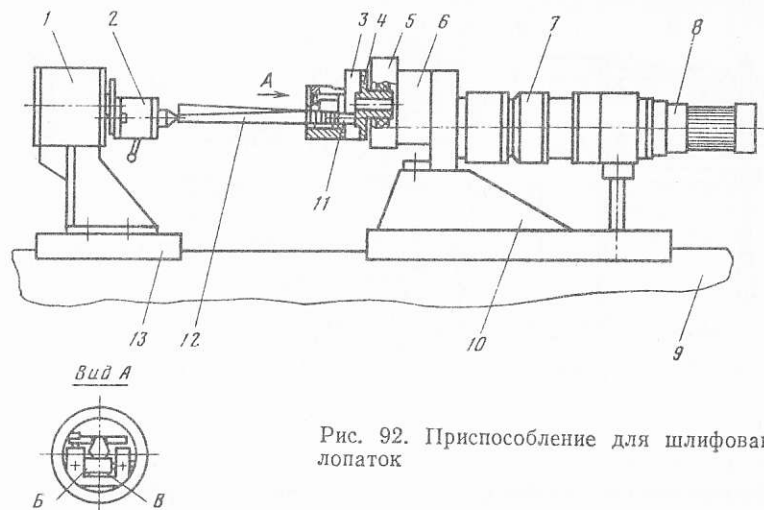


Рис. 92. Приспособление для шлифования лопаток

Приспособление (рис. 92) для шлифования спинки лопатки 12 при ее вращении имеет основание 9 со стойками 10 и 13. На стойке 13 закреплена задняя бабка 1 с подпружиненным центром 2. На стойке 10 установлена передняя бабка. Передняя бабка содержит опору 3, диск 4, токосъемное устройство 5, редуктор 6, гидроусилитель 7 момента вращения и шаговый двигатель 8, установленные последовательно.

Обработка спинки лопатки производится при вращении ее вокруг оси, причем хвостовик лопатки смещен относительно оси вращения на величину, зависящую от профиля обрабатываемой поверхности и угла закрутки профиля.

Смещение хвостовика лопатки производится посредством поворота опоры 3 относительно диска 4 на оси 11, которая установлена эксцентрично относительно оси диска. Заготовку базируют по плоскостям Б, В хвостовика в опоре 3 и по центральному отверстию центром 2, пружина центра поджимает лопатку к опоре. Закрепляют заготовку хомутом опоры.

Вращение заготовки, изменение межцентровых расстояний и продольное перемещение приспособления с заготовкой относительно круга осуществляется с помощью системы ЧПУ.

В заготовительном производстве используют приспособление (рис. 93) для разрезания прутков на заготовки различной длины. Приспособление [А. с. 372050 (СССР)] выполнено в виде ротора 3, состоящего из ряда отдельных ободов 13, установленных на валу 14. Вал закреплен в основании 1. Для закрепления заготовок прутков 4 вдоль образующих ротора во всех ободах 13 имеются окна 2, образуемые в радиальном направлении наружным 6 и внутренним 8 кольцами и в угловом направлении

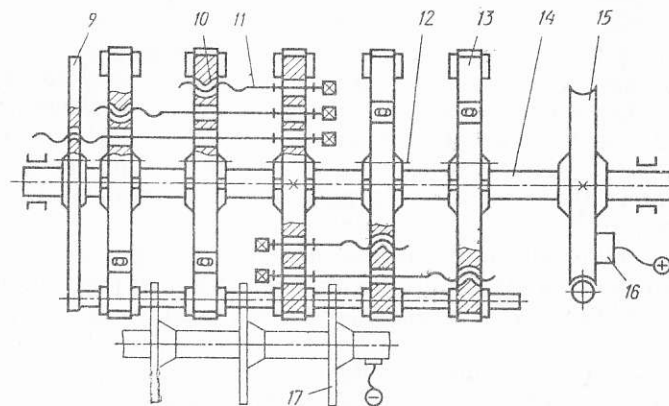
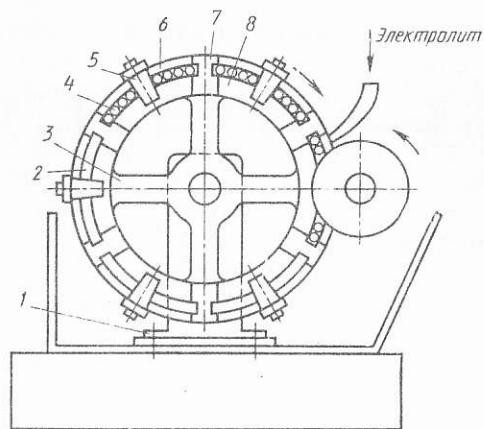


Рис. 93. Приспособление для резки прутков

упорами 7. Обод 13 и упорный диск 9 имеют возможность перемещаться вдоль вала 14 с помощью скользящей шпонки 12 винта 11 и прикрепленной к ободам гайки 10.

Ротор получает рабочее и ускоренное вращение от привода через червячную пару 15. Закрепление прутков осуществляется клиновым устройством 5, состоящим из болта и клина с двойным скосом.

Подвод тока к ротору осуществляется через щетки 16. Отрезку заготовок осуществляют при вращении ротора приспособления со скоростью, соответствующей рабочей подаче. Настройка на различную длину производится установкой дисков-катодов 17 по длине шпинделя.

При такой компоновке приспособления основное (технологическое) время позволяет перекрыть вспомогательное время установки заготовок. Закрепление прутков клиновым устройством в значительной степени устраняет отклонение от прямолинейности прутков.

**Приспособление для ультразвукового резбонарезания.** Эффективность действия ультразвука на процесс резбонарезания зависит от многих факторов: от амплитуды, частоты, направления вектора ультразвуковых колебаний, от физико-механических и теплофизических параметров материала метчика и обрабатываемого материала, от режимов нарезания.

Ультразвуковая интенсификация резбонарезания и инструмент-концентратор для реализации этого процесса описаны выше, ниже приводится описание приспособления для ультразвукового резбонарезания.

Для нарезания внутренних резьб с применением ультразвуковых колебаний в деталях из маломагнитной стали и титанового сплава ВТ10 в производственных условиях модернизировать вертикально-сверлильный станок 2Н125Л в соответствии с результатами выполненных исследований по определению оптимальных параметров ультразвуковой интенсификации. При модернизации к шпинделю станка закрепляется магнотриксционный преобразователь, сообщающий ультразвуковые колебания метчику.

Охлаждение колебательной системы осуществляется СОЖ, которая подается в полость шпинделя, в магнотриксционный преобразователь, откуда затем подается в зону нарезания резьбы.

Приспособление состоит из верхней 1 и нижней 2 плит, между которыми находится крестовина 3 с четырьмя вкладышами 7 (рис. 94). Каждый вкладыш 7 имеет два взаимноперпендикулярных паза, в которых перекатываются шарики 8 и 9, контактирующие со вставками 12 в верхней и нижней плитах.

Таким образом, верхняя плита с закрепляемой на ней заготовкой имеет две степени свободы перемещений вдоль осей X и Y. Вертикальное перемещение верхней части плиты ограничивается стойкой 5, закрываемой крышкой 4, а возможные перемещения вдоль осей X и Y определяются зазором  $\delta$  между штифтом 6 и стенками паза в крестовине 3. Подвижные части приспособления закрыты кожухом 11, крепление приспособления на столе станка производится посредством двух пластин 10.

Заготовка, в которой нарезается резьба, крепится на верхней плите и благодаря двум степеням свободы отверстием самоустанавливается по метчику, при этом значительно снижается вероятность заклинивания метчика в нарезаемом отверстии и его поломки.

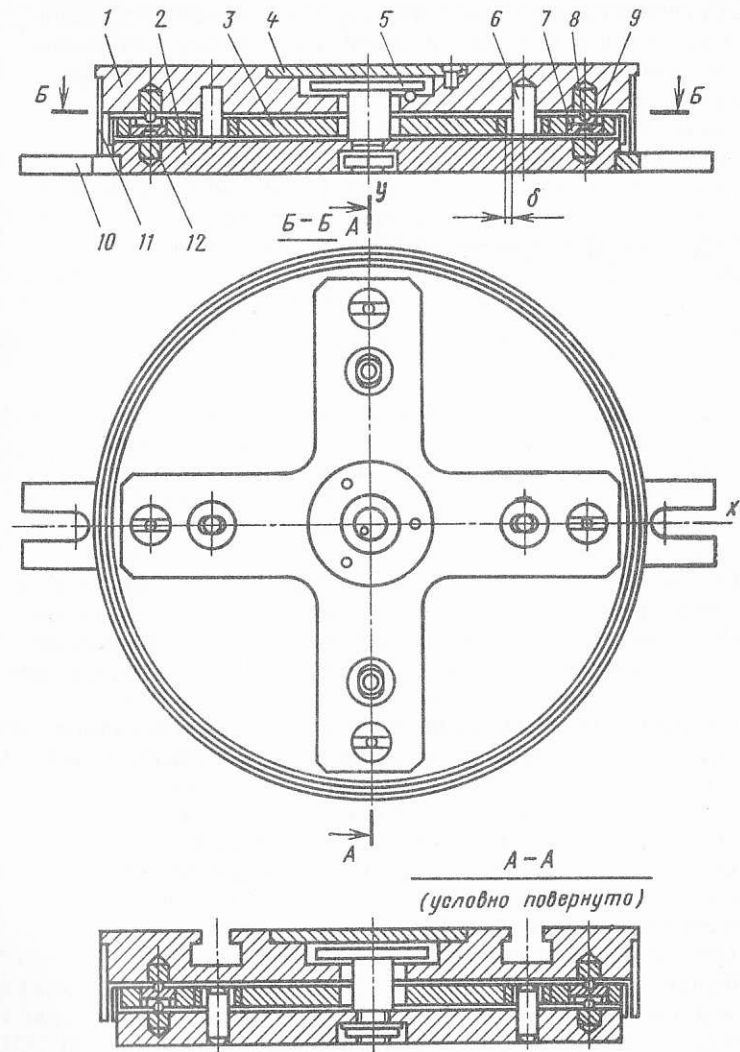


Рис. 94. Приспособление для ультразвукового резбонарезания

Самоустанавливание детали в процессе нарезания резьбы особенно важно при сообщении лезвиям метчика ультразвуковых колебаний, когда возникают ударные усилия со стороны режущих кромок на обрабатываемую поверхность и при наличии перекосов возникают ударные изгибные моменты, приводящие к поломке метчика.



Обеспечение двух степеней свободы обрабатываемой детали при нарезании с применением ультразвуковых колебаний определило высокую эксплуатационную надежность процесса резьбонарезания.

Большое значение для предотвращения поломки метчиков при резьбонарезании имеет электромагнитная муфта, включенная в кинематическую цепь привода вращения шпинделя с магнитоострикционным преобразователем и метчиком. Электромагнитная муфта в зависимости от тока, протекающего по ее обмотке, может передавать больший или меньший крутящий момент. При превышении крутящего момента при ультразвуковом резьбонарезании больше установленной величины электромагнитная муфта разрывает кинематическую цепь от электродвигателя к шпинделю сверлильного станка.

Модернизированный вертикально-сверлильный станок 2Н125 и описанное выше приспособление для ультразвукового резьбонарезания внедрены в производство.

Нарезание резьб с применением ультразвуковых колебаний в заготовках из маломангнитной стали и титановых сплавов позволило:

- механизировать процесс резьбонарезания, заменить ручное резьбонарезание четырьмя метчиками механизированным резьбонарезанием в полуавтоматическом цикле (применение конечных выключателей, дающих реверс на обратное вращение метчику для вывертывания его);

- отказаться от использования в качестве смазывающей жидкости токсичной олеиновой кислоты и применить обычную эмульсию;

- снизить шероховатость резьбовой поверхности с  $Ra=6 \dots 4$  мкм до  $Ra=2,5 \dots 1,25$  мкм, устранить вырывы, характерные для обычного процесса резьбонарезания без применения ультразвуковых колебаний;

- повысить стойкость метчиков в 3—4 раза.

**Приспособление для электрохимико-ультразвукового шлифования.** При ультразвуковом шлифовании в отличие от шлифования абразивными кругами не возникает концентрации высоких тепловых воздействий на обрабатываемую заготовку, вследствие чего исключаются возможности изменения закалочной структуры и возникновения прижогов, микротрещин, получается высококачественный в результате наклепа поверхностный слой.

Для обработки деталей с покрытиями с высоким содержанием упрочняющих фаз — карбидов хрома, наносимых газотермическим или плазменным напылением, разработано приспособление и ЭИ (см. рис. 12). Схема приспособления и циклограммы его работы приведены на рис. 95.

Обрабатываемая заготовка 3 (рис. 95, а) закреплена на столе 1, совершающем возвратно-поступательные перемещения в

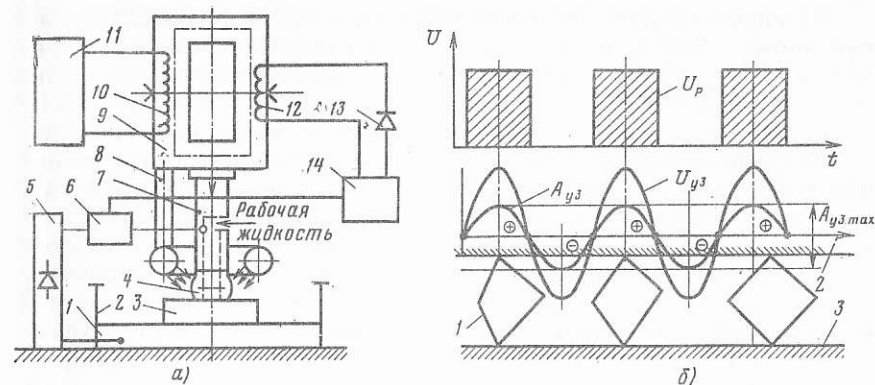


Рис. 95. Приспособление для электрохимико-ультразвукового шлифования: а — схема; б — циклограмма работы;  $A_{yz \max}$  — амплитуда колебаний торца ЭИ;  $U_{yz}$  — напряжение ультразвуковой частоты;  $U_p$  — импульсы рабочего напряжения

рабочей камере 2. ЭИ 4 прикреплен к концентратору-волноводу 7. Магнитоострикционный преобразователь 9 содержит обмотку 10, которая подсоединена к ультразвуковому генератору 11. Рабочую жидкость, представляющую собой раствор электролита со взвешенными в нем абразивными зернами, подают в рабочий зазор между торцом ЭИ и обрабатываемой заготовкой методом полива через коллектор 8 или под давлением.

Инструмент 4 прижимают к обрабатываемой заготовке 3 с определенной силой. Магнитоострикционный преобразователь 9 содержит дополнительную обмотку 12, напряжение на которой посредством блока 14 и ключа 6 управляет подачей технологических импульсов от источника технологического тока 5. Диод 13 отсекает отрицательную полуволну синусоидального напряжения ультразвуковой частоты.

Ультразвуковое шлифование осуществляют следующим образом: при пропускании по обмотке 10 магнитоострикционного преобразователя 9 тока ультразвукового генератора ЭИ совершает ультразвуковые колебания с частотой  $20 \dots 22$  кГц и амплитудой  $10 \dots 40$  мкм.

Магнитоострикционный преобразователь работает в режиме резонанса  $f_{эл} = f_{мех}$ , т. е. частота электрического тока равна частоте собственных механических колебаний преобразователя, при этом механические колебания инструмента и изменение силы тока, протекающего по обмотке магнитоострикционного преобразователя, совпадают по фазе (см. рис. 95, б). За время фазы удлинения ЭИ от начального положения торец ЭИ 2 ударяет по абразивным зернам 1, находящимся на поверхности обрабатываемой заготовки 3, при этом происходит выкалывание частиц обрабатываемого металла.

За время сжатия ЭИ и последующего его восстановления до исходного положения, обусловленного ультразвуковыми колебаниями ЭИ, на МЭП подают импульс технологического тока длительностью, равной половине периода механических колебаний торца ЭИ, или импульс несколько меньшей длительности. Подачу импульсов технологического тока осуществляют следующим образом: положительная полуволна напряжения ультразвуковой частоты на дополнительной обмотке 12, соответствующая фазе укорочения электрода-инструмента и последующего удлинения до исходного положения, через блок 14 открывает транзисторный ключ 6 и от источника технологического тока 5 проходит рабочий импульс тока, осуществляющий электрохимическое растворение обрабатываемой заготовки.

Отрицательная полуволна напряжения на обмотке 12, соответствующая фазе удлинения и последующего укорочения ЭИ до начального положения, отсекается диодом 13.

За время отрицательной полуволны производится ультразвуковая обработка.

Разработанное приспособление для электрохимико-ультразвукового шлифования можно также применять для обработки цилиндрических деталей.

Рассмотренное приспособление целесообразно применять для обработки плазменно-напыленных заготовок, когда напыленный слой характеризуется значительной структурной неоднородностью, пористостью, содержит компоненты повышенной хрупкости и твердости, в частности для обработки восстановленных плазменным напылением деталей автомобилей и тракторов, а также других деталей, плазменно-напыленных для повышения износостойкости, жаростойкости и термостойкости, когда обработка обычным шлифованием невозможна в связи с образованием характерных «вырывов» с обрабатываемого поверхностного слоя, например при обработке покрытия с повышенным содержанием карбида хрома. Образование «вырывов» объясняется микроструктурой покрытий, содержащей две фазы: первая фаза представляет собой карбиды хрома  $Cr_3C_2$ , отличающиеся тугоплавкостью, высокой твердостью и хрупкостью; вторая фаза — матрица покрытий — является твердым раствором хрома в никеле, она имеет значительно меньшую твердость и прочность [20].

При прохождении импульсов технологического тока происходит преимущественное электрохимическое растворение матрицы покрытия как электрохимически более активной, а зерна карбидов и боридов хрома начинают выступать над обрабатываемой поверхностью, их прочность связи с массой заготовки уменьшается и требуется меньших механических импульсов для их выколов механизмом ультразвуковой обработки. Поэтому произво-

дительность увеличивается в 2...2,5 раза, относительный износ инструмента уменьшается в 1,5...2 раза.

Поскольку облегчается процесс ультразвукового съема, то можно при обработке по разработанному способу применять абразивные зерна меньшей твердости, вместо дорогого и дефицитного карбида бора можно применять карбид кремния [21].

Приспособление (см. рис. 96) для электрохимико-ультразвукового шлифования, созданное на базе ультразвуковых головок, разработанных в СПКТБЭО (г. Ленинград), прикрепляют к хоботу плоскошлифовальной станка ЗГ71, вращение шпинделя приспособления осуществляется от электродвигателя через ременную передачу.

Для электропитания ультразвукового преобразователя приспособления использован ультразвуковой генератор УЗГ5-1, 6/22, который устанавливается рядом со станком ЗГ71. Приспособление имеет полый шпиндель 1, выполненный в виде сварной гильзы и вращающейся в сварном стальном корпусе 2 на подшипниках 3, 10.

К нижнему фланцу шпинделя через изолирующее кольцо 7 закрепляется магнитоотрицательный преобразователь 11. Охлаждение преобразователя осуществляется водопроводной водой, подаваемой в полость шпинделя через распределитель 4, представляющий собой систему концентрических патрубков.

Подвод электропитания к магнитоотрицательному преобразователю осуществляется посредством щеток 5 и коллектора. Щеточное устройство смонтировано в корпусе головки, а токосъемники коллектора — на вращающемся шпинделе.

Специальный инструмент 9 представляет собой ступенчатый концентратор с винтовыми канавками (см. рис. 12), предназначенными для создания продольно-крутильных колебаний.

Если нижнюю часть инструмента шаржировать абразивом, например алмазным порошком, то разработанное приспособле-

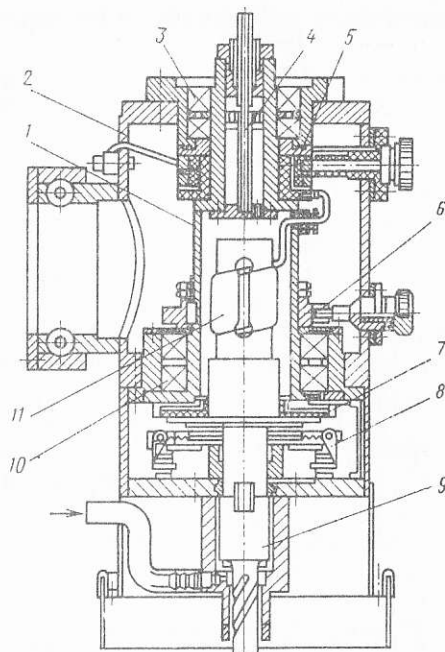


Рис. 96. Приспособление для электрохимико-ультразвукового шлифования

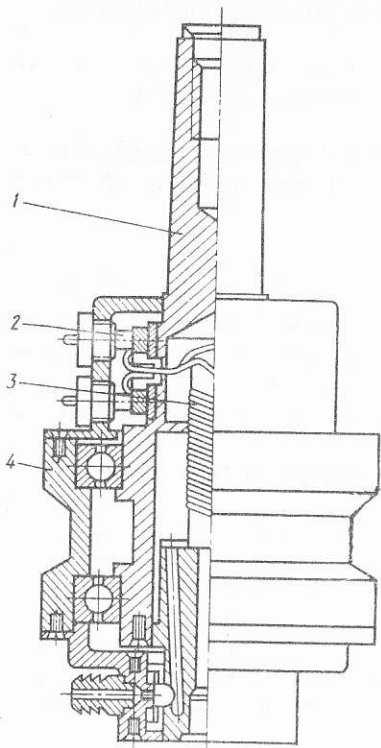


Рис. 97. Универсальное приспособление для механообработки с ультразвуком

фрезерования, ультразвукового сверления глухих и сквозных отверстий.

Производительность ультразвукового фрезерования возрастает с увеличением частоты вращения инструмента ( $n \leq 17 \text{ с}^{-1}$ ), при увеличении амплитуды ультразвуковых колебаний в пределах  $A \leq 15 \text{ мкм}$  производительность увеличивается в 2,5 ... 3 раза.

Приспособление (рис. 97) с магнитоотрицательным преобразователем 3 для ультразвукового алмазного сверления [38] можно использовать на различных металлорежущих станках — сверлильных, фрезерных, расточных. Приспособление имеет подвижный 1 и неподвижный 4 корпус; внутри подвижного корпуса расположен магнитоотрицательный преобразователь. Возможно применение также пьезоэлектрического преобразователя, который более удобен, так как не требует водяного охлаждения. Охлаждение магнитоотрицательного преобразователя осу-

ществляется эмульсией, применяемой на станке, или водопроводной водой.

Подвод электрического тока к обмотке преобразователя от ультразвукового генератора осуществляется с помощью щеток 2.

В процессе обработки неподвижный корпус закрепляется, способ крепления определяется конструкцией металлорежущего станка.

Обработка плазменно-напыленных деталей может осуществляться как чисто ультразвуковым способом, так и комбинированным электрохимикоультразвуковым способом с подачей технологического тока с помощью токоподвода 8. Возможна также обработка неврещающимся инструментом, что происходит при положении фиксатора 6, показанном на рис. 96 (чтобы инструмент вращался, фиксатор 6 необходимо вывести из паза кольца).

**Универсальное приспособление для ультразвуковой интенсификации процесса резания.** При обработке деталей из твердых неметаллических материалов наиболее эффективными являются процессы ультразвукового алмазного

сверления, ультразвукового фрезерования, ультразвукового сверления глухих и сквозных отверстий.

Подвод электрического тока к обмотке преобразователя от ультразвукового генератора осуществляется с помощью щеток 2.

В процессе обработки неподвижный корпус закрепляется, способ крепления определяется конструкцией металлорежущего станка.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ И НОРМАЛИЗАЦИЯ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

### МЕХАНИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Мощными рычагами интенсификации производства являются механизация и автоматизация технологических процессов и в том числе станочных приспособлений.

Частично автоматизируют следующие работы: загрузку заготовок в рабочую зону приспособления; закрепление и открепление заготовок; фиксацию и крепление поворотных частей приспособлений; съем и выталкивание заготовок после обработки; контроль заготовок в процессе обработки.

В автоматических приспособлениях все приемы, начиная от загрузки и базирования и кончая съемом обработанных деталей, производятся без участия рабочего. В полуавтоматических — автоматизируется только часть приемов.

В области электрообработки значительное число приспособлений является механизированным. В настоящее время решается задача автоматизации процессов электрообработки, создания роботизированных электротехнологических комплексов, переход от применения узкоспециализированных электрофизических и электрохимических станков к применению гибких производственных систем. В разработанных гибких производственных системах для ЭЭО турбинных лопаток и штампов используются автоматизированные приспособления для закрепления и базирования приспособлений-спутников с заготовками и ЭИ. Использование для транспортирования и установки на станке ЭИ таких же приспособлений-спутников, как и для заготовок, позволило унифицировать захватные устройства транспортных средств (промышленных роботов, манипуляторов) для доставки заготовок и ЭИ, а также установочные приспособления станков.

Ведутся работы по созданию автоматизированных приспособлений и для электрохимической обработки.



В инструментальных цехах при обработке полостей штампов, пресс-форм в течение одной рабочей смены производится несколько наладок станков. От быстроты наладивания во многом зависит производительность оборудования. Базирование с помощью штифтов, индикаторов и упоров и закрепление прихватами связано с значительными затратами времени на эти вспомогательные операции.

Для сокращения времени наладивания, что особенно важно при встраивании электрохимических станков в гибкие производственные системы, необходимо использовать устройства, позволяющие осуществлять автоматические перемещения баз в зависимости от размеров заготовки и расположения на ней базовых поверхностей, а также автоматическое закрепление ее.

Устройство (рис. 98) автоматического базирования и крепления заготовок штампов и пресс-форм размером от  $200 \times 200 \times 200$  до  $750 \times 750 \times 400$  мм имеет три подвижные базы и механизм крепления заготовок на столе.

Механизмы (одинаковой конструкции) перемещения баз содержат раму 23 с электрогидравлическими шаговыми приводами (ЭГШП) 2 и 3, редуктор 4 и перемещающиеся базы 6 и 16.

Механизм закрепления заготовки содержит раму 24 с поперечиной 11, прихватами 10 и 12 и ЭГШП, аналогичными приводам баз.

Заготовка 1 загрузочным устройством досылается до баз 6 и 16, ранее установленных на необходимый размер путем перемещения их по направляющим 18 каретки. Перемещение осуществляется ЭГШП 3, вращение от которого через червячный редуктор 4 передается на ходовой винт, перемещающий гайку, жестко соединенную с базой 6. ЭГШП и червячный редуктор жестко соединены с верхней кареткой 19. Для вывода базы за пределы камеры после установки заготовок верхняя каретка перемещается по направляющим 5 нижней каретки 21 с помощью гидроцилиндра 20. Корпус гидроцилиндра жестко соединен с кареткой 19, он же воспринимает силу, с которой заготовка прижимается к базе.

Вертикальное перемещение базы обеспечивается перемещением каретки 21 по вертикальным направляющим 22. Это перемещение осуществляет ЭГШП через передачу винт — гайка.

Закрепление заготовки осуществляется двумя прихватами 10 и 12, на которые воздействует гидроцилиндр 17, через поперечину 11, перемещающуюся по вертикальным направляющим 9 и 13. Прихваты перемещаются по поперечине под воздействием упоров 8 и 15, установленных на базах. Таким образом производится их установка на размер заготовки.

После обработки прихваты раздвигаются гидроцилиндрами 7 и 14 и заготовка загрузочным устройством снимается со стола станка.

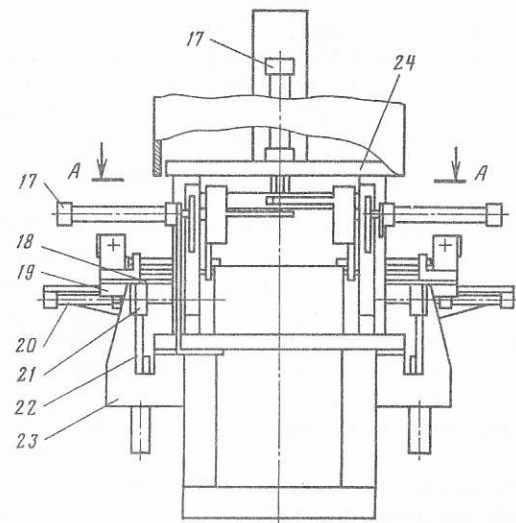
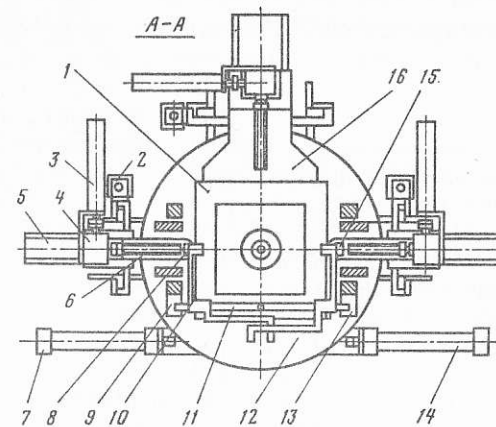


Рис. 98. Устройство для автоматического базирования и закрепления заготовок

Все переходы по базированию и закреплению заготовок могут производиться с управлением от ЭВМ.

В современных электрохимических копировально-прошивочных станках преобладает вертикальная компоновка. Однако у станков с вертикальной компоновкой ограничены размеры и более сложная траектория загрузки заготовок, затрудняющая использование транспортных средств. Для устранения этого недостатка в ряде станков вертикального исполнения предусматривается перемещение рабочего стола на загрузочную позицию,

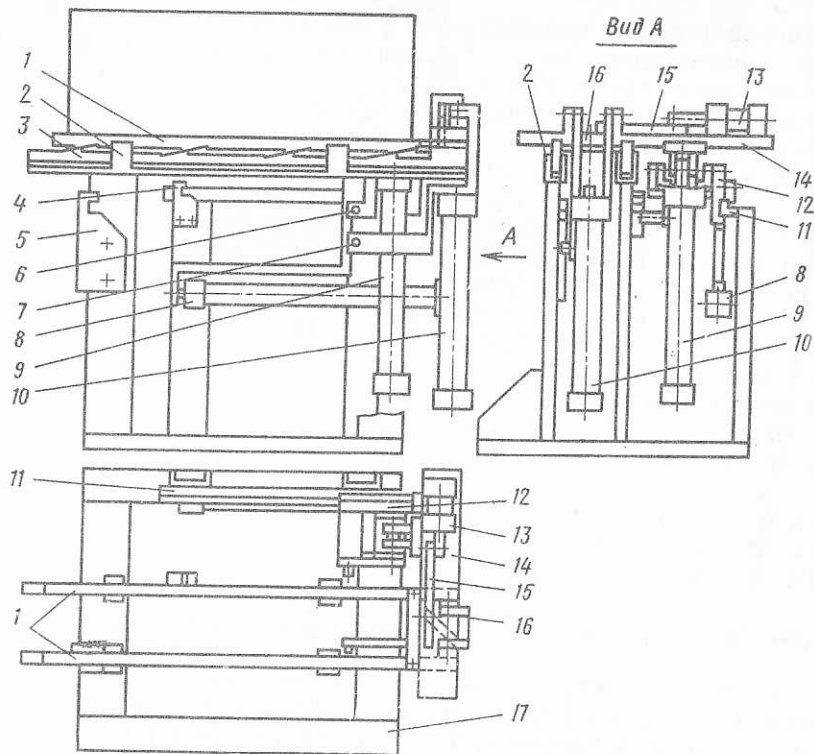


Рис. 99. Устройство для загрузки заготовок на копировально-прошивочный станок

осуществляемое либо по поперечным, либо по продольным направлениям

Для облегчения установки и снятия заготовки целесообразно применять специальные загрузочные устройства, которые при необходимости могут стыковаться со станком.

Устройство (рис. 99) для загрузки заготовок размером от  $200 \times 200 \times 200$  до  $750 \times 750 \times 400$  мм имеет основание 17, на котором установлены направляющие 2 и 11 и механизм перемещения заготовки. Механизм перемещения состоит из двух линеек 3, двух планок 1 и гидроцилиндров 8, 9 и 10, приводящим их в движение при загрузке, а также гидроцилиндра 13, осуществляющего взаимное смещение планок и линеек.

Заготовка ставится на планки 1, которые расположены на двух линейках 3. На планках и линейках имеются скосы, которые позволяют при взаимном смещении планки на 40 мм одновременно сместить ей на 5 мм вертикально для превышения нижнего торца заготовки над торцом стола станка. Смещение

осуществляется гидроцилиндром 13, корпус которого через планку 14 жестко соединен с линейками, а шток через тягу 15 воздействует на поперечину 16, жестко соединенную с планками 1.

Линейки перемещаются в направляющих 2 и далее по пазам столов 8 и 9. Шток гидроцилиндра 9 шарнирно соединен с кареткой 12, которая перемещается по направляющей 11 под действием гидроцилиндра 8. Гидроцилиндры 8, 9, 10 работают поочередно. Сначала выдвигается шток гидроцилиндра 8 до момента, когда гидроцилиндр 9 своим упором 6 взаимодействует с кулачком 4 и устанавливается в горизонтальном положении. Далее выдвигается шток гидроцилиндра 9. Гидроцилиндр 10 в процессе перемещения планок с заготовкой также переходит в горизонтальное положение при взаимодействии его упора 7 с кулачком 5. Гидроцилиндр 10 предназначен для продвижения заготовки по столу станка до базовой опоры.

После того как заготовка сориентирована на столе станка, гидроцилиндр 13 перемещает планки и заготовка опускается на стол станка, а планки перемещаются в исходное положение гидроцилиндрами 8 и 9.

#### НОРМАЛИЗАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Технологические приспособления оказывают существенное влияние на эффективность и качество производства новых машин и приборов, удельный вес приспособлений в себестоимости продукции машиностроения составляет 10...12%.

Ускорение научно-технического прогресса вызывает необходимость частой смены объектов производства. При этом практически вся специальная оснастка списывается, проектируется и изготавливается новая. Это приводит к большим затратам трудовых и денежных ресурсов на производство приспособлений, что в свою очередь отражается на сроках технологической подготовки производства и себестоимости выпускаемой продукции. Поэтому резкое сокращение сроков проектирования и изготовления приспособлений, снижение стоимости проектных работ, повышение качества создаваемых конструкций становится особенно актуальным. В условиях серийного (мелкосерийного) производства особенно важно наличие гибкой переналаживаемой высокомеханизированной системы приспособлений. Эффективными методами, ускоряющими и удешевляющими проектирование и изготовление приспособлений, являются унификация, нормализация и стандартизация деталей и элементов приспособлений и создание на их основе систем автоматизированного проектирования приспособлений.

Функции, выполняемые приспособлениями для электрообработки, в основном совпадают с функциями приспособлений для

обработки резанием, отличия сводятся к необходимости подвода напряжения к заготовке, формирования потока рабочей жидкости, обеспечения коррозионной стойкости. Это позволяет использовать при проектировании приспособлений для электрообработки общие принципы нормализации и стандартизации приспособлений для механической обработки.

Как показывает опыт работы машиностроительных заводов, большинство специальных приспособлений для электрообработки может быть изготовлено из нормализованных и стандартизованных элементов, применяемых при создании приспособлений для механической обработки. Уровень использования нормализованных и стандартных деталей при конструировании специальных приспособлений достигает 70 %.

Методическими документами предусмотрено шесть систем станочных приспособлений: универсальные безналадочные (УБП), универсально-сборные (УСП), универсально-наладочные (УНП), специализированные наладочные (СНП), сборно-разборные (СРП), неразборные специальные приспособления (НСП).

Приспособления каждой системы имеют различные способы агрегатирования составляющих элементов, параметры и другие конструктивные отличия, обеспечивающие их эффективность в различных производственных условиях.

Главная цель создания систем — резко увеличить в приспособлениях число стандартных и нормализованных узлов, механизмов и повысить эффективность приспособлений за счет многократного их использования. Рассмотрим характеристики систем станочных приспособлений.

Для ускорения подготовки производства ведутся работы по автоматизации технологической подготовки производства с помощью ЭВМ, в том числе и процесса конструирования станочных приспособлений. Создание автоматизированной системы проектирования приспособлений неразрывно связано с нормализацией, стандартизацией и унификацией, так как проектирование приспособлений из стандартных элементов и сменных наладок по типовым схемам может быть выполнено на ЭВМ при относительно небольших затратах. Проектирование приспособлений из нестандартных элементов требует значительного усложнения алгоритмов и программ.

Сущность автоматизированного проектирования заключается в следующем. В ЭВМ вводится описание обрабатываемой заготовки и оснащаемой стакочной операции. С помощью программ синтеза конструкций в ЭВМ строится цифровое информационное описание проектируемого приспособления в виде соответствующих числовых массивов. Управление передается блоку составления спецификаций, результаты которого выдаются на печатающее устройство ЭВМ в форме документа, определяемого

стандартом ЕСКД. Затем выполняется работа по формированию программ вычерчивания, которые управляют чертежно-графическим автоматом при получении сборочного и детализировочных чертежей конструкции. Процесс завершается технологической подготовкой производства приспособления и составлением программ для станков с ЧПУ.

Автоматизированное проектирование осуществляется на базе унифицированных нормализованных проектных решений, описание которых хранится в памяти ЭВМ. В состав постоянной информации входят библиотека конструктивных элементов приспособлений, библиотека типовых изображений, каталог сведений об оборудовании, нормативно-справочные материалы, спецификационные массивы, сведения об условиях производства приспособлений. Доминирующее значение в автоматизированном проектировании приспособлений имеет библиотека конструктивных элементов.

Основная часть операций по разработке конструкций, их вычерчиванию, проектированию технологии их изготовления поручается программно-техническому комплексу, который образует ядро системы автоматизированного проектирования (САПР). На конструктора возлагаются функции подготовки заданий для САПР на проектирование приспособлений (входной информации) и обеспечение ответами вопросов проектирующей системы при диалоговом режиме ее работы. Таким образом, автоматизация проектирования в основном переводит процессы построения и документирования конструкций приспособлений из разряда творческих в формальные.

Автоматизация проектирования приспособлений основана на возможности построения конструкций из конечного числа заранее определенных унифицированных проектных решений — нормализованных конструктивных элементов, все множество которых можно описать и хранить в памяти ЭВМ. Алгоритмы построения базируются на технологических закономерностях конструирования приспособлений.

Характерной особенностью автоматизированного проектирования приспособлений является комплексность выполнения всевозможных проектных функций единой САПР: конструирование, получение чертежей и спецификаций, технологическое проектирование и получение технологических документов, подготовка и выдача программ для оборудования с ЧПУ для изготовления деталей приспособлений.

Применение САПР приспособлений позволяет снизить в среднем трудоемкость проектирования в 10...12 раз, себестоимость проектирования в 8...10 раз. Описанный подход к автоматизированному проектированию приспособлений может быть использован и для проектирования приспособлений для электрообработки.



ПРИЛОЖЕНИЯ

При составлении программ принято следующее распределение регистровой памяти для записи значений переменных

Переменная	Регистр памяти	Переменная	Регистр памяти
$K$	1	$h$	7
$I_{ep}$	2	$Q$	8
$f$	3	$R$	9
$q$	4	$\bar{S}_{51}$	A
$J_0$	5	$\bar{S}_{62}$	B
$F$	6	$S_r$	C
$j$	D		

1. Программа расчета  $\bar{S}_0$  (модель 1)

Шаг	Операция	Код	Шаг	Операция	Код	Шаг	Операция	Код
00	ФПРГ							
01	ИП2	62	31	,	0—	62	ИП2	62
02	ИП6	66	32	1	01	63	ИП7	67
03	÷	13	33	9	09	64	x	12
04	ПД	4Г	34	5	05	65	0	00
05	4	04	35	x	12	66	,	0—
06	,	0—	36	+	10	67	0	00
07	1	01	37	ИПД	6Г	68	2	02
08	2	02	38	0	00	69	x	12
09	ИП2	62	39	0—	70	70	—	11
10	x	12	40	3	03	71	ИП2	62
11	2	02	41	9	09	72	ИП5	65
12	,	0—	42	x	12	73	x	12
13	1	01	43	+	10	74	8	08
14	2	02	44	ИП7	67	75	ВП	0Г
15	+	10	45	0	00	76	3	03
16	ИП3	63	46	,	0—	77	/—/	0L
17	1	01	47	7	07	78	x	12
18	ВП	0L	48	8	08	79	—	11
19	4	04	49	5	05	80	ИП1	61
20	/—/	0L	50	x	12	81	x	12
21	x	12	51	+	10	82	1	01
22	—	11	52	ИП2	62	83	ВП	0Г
23	ИП4	64	53	ИПД	6Г	84	3	03
24	3	03	54	x	12	85	÷	13
25	,	0—	55	0	00	86	ПА	4—
26	2	02	56	,	0—	87	С/П	50
27	9	09	57	0	00	88	БП	51
28	x	12	58	6	06	89	00	00
29	+	10	59	5	05			
30	ИП5	65	60	x	12			
	0	00	61	—	11			

2. Программа расчета  $\bar{S}_0$  (модель 2)

Шаг	Операция	Код	Шаг	Операция	Код	Шаг	Операция	Код
00	ФПРГ							
01	ИП1	61	28	81	81	56	÷	13
02	ИП2	62	29	x	12	57	0	00
03	ИП6	66	30	0	00	58	,	0—
04	÷	13	31	.	0—	59	1	01
05	ПД	4Г	32	0	00	60	1	01
06	0	00	33	3	03	61	7	07
07	,	0—	34	9	09	62	ИП5	65
08	0	00	35	ИП4	64	63	ПП	53
09	7	07	36	ПП	53	64	81	81
10	6	06	37	81	81	65	÷	13
11	XУ	14	38	x	12	66	0	00
12	←	39	39	0	00	67	0	0—
13	ПП	53	40	,	0—	68	0	00
14	81	81	41	2	02	69	8	08
15	÷	13	42	5	05	70	3	03
16	1	01	43	ИП7	67	71	ИП8	68
17	,	0—	44	Flп	18	72	ИП9	69
18	2	02	45	ПП	53	73	÷	13
19	5	05	46	81	81	74	ПП	53
20	2	02	47	x	12	75	81	81
21	Fe <sup>x</sup>	16	48	1	01	76	÷	13
22	x	12	49	,	0—	77	ПВ	4L
23	0	00	50	6	06	78	С/П	50
24	,	0—	51	5	05	79	В/П	51
25	3	03	52	ИП3	63	80	00	00
26	7	07	53	Flп	18	81	FXУ	24
27	7	07	54	ПП	53	82	XУ	14
	ИП2	62	55	81	81	83	FC	25
	ПП	53				84	В/О	52

3. Программа расчета  $S_{T \min}$  (модель 3)

Шаг	Операция	Код	Шаг	Операция	Код	Шаг	Операция	Код
00	ФПРГ							
01	ИП1	61	10	60	60	21	,	0—
02	ИП2	62	11	x	12	22	0	00
03	ИП6	66	12	0	00	23	2	02
04	÷	13	13	.	0—	24	ИП3	63
05	0	00	14	5	05	25	ПП	53
06	,	0—	15	9	09	26	60	60
07	2	02	16	ИП2	62	27	x	12
08	8	08	17	ПП	53	28	0	00
09	XУ	14	18	60	60	29	0	0—
	←	19	19	x	12	30	5	05
	ПП	53	20	0	00	31	ИП5	65

Продолжение табл. 3

Шаг	Операция	Код	Шаг	Операция	Код	Шаг	Операция	Код
32	ПП	53	43	5	05	54	60	60
33	60	60	44	ИП4	64	55	÷	13
34	x	12	45	ПП	53	56	ПС	4Г
35	7	07	46	60	60	57	С/П	50
36	,	0—	47	÷	13	58	БП	51
37	i	01	48	0	00	59	0	00
38	Fe <sup>x</sup>	16	49	,	0—	60	Fxy	24
39	÷	13	50	4	04	61	XV	14
40	0	00	51	6	06	62	⊖	25
41	,	0—	52	ИП8	68	63	В/О	52
42	0	00	53	ПП	53			

4. Программа расчета оптимальных режимов электрохимической обработки

Шаг	Операция	Код	Шаг	Операция	Код	Шаг	Операция	Код
00	ФПРГ	63	32	ИПС	6Г	64	—	11
01	ИП3	60	33	ИП7	67	65	Fx <sup>2</sup>	22
02	—	11	34	Fx <sup>2</sup>	22	66	x	12
03	Fx ≥ 0	59	35	x	12	67	x	12
04	07	07	36	ИП1	61	68	ИПВ	6Л
05	ИП0	60	37	÷	13	69	→	
06	П3	43	38	ИП6	66	70	XV	14
07	0	00	39	x	12	71	↑	
08	ПВ	4Г	40	ПО	40	72	Fx < 0	5Г
09	ИП4	64	41	3	03	73	79	79
10	ИП7	67	42	÷	13	74	FBx	0
11	Fx <sup>2</sup>	22	43	—	11	75	ПВ	4Л
12	÷	13	44	Fx <sup>2</sup> ≥ 0	59	76	ИП6	66
13	Fx <sup>2</sup>	22	45	48	48	77	П9	49
14	FBx	0	46	FBx	0	78	ИП8	68
15	/—/	0Л	47	П8	48	79	ПА	4—
16	XV	14	48	ИП8	68	80	ИП6	66
17	ИП5	65	49	ИП7	67	81	1	01
18	ИП6	66	50	+	13	82	ВП	0Г
19	—	11	51	Fx <sup>2</sup>	22	83	5	05
20	ИПД	6Г	52	FBx	0	84	+	10
21	x	12	53	→	14	85	П6	46
22	+	10	54	XV	14	86	ИП5	65
23	FV	21	55	ИП2	62	87	—	11
24	+	10	56	x	12	88	Fx ≥ 0	59
25	ПС	4	57	ИПС	6Г	89	09	09
26	FV	21	58	+	13	90	ИП7	67
27	ИП3	63	59	1	01	91	ИПА	6—
28	x	12	60	+	10	92	ИП9	69
29	ИП7	67	61	ИП8	68	93	ИПВ	6Л
30	x	12	62	ИП0	60	94	С/П	50
31	П8	48	63	÷	13	95	БП	51
				1	01		07	07

5. Программа расчета рабочей поверхности ЭИ для ЭХО

Шаг	Операция	Код	Шаг	Операция	Код	Шаг	Операция	Код
00	ФПРГ	60	16	ПП	53	32	—	11
01	КИП0	61	17	40	40	33	ИП2	62
02	ИП1	62	18	Fx <sup>2</sup>	22	34	С/П	50
03	П2	65	19	ИП4	64	35	FLO	5Г
04	4	04	20	ИП1	61	36	03	03
05	0	00	21	x	12	37	С/П	50
06	—	11	22	ИП5	65	38	БП	51
07	Fx < 0	5Г	23	F sin	1Г	39	00	00
08	16	16	24	÷	13	40	ИП4	64
09	ИП1	61	25	+	10	41	ИП5	65
10	ИП5	65	26	FV	21	42	F cos	1Г
11	F cos	1Г	27	ПП	53	43	x	12
12	÷	13	28	40	40	44	ИП5	65
13	П2	42	29	—	11	45	F sin	1Г
14	БП	51	30	П2	42	46	÷	13
15	31	31	31	ИП1	61	47	ИП2	62
						48	—	11
						49	2	02
						50	÷	13
						51	В/О	52

6. Программа расчета концентратора для УЗО

Шаг	Операция	Код	Шаг	Операция	Код	Шаг	Операция	Код
00	ФПРГ	6Г						
01	ИПС	6Л	14	XV	14	28	С/П	50
02	ИПВ	6Л	15	ИПА	6—	29	ИП0	60
03	÷	13	16	ИП5	6—	30	ИП5	65
04	2	02	17	+	10	31	XV	14
05	x	12	18	ИПД	6Г	32	Fx <sup>2</sup>	22
06	Fx	20	19	x	12	33	÷	13
07	x	12	20	F tg	1Е	34	F arctg	11
08	ПД	4Г	21	ИП0	60	35	ИПД	6Г
09	0	00	22	Fx <sup>2</sup>	22	36	÷	13
10	ПА	4—	23	x	12	37	ПА	4—
11	1	01	24	П5	45	38	С/П	50
12	П9	49	25	ИП9	69	39	БП	51
13	С/П	50	26	1	01	40		
	ПО	40	27	+	10			
				П9	49			

Содержание	Набрать число	Выполнить команду	Результат
1. Ввести программу	—	—	—
2. Перейти в режим АВ	—	—	—
3. Занести в память $V$ и $f$	$V$ $f$	ПВ ПС	$V$ $f$
4. Перейти к автоматическому выполнению	—	В/О С/П	—
5. После останова микроЭВМ ввести $H_1$ и $d_1$ и продолжать вычисления	$H_1$ $d_1$	↑ С/П	$H_1$ $d_1$
6. После останова микроЭВМ ввести $H_i$ и $d_i$ для следующей ступени и продолжить вычисления	$H_i$ $d_i$	↑ С/П	$H_i$ $d_i$
7. После останова считывается результат	—	—	$h_s^i$

Для продолжения вычислений нажать С/П и повторить действия по пп. 6 и 7 до тех пор, пока не будут проведены вычисления для всех ступеней.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байсулов И. А., Волосатов В. А. Справочник молодого рабочего по электрохимической обработке. М.: Высшая школа, 1983. 175 с.
2. Борис А. Е., Фурсов В. И. Установка для маркирования//Машиностроитель. 1980. № 5. С. 45—46.
3. Бородин А. В., Ашихмин В. П. Инженерный расчет катода-инструмента методом моделирования идеального процесса ЭХРО для некоторых типовых задач//Новое в электрохимической размерной обработке металлов. Кишинев: Штиинца, 1972. С. 121—122.
4. Волгин В. М. Оптимизация электрохимической размерной обработки фасонных поверхностей с применением ЭВМ//Электрофизикохимические и комбинированные методы обработки металлов. Пенза: Приволжский ДНТП, 1984. С. 27—29.
5. Волгин В. М. Электрохимическое формообразование глубоких отверстий с образующей сложной формы//Электрохимические и электрофизические методы обработки материалов. Тула: ТулПИ, 1985. С. 54—62.
6. Волосатов В. А. Ультразвуковая обработка. М.: Лениздат, 1973. 248 с.
7. Гебель И. Д., Зыков А. А. Ультразвуковой суперфиниш Л.: ЛДНТП, 1978. 24 с.
8. Гвидин В. И., Костин А. Г., Фомин А. А. Электрохимическое формообразование наружных шлицевых поверхностей//Размерная электрохимическая обработка деталей машин (ЭХО-80). Тула: ТулПИ, 1980. С. 202—207.
9. Дмитриев Л. Б., Любимов В. В., Сундуков В. К. Некоторые вопросы расширения возможностей импульсной размерной электрохимической обработки//Размерная электрохимическая обработка деталей машин. Материалы IV Всесоюзной конференции. Ч. 1. Тула: ТулПИ, 1975. С. 152—157.
10. Дмитриев Л. Б., Шляков В. Г., Любимов В. В. Условия повышения точности электрохимического формообразования в импульсном режиме//Технология машиностроения. Тула: ТулПИ, 1973. Вып. 31. С. 113—118.
11. Донской А. В., Келлер О. К., Кратын Г. С. Ультразвуковые электро-технологические установки. Л.: Ленингр. отд-ние, Энергоиздат, 1982. 204 с.
12. Егоров Н. А., Калинин А. П. К вопросу о формировании геометрии анодной поверхности при электрохимической размерной обработке//Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Тула: ТулПИ, 1971. С. 16—22.
13. Егоров Н. А., Витушкин В. А., Панин В. В. Расчет диаметра инструмента для электрохимической прошивки отверстий в сплошном материале//Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Тула: ТулПИ, 1972. С. 39—47.
14. Жук Н. П. Курс коррозии и защиты металлов. М.: 1976. 422 с.
15. Золотых Б. Н. Физические основы электрофизических и электрохимических методов обработки. Ч. 1. М.: МИЭМ, 1975. 106 с.
16. Золотых Б. Н., Любченко Б. М. Инженерные методы расчета технологических параметров электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение, 1981. 52 с.
17. Зяблицев В. В., Егоров Н. А. Механизм повышения точности ЭХО в газозлектролитных смесях//Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Тула: ТулПИ, 1983. С. 50—57.
18. Иванов Н. И., Никифоров П. Т. Электрод-инструмент с продольно-крутильными колебаниями для ультразвуковой и электрохимикоультразвуковой обработки//Электрофизические и электрохимические методы обработки металлов. Тула: ТулПИ, 1984. С. 54—57.
19. Иванов Н. И., Никифоров П. Т., Лукичев Б. Н. Исследование ультразвуковой интенсификации нарезания внутренних резьб в деталях из труднообрабатываемых материалов//Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Тула: ТулПИ, 1982. С. 118—121.



20. Иванов Н. И., Никифоров П. Т., Шлеин А. И. Исследование процесса ЭХО плазмонапыленных деталей самофлюсующимися покрытиями на основе Ni—Cr—Si—В//Электрофизические и электрохимические методы обработки. Тула: ТулПИ, 1986. С. 22—24.

21. Иванов Н. И., Подшибякин В. Д. Исследование электрохимикоультразвукового шлифования плазменно напыленных деталей//Комбинированные электроэрозионно-электрохимические методы размерной обработки металлов. Ч. 2. Уфа: УАИ, 1983. С. 21—24.

22. Катодные устройства и технологический процесс электрохимического снятия заусенцев на станках моделей 4405, 4406, 4407. М.: НИИМАШ, 1982. 53 с.

23. Качкин Г. А., Кирсанов В. А. Устройство для электрохимического клеймения штангенциркуля//Машиностроитель, 1977. № 2. С. 43—44.

24. Колев К. С., Горчаков Л. М. Точность обработки и режимы резания. М.: Машиностроение, 1976. 146 с.

25. Кондратьев В. А., Углов А. А. О сварке тонких проводников лучом лазера//Физика и химия материалов. 1969, № 6. С. 17—24.

26. Коренблюм М. В. Расчет параметров импульсов при электроэрозионной обработке//Станки и инструмент, 1976. № 5. С. 32—33.

27. Коренблюм М. В., Отто М. Ш. Выбор режимов и эксплуатация транзисторных источников питания электроэрозионных станков. М.: НИИМАШ, 1978. 70 с.

28. Корсаков В. С. Основы конструирования приспособлений. М.: Машиностроение, 1983. 277 с.

29. Косилова А. Г., Мещеряков Р. К., Калинин М. А. Точность обработки, заготовки и припуски в машиностроении. Справочник технолога. М.: Машиностроение, 1976. 288 с.

30. Крашенинников К. П., Попов Л. С. Упругие токоподводы в станках для электрохимической обработки//Электрохимическая обработка.— Куйбышев, КуАИ, 1976. Вып. 63. С. 38—46.

31. Курченков В. И. Электроэрозионная и электрохимическая обработка металлов. М.: Машиностроение, 1967. 108 с.

32. Лазеры в технологии/Под ред. М. Ф. Стельмаха. М.: Энергия, 1975. 216 с.

33. Левит М. Л. Влияние скорости жидкостей в межэлектродной полости на износ графитовых электродов при электроэрозионной обработке//Электрофизические и электрохимические методы обработки. 1981. Вып. 2. С. 4—5.

34. Любимов В. В., Сундуков В. К., Новоселов А. М. Исследование процесса высокоскоростного электрохимического осаждения меди//Комбинированные электроэрозионно-электрохимические методы размерной обработки металлов. Ч. 2. Уфа: УАИ, 1983. С. 98—103.

35. Любимов В. В., Сундуков В. К., Кочеткова З. И. Экспериментальное исследование обобщенного электрохимического эквивалента в условиях импульсной ЭХО//Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Тула: ТулПИ, 1979. С. 33—39.

36. Любимов В. В., Сундуков В. К. Экспериментальное исследование механизма анодного растворения металлов при импульсном напряжении//Электрохимическая обработка металлов, 1980. № 4. С. 23—26.

37. Макаров Н. И., Рыкалин Н. Н., Углов А. А. О выборе схемы расчета температурного поля пластин при сварке световым лучом лазера//Физика и химия обработки материалов. 1967. № 3. С. 9—15.

38. Марков А. И. Ультразвуковая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1980. 238 с.

39. Марков А. И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов. М.: Машиностроение, 1968. 264 с.

40. Михайлов-Тепляков В. А., Богданов М. П. Автоматизированная лазерная резка материалов. Л.: Машиностроение, 1969. 208 с.

41. Немилев Е. Ф. Электроэрозионная обработка материалов: Учебник для ПТУ. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983, 160 с.

42. Ножиков А. Х., Дубров Г. Л. О выборе материала электрода-инструмента при обработке с широкодиапазонными транзисторными генераторами импульсов//Электрофизические и электрохимические методы обработки. 1975. Вып. 7. С. 17—21.

43. Оборудование для размерной электрохимической обработки деталей машин/Под ред. Ф. В. Седыкина. М.: Машиностроение, 1980. 176 с.

44. О закономерности совершенствования схем размерной электрохимической обработки/Ф. В. Седыкин, Л. Б. Дмитриев, В. В. Бородин, В. В. Любимов//Технология машиностроения. Тула: ТулПИ, 1972. Вып. 24. С. 3—11.

45. Основы повышения точности электрохимического формообразования/Под ред. И. И. Мороза. Кишинев: Штиинца, 1977. 150 с.

46. Паршутин В. В., Бородин В. В. Технично-экономические вопросы электрохимического формообразования. Кишинев: Штиинца, 1981, 128 с.

47. Подураев В. Н., Камалов В. С. Физико-химические методы обработки. М.: Машиностроение, 1973. 342 с.

48. Попилов Л. Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1982. 398 с.

49. Пронин В. Б., Меркус Л. Н. Электрохимическая трафаретная маркировка подшипниковых колец//Вестник машиностроения, 1975. № 12. С. 72—74.

50. Размерная электрическая обработка металлов/Б. А. Артамонов, А. Л. Вишняцкий, Ю. С. Волков, А. В. Глазков. М.: Высшая школа, 1978. 336 с.

51. Ракович А. Г. Основы автоматизации проектирования технологических приспособлений. Минск: Наука и техника, 1985. 285 с.

52. Расчет размеров катода при электрохимической размерной обработке полостей с наклонными и вертикальными стенками//Прогрессивные методы обработки деталей летательных аппаратов и двигателей. Казань: КАИ, 1976. Вып. 1. С. 39—42.

53. Румянцев Е. М., Давыдов А. Д. Технология электрохимической обработки металлов. М.: Высшая школа, 1984. 159 с.

54. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Кокора А. Н. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение, 1975. 296 с.

55. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 1/Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. М.: Машиностроение, 1972. 694 с.

56. Седыкин Ф. В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин. М.: Машиностроение, 1976. 302 с.

57. Станочные приспособления. Справочник в 2-х томах. Т. 1./Под ред. Б. Н. Вардашкина, А. А. Шатилова. М.: Машиностроение, 1984. 592 с.

58. Старков В. К. Дислокационные представления о резании металлов. М.: Машиностроение, 1979. 158 с.

59. Стаханов Н. Г., Гнидин В. И., Лейченко В. А. Расчет теоретического профиля катода для образования винтовых поверхностей при сложной кинематике движения электродов//Электрохимические и электрофизические методы обработки материалов. Тула: ТулПИ, 1980. С. 60—67.

60. Суминов В. М., Кузин В. Г. Формообразование отверстий при многоимпульсной лазерной обработке//Приборы и системы управления, 1970, № 4. С. 32—36.

61. Терликова Т. Ф., Мельников А. С., Баталов В. И. Основы конструирования приспособлений. М.: Машиностроение, 1980. 119 с.

62. Теумин И. И. Ультразвуковые колебательные системы. М.: Машгиз, 1959. 328 с.

63. Технология и экономика электрохимической обработки/Под ред. Ф. В. Седыкина. М.: Машиностроение, 1980. 192 с.

64. Улиг Г. Коррозия металлов. М.: Металлургия, 1968. 306 с.

65. Ультразвуковая технология/Под ред. В. А. Аграната. М.: Металлургия, 1974. 405 с.

66. Фотеев Н. К. Технология электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение, 1980. 184 с.

67. Черепанов Ю. П., Самецкий Б. И. Электрохимическая обработка в машиностроении. М.: Машиностроение, 1972. 117 с.

68. Шмаков Т. С. Пути повышения стойкости электрода-инструмента при электроэрозионной обработке//Электронная обработка материалов, 1982. № 2. С. 5—7.

69. Электродные процессы и процессы переноса при электрохимической размерной обработке/Под ред. В. С. Крылова. Кишинев: Штиинца, 1983. 206 с.

70. Электроимпульсная обработка металлов/А. Л. Лившиц, А. Т. Кравец, И. С. Рогачев и др. М.: Машиностроение, 1967, 295 с.

71. Электроразрядная обработка материалов/Е. М. Левинсон, В. С. Лев, Б. Г. Гуткин и др. Л.: Машиностроение, 1971. 256 с.

72. Электроэрозионная и электрохимическая обработка. Электроэрозионная обработка/Под ред. А. Л. Лившица и А. Роша. М.: НИИМАШ, 1980. Ч. 1, 224 с. Ч. 2. 164 с.

73. Яхимович Д. Ф. Вопросы расчета и конструирования инструмента для ультразвуковой обработки//Проектирование и эксплуатация инструмента и оснастки для электрофизической и электрохимической обработки материалов. Л., 1984. С. 69—73.

Предисловие . . . . .	3
Расчет и проектирование инструмента для электрофизической и электрохимической обработки . . . . .	6
Расчет размеров рабочих поверхностей электродов-инструментов для ЭЭО	
Методика расчета и корректировки профиля электрода-инструмента при ЭХО . . . . .	6
Конструктивные особенности инструментов для ультразвуковой обработки . . . . .	11
Особенности проектирования приспособлений для ЭФХМО . . . . .	25
Влияние приспособления на точность ЭФХМО . . . . .	39
Установочные элементы приспособлений . . . . .	39
Зажимные механизмы приспособлений . . . . .	43
Приводы приспособлений . . . . .	48
Корпусы приспособлений . . . . .	52
Приспособления для электрофизической обработки . . . . .	56
Основы электроэрозионной обработки . . . . .	58
Конструкции приспособлений для электроэрозионной обработки . . . . .	65
Приспособления для ультразвуковой и лазерной обработки . . . . .	83
Приспособления для ЭХО . . . . .	103
Классификация приспособлений для ЭХО по типу технологических операций . . . . .	108
Требования к приспособлениям для ЭХО . . . . .	110
Защита приспособлений от коррозии . . . . .	112
Проектирование токоподводов . . . . .	117
Конструкции приспособлений для ЭХО . . . . .	124
Приспособления для комбинированных методов обработки . . . . .	141
Физико-химические основы комбинированных методов обработки . . . . .	141
Конструкции приспособлений для комбинированных методов обработки . . . . .	144
Автоматизация и нормализация приспособлений для электрофизической и электрохимической обработки . . . . .	157
Механизация и автоматизация приспособлений . . . . .	157
Нормализация и стандартизация приспособлений . . . . .	161
Приложения . . . . .	164
Список литературы . . . . .	169

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ

ЛЮБИМОВ Виктор Васильевич, ИВАНОВ Николай Иванович,  
ПУПКОВ Евгений Ильич и др.

**ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ  
И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

Редактор А. А. Степанова  
Обложка художника В. Д. Епанешникова  
Художественный редактор С. С. Водниц  
Технический редактор Е. П. Смирнова  
Корректоры Л. Л. Георгиевская, А. П. Сизова

ИБ № 5379

Сдано в набор 29.01.88. Подписано в печать 25.04.88. Т-05196. Формат 60×88<sup>1/16</sup>. Бумага офсетная. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,78. Усл. кр.-отт. 11,03. Уч.-изд. л. 11,13. Тираж 10 400 экз. Заказ 111. Цена 55 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Машиностроение», 107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 101898, Москва, Центр, Хохловский пер., 7.

## УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Издательство «МАШИНОСТРОЕНИЕ»  
выпустит в 1989 году следующие книги:

### *Научная литература*

Старков В. К. **Управление стабильностью и качеством обработки резанием в автоматизированном производстве.** — М.: Машиностроение, 1989. — 24 л.: ил. — (В пер.): 3 р. 90 к.

В монографии рассмотрены особенности и требования к автоматизированной обработке резанием. На основе анализа физических основ и математических моделей процесса резания сформулированы принципы управления стабильностью его протекания и обеспечения повышенного качества обработки. Показаны пути повышения размерной стабильности деталей и однородности физико-механических свойств поверхностного слоя. На примерах лезвийной обработки и шлифования даны рекомендации по повышению работоспособности и надежности режущего инструмента. Описаны методы и технические средства оптимизации резания, в том числе при неполной исходной информации для его проектирования.

Для научных работников, занимающихся механической обработкой материалов. Может быть использована инженерно-техническими работниками и студентами вузов.

### *Производственная литература*

Аскинази Б. М. **Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой.** — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1989. — 16 л.: ил. — (В пер.): 1 р. 20 к.

Приведены теоретические, технологические и эксплуатационные основы электромеханического упрочнения и восстановления деталей. В третьем издании (2-е изд. 1977 г.) уделено внимание применению наиболее эффективного оборудования и инструмента, а также приводятся новые разновидности упрочняющей и восстанавливающей технологий.

Для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий и ремонтных служб промышленности.

Мальгин Б. В. **Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин.** — М.: Машиностроение, 1989. — 10 л.: ил. — (В обл.): 65 к.

Приведен опыт работы установок для магнитной и магнитно-импульсной обработки инструмента, деталей машин и рабочих органов технологического оборудования для повышения их надежности. Описаны устройства, принцип их действия, а также



технология магнитной обработки инструментов и деталей машин и механизмов. Показана эффективность технологии, уменьшение остаточных напряжений и повышение стойкости режущего инструмента.

Для инженерно-технических работников машиностроения, приборостроения, легкой и электронной промышленности.

**Оптимизация технологии глубинного шлифования/С. С. Силин, Б. Н. Леонов, В. А. Хрульков и др.—М.: Машиностроение, 1989. — 7 л.: ил. — (Новости технологии). — (В обл.): 45 к.**

Рассмотрены технологические средства повышения стойкости абразивного инструмента при глубинном шлифовании. Обосновываются технологические рекомендации характеристик режущего и правящего инструмента, подготовки кругов к эксплуатации, требования к СОЖ. Приведены сведения по современному оборудованию с автоматизированным циклом работы, схемы и характеристики станков для глубинного шлифования, достижимые точность и качество.

Для инженерно-технических работников машиностроительных заводов.

**Шуваев Г. В., Сорокин В. К., Зимицкий Ю. Н. Резка неметаллических материалов алмазными инструментами. — М.: Машиностроение, 1989. — 5 л.: ил. — (Новости технологии). — (В обл.): 40 к.**

Рассмотрены характеристики разработанных в последние годы отрезных инструментов с толщиной режущей кромки 25—120 мкм, предназначенных для резки керамических и других труднообрабатываемых материалов. Приведены данные о конструкции инструмента, режимах резания, качестве резки.

Для инженерно-технических работников, занимающихся вопросами механической обработки неметаллических материалов.

**Юшков В. В. Опыт внедрения абразивной и алмазной обработки при восстановлении деталей машин. — М.: Машиностроение, 1989. — 4 л.: ил. — (Новости технологии). — (В обл.): 35 к.**

Рассмотрены вопросы рационального применения абразивного и алмазного инструмента при обработке изношенных и восстановленных (наплавкой, напылением и другими методами) деталей в условиях ремонтных предприятий и цехов. Обобщен опыт научно-исследовательских институтов и ремонтных предприятий по интенсификации механической обработки изношенных и восстановленных деталей, повышению качества и долговечности деталей, улучшению культуры производства, снижению доли ручного труда благодаря применению этого инструмента.

Для инженерно-технических работников ремонтных предприятий и цехов.