

БИБЛИОТЕКА ТЕХНОЛОГА

Н. К. ФОТЕЕВ

**ТЕХНОЛОГИЯ
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ
ОБРАБОТКИ**

Н. К. ФОТЕЕВ

ТЕХНОЛОГИЯ
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ
ОБРАБОТКИ



Редакционная коллегия: лауреат Ленинской премии д-р техн. наук проф. **Ю. М. Соломенцев** (председатель), д-р техн. наук проф. **А. М. Дальский**, канд. техн. наук **В. А. Долецкий**, проф. **В. В. Иванов**, заслуженный деятель науки и техники РСФСР д-р техн. наук проф. **В. С. Корсаков**, заслуженный деятель науки и техники СССР д-р техн. наук проф. **А. А. Маталин**, лауреат Государственной премии СССР проф. **С. И. Самойлов**.

Рецензент инж. **В. А. Орлов**

Фотеев Н. К.
Ф74 Технология электроэрозионной обработки. — М.: Машиностроение, 1980, 184 с. ил. — (Б-ка технолога)

В пер.: 60 к.

В книге рассмотрены параметры шероховатости и физико-механические свойства поверхности, обработанной электроэрозионным способом. Описаны (разработанные на этой основе) технологические процессы изготовления штампов, раскатных валов, пресс-форм. Рассмотрены вопросы повышения производительности и точности обработки. Дана методика расчета размеров электрод-инструментов.

Книга предназначена для инженерно-технических работников машиностроительной промышленности.

ББК 34.55
6П4.4

Ф 31104-132 132-80. 2704050000
038(01)-80

Электроэрозионный способ обработки, открытый **Б. Р. Лазаренко** и **Н. И. Лазаренко** в 1943 г., положен в основу многих технологических процессов изготовления ответственных деталей в индивидуальном, серийном и массовом производствах. Он широко применяется в экспериментальных, инструментальных, ремонтных и основных цехах заводов. Обработка полостей ковочных, вырубных, формовочных и других штампов, пресс-форм, литейных форм, высадочного и фасонного металлорежущего инструмента, деталей топливной аппаратуры, газотурбинных двигателей, различных приборов и других изделий выполняется электроэрозионным способом с необходимыми точностью и качеством поверхности, обеспечивая большой экономический эффект.

Однако, несмотря на все расширяющееся применение в промышленности новых процессов электротехнологии, возможности электроэрозионной обработки используются пока не в полной мере. Многие ее стороны еще не изучены, в частности, влияние качества поверхности на работоспособность деталей, возможности управления качеством поверхности с получением требуемых характеристик в любом сочетании и др. Отсутствие четких рекомендаций в этих вопросах привело к тому, что при изготовлении деталей изделий инструментального производства — основного потребителя электроэрозионных станков, рассматриваемый способ используется, как правило, для предварительной, черновой обработки. Слесарная доводка и полировка являются до сих пор основными способами окончательной отделки поверхности после ее электроэрозионной обработки.

В то же время опыт ряда заводов показывает, что стойкость вырубных, ковочных штампов и многих видов металлорежущего инструмента, обработанных электроэрозионным способом без последующей слесарной доводки и полировки, не ниже, а во многих случаях выше, чем обработанных по технологии с применением доводки. В настоящей работе сделана попытка рассмотреть качество поверхности, обработанной электроэрозионным способом, установить, хотя бы в первом приближении, требования к качеству рабочих поверхностей некоторых типов технологической оснастки после электроэрозионной обработки, обеспечивающие нормальную ее стойкость. На этой основе

представлен ряд технологических процессов обработки с регулированием характеристик качества поверхности независимо друг от друга и используемого режима обработки, а также ряд процессов, исключаяющих ручную доводку и полировку рабочих поверхностей.

Успешная эксплуатация многих типов деталей, рабочие поверхности которых обработаны только электроэрозионным способом, вызывает необходимость рассмотреть процессы одновременной обработки сопрягаемых деталей. Применение таких процессов, обеспечивая значительный экономический эффект, требует, однако, разработки специального оборудования, изучения ряда специфических вопросов технологии электроэрозионной обработки.

Не все рассматриваемые в книге вопросы изучены полностью и доведены до практического использования. По затронутым направлениям предстоит еще много работы. В связи с этим автор с благодарностью примет замечания читателей.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Научные основы электроэрозионной обработки в жидкой диэлектрической среде разработаны советскими учеными. Определяющий вклад в вопросы физики и технологии процесса внесли Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко, Б. Н. Золотых, Л. С. Палатник, Б. А. Красюк, Г. Н. Мещеряков и др.

Явления в межэлектродном промежутке, протекающие в процессе электроэрозионной обработки, весьма сложны и описываются в большинстве своем только качественно. Однако и из такого рода сведений был сделан ряд важных выводов для практики, определивших развитие технологии электроэрозионной обработки.

1. СВЕДЕНИЯ О ЕДИНИЧНОЙ ЛУНКЕ¹

Энергия $W_{и}$ импульса тока, распределяясь между анодом, катодом и столбом разряда, выделяется в течение весьма короткого времени при высоких плотностях, что определяет специфику физических процессов. В результате происходит удаление металла с обрабатываемой заготовки, изменение структуры и свойств поверхностного слоя, образование внутренних напряжений, изнашивание электрод-инструмента, разложение рабочей жидкости и другие физические явления.

В течение импульса металл анода и катода в основном удаляется в жидком и парообразном состояниях. При коротких импульсах доля испаренного металла доходит до 90% и с ростом длительности импульса $t_{и}$ постепенно уменьшается до 5% при $t_{и}=1000$ мкс. Рабочая жидкость, окружающая канал разряда, испаряется, образуя газовую полость. В начальный момент скорость движения границы газовой полости достигает

¹ Под единичной лункой будем понимать след на обрабатываемой поверхности, полученный в результате воздействия одного электрического разряда. В дальнейшем, в целях сокращения вместо слов «единичная лунка» применяется термин «лунка», кроме случаев, оговариваемых особо.

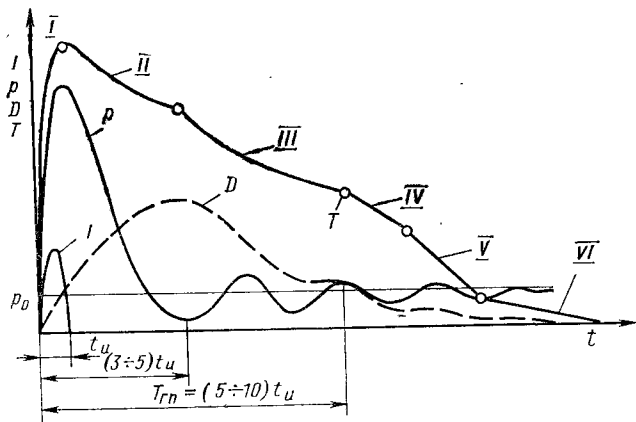


Рис. 1. Изменение силы тока I , давления p в газовой полости, ее диаметра D и температуры T поверхности лунки в процессе электроэрозионной обработки

200 м/с, а давление в полости — сотен атмосфер. В результате обрабатываемый металл испытывает значительное механическое давление. После окончания импульса тока газовая полость продолжает по инерции расширяться, что наряду с конденсацией паров металла приводит к быстрому падению давления в ней, вплоть до давления ниже атмосферного. В момент, когда размеры газовой полости приближаются к наибольшим, а давление в ней — к наименьшему, перегретый металл, который находится в образовавшейся лунке, вскипает и выбрасывается из нее. Реактивной струей паров металла оставшийся в лунке жидкий металл выдавливается из нее, и застывая, образует окаймляющий валик. Выброс этой дополнительной порции металла происходит через $(3 \div 5)t_u$ после окончания импульса тока (рис. 1), и затем охлажденная поверхность лунки принимает окончательную форму. Физика рассмотренных явлений исследована Б. Н. Золотых [14, 18].

В результате электроэрозионной обработки образуется поверхность, представляющая собой совокупность большого количества лунок. В связи с этим радиус $r_{л}$, глубина $h_{л}$ лунки и их соотношение, характеризующееся коэффициентом $K = r_{л}/h_{л}$, будут оказывать существенное влияние на параметры шероховатости поверхности.

Размеры лунок определялись многими исследователями [11, 15, 18, 35] в зависимости от энергии $W_{и}$ и длительности $t_{и}$ импульса, величины межэлектродного зазора, состава рабочей жидкости, материала и полярности включения электродов и других факторов. При обработке меди радиус лунки $r_{л}$ в плане изменяется от 4 до 400 мкм при регулировании $W_{и}$ от 10^{-6} до 2 Дж. Изменение $t_{и}$ от нескольких до 130 мкс при регулирова-

нии $W_{и}$, обеспечивающем максимальную производительность, обуславливает практически постоянное значение коэффициента $K=5$ [18, 35]. Вместе с тем отклонение $W_{и}$ и $t_{и}$ от соотношения, обеспечивающего максимальный сьем металла в единицу времени, приводит к колебаниям коэффициента K в широких пределах. Так, регулирование $W_{и}$ от 0,2 до 2 Дж при постоянном значении $t_{и}=615$ мкс влечет за собой колебание коэффициента K от 12 до 5 [18].

При обработке на грубых режимах ($W_{и}=3 \div 10$ Дж, $t_{и}=1000$ мкс) полярность включения электродов, состав рабочей среды и материал электрод-инструментов оказывает влияние на диаметр $d_{л}$ и глубину $h_{л}$ лунки. С ростом межэлектродного зазора от 5 до 150 мкм при обработке с $t_{и}=2500$ мкс алюминия, стали, латуни, меди, подключенных к отрицательному полюсу, $d_{л}$ возрастает на 15—20% (у алюминия — с 1,6 до 1,9 мм, у стали — с 1,55 до 1,8 мм), а $h_{л}$ остается постоянной и равной для алюминия 0,16 мм, стали, латуни, меди — 0,08 мм [11]. В итоге коэффициент K при обработке алюминия колеблется от 5 до 6, а при обработке стали — от 6 до 18 [11].

Для установления связи геометрии лунки с параметрами шероховатости поверхности необходимо представлять реальный вид лунки. В целях оценки величины отклонения ее реального профиля от теоретического, а также колебания ее размеров были измерены несколько сот лунок, образованных в углеродистой стали Ст3, латуни, алюминии, твердом сплаве ВК20 и нержавеющей стали 4Х13 при обработке на разных режимах. Лунки получали на полированных пластинах в реальных условиях электроэрозионной обработки. Для этого после начала процесса выключали автоматический регулятор подачи и между электрод-инструментом и образцом проходили отдельные электрические разряды. Затем образцы фотографировали и при увеличении в 22—470 раз профиль лунок записывался в нескольких сечениях профилографом при вертикальном увеличении в 100—1000 раз и горизонтальном увеличении в 100—400 раз. Радиус лунок в плане измерялся по фотографиям, укрупненным в 5—10 раз, в 100 сечениях. На рис. 2 показаны отдельные участки лунок в плане, полученных при обработке на разных режимах.

Текущий радиус $r_{ли}$ лунки в полярной системе координат с полюсом в центре лунки можно определить из выражения [23]

$$r_{ли} = r_{л\text{ ср}} + a_k \cos(k_T \varphi + \psi_k),$$

где $r_{л\text{ ср}}$ — радиус средней окружности лунки; a_k , ψ_k — амплитуда и фаза k -й гармоники, характеризующей погрешность формы; φ — полярный угол; $k_T=2, 3, \dots$

Анализ данных замера большого количества лунок, полученных на одном и том же режиме обработки, показал, что их размеры различны. При этом во всех случаях распределение

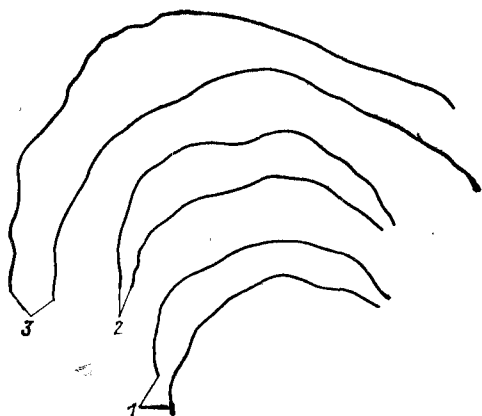


Рис. 2. Геометрия отдельных участков лунок в плане при обработке стали 4X13 на режимах:

1 — $I_{\text{ср}}=0,5 \text{ А}$, $f=100 \text{ кГц}$ ($\times 3073$);
2 — $I_{\text{ср}}=2 \text{ А}$, $f=66 \text{ кГц}$ ($\times 1402$); 3 —
 $I_{\text{ср}}=50 \text{ А}$, $f=1 \text{ кГц}$ ($\times 114$)

средних значений радиусов $r_{\text{л ср}}$ лунок, полученных на одном режиме, близко к нормальному закону. Дисперсия $\sigma_{r_{\text{л}}}$ возрастает с увеличением силы тока $I_{\text{ср}}$. Величина радиуса $r_{\text{л ср}}$ отдельной

лунок, образованной на мягком режиме ($I_{\text{ср}} < 1 \text{ А}$), подчиняется закону нормального распределения, а с переходом к грубым режимам ($I_{\text{ср}} > 10 \text{ А}$) — композиционному закону, который характеризуется двугорбой кривой, расположенной, как правило, симметрично относительно среднего значения.

Гармонический анализ показал, что форма лунки в плане может быть представлена окружностью с некоторой степенью приближения. При этом лунка, образованная при обработке на мягком режиме, имеет незначительные отклонения от окружности и погрешности формы, характеризуемые гармониками $k_p > 10$. На режиме $I_{\text{ср}} > 5 \text{ А}$ образуются лунки с радиусом, значительно отклоняющимся от $r_{\text{л ср}}$, и погрешностью формы, с доминирующими гармониками, как правило, 3—5-го, а в ряде случаев и 2-го порядка.

Такого рода эксперименты были повторены при использовании приспособления с малым вылетом электрододержателя с электрод-инструментом, что уменьшало его вибрацию в процессе электроэрозионной обработки. Обработка данных показала, что в этом случае амплитуда колебаний электрод-инструмента снижается на 30—60%, доминирующая гармоника перемещается в сторону ее повышения, а $r_{\text{л ср}}$ несколько уменьшается (на 10—20%) в сравнении с аналогичными данными лунок, полученных на станке мод. 4Б722.

Таким образом, колебания электрод-инструмента в процессе электроэрозионной обработки оказывают влияние на геометрию лунки. Для увеличения $r_{\text{л}}$ на некоторую величину $\Delta r_{\text{л}}$ необходимо переместить электрод на это расстояние за время $t \leq t_{\text{и}}$, т. е. со скоростью не меньше $\Delta r_{\text{л}}/t_{\text{и}}$. При обработке заготовки на грубом режиме сила, действующая на электрод-инструмент во время электрического разряда, и $t_{\text{и}}$ значительно больше, чем при мягких режимах. Отсюда вполне вероятно наличие скоростей перемещения электрода, обуславливающих большее искажение формы лунки на грубых режимах, чем на

мягких. Расчеты колебаний электрод-инструмента и результаты экспериментов подтверждают такой вывод.

Отмеченные закономерности не зависят от материала обрабатываемой заготовки, который наряду с режимом обработки и колебаниями электрод-инструмента определяет количественные значения изучаемых величин (табл. 1).

Таблица 1

Некоторые данные о размере единичной лунки

Материал	Режим обработки		$r_{\text{л ср}}$, мм	$h_{\text{л ср}}$, мм	К
	I , А	$t_{\text{и}}$, макс			
Сталь Ст3	2	8	59,5	13	4,58
	20	800	245	50	4,9
Сталь 4X13	20	800	240	47	5,1
Сплав ВК20	2	8	26	3,4	7,6
Латунь ЛС59-1	50	800	223	40	5,58
Медь М2	2	8	21	4	5,25

Искажение формы лунки зависит от ряда факторов. Одним из них является силовое воздействие струй паров, которое не только формирует металл валика, окаймляющего лунку, но и обуславливает крайне неравномерное перемещение микрообъемов еще не застывшего металла лунки. Кроме того, на поверхность лунки в большом количестве попадают микропорции металла электрод-инструмента и обрабатываемой заготовки в жидком состоянии, что также приводит к искажениям профиля лунки (рис. 3).

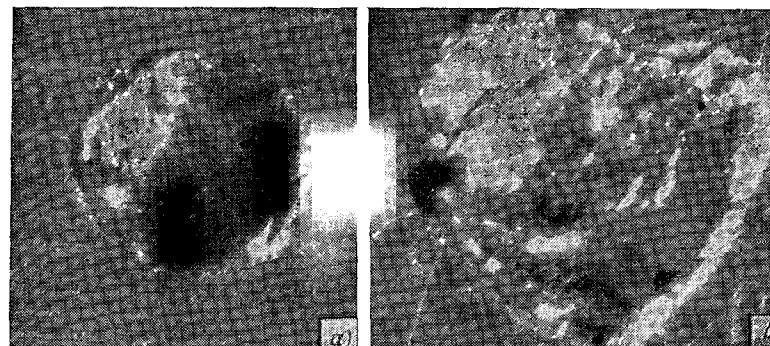


Рис. 3. Фотографии лунок, образовавшихся при обработке стали:
а — сталь 4X13 $I_{\text{ср}}=50 \text{ А}$, $f=1 \text{ кГц}$ ($\times 35$); б — сталь Ст3 $I_{\text{ср}}=20 \text{ А}$, $f=1 \text{ кГц}$ ($\times 70$)

2. СИСТЕМАТИЧЕСКАЯ И СЛУЧАЙНАЯ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПРОФИЛЯ ШЕРОХОВАТОСТИ

В результате электроэрозионной обработки поверхность приобретает специфическую шероховатость, параметры которой определяются размерами и геометрией двух групп неровностей: полученных в результате взаимного пересечения лунок и образовавшихся в результате искажения профиля лунки. Первая группа неровностей в значительной степени будет определяться размерами лунок $r_{л}$ и $h_{л}$, коэффициентом K , а также коэффициентом взаимного перекрытия лунок, т. е. факторами, с помощью которых можно определять те или иные параметры шероховатости. Вторая группа неровностей полностью определяется случайными факторами, которые пока еще невозможно использовать для расчета этих неровностей и определяемых ими параметров шероховатости.

Вышеизложенное позволяет разделить реальный профиль шероховатости поверхности (рис. 4, а) на две составляющие: систематическую и случайную. Этот способ, предложенный И. В. Дуниним-Барковским для изучения поверхностей, обработанных резанием, дал новые сведения о закономерностях их формообразования. Так, в частности, шероховатость поверхности, полученной в результате электроэрозионной обработки, будет иметь две группы выступов: систематические и случайные; их высоты обозначим соответственно R_{β} и R_{γ} . Из природы образования неровностей следует, что выступы высотой R_{β} об-

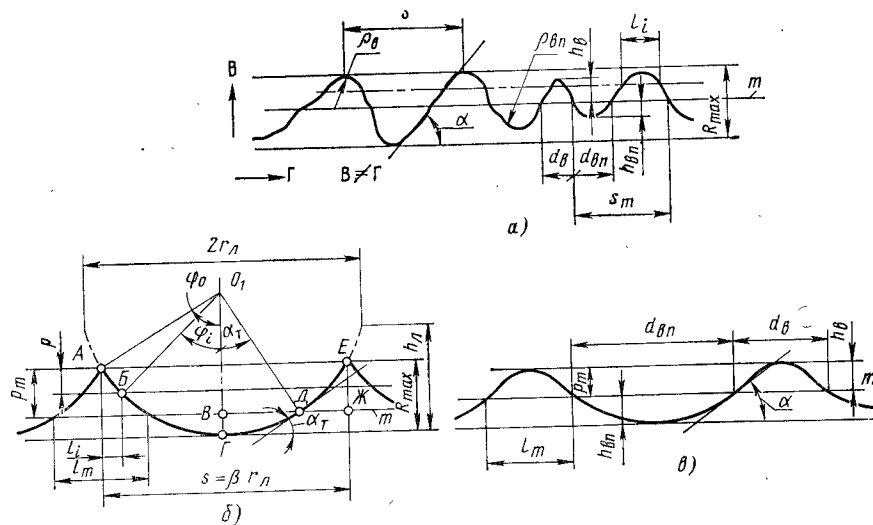


Рис. 4. Варианты (б, в) систематической составляющей реального профиля (а) шероховатости поверхности, обработанной электроэрозионным способом: В — вертикальное увеличение; Г — горизонтальное увеличение

разуются в результате взаимного пересечения лунок, а выступы высотой R_{γ} — застывшими микропорциями расплавленного металла. Размер R_{β} не будет постоянным, поскольку он зависит от радиуса $r_{л}$ и глубины $h_{л}$ лунки, а также от коэффициента перекрытия лунок. Величина R_{γ} также определяется многими факторами, в частности, свойствами материала обрабатываемой заготовки, обуславливающими вязкость и смачиваемость расплавленного металла; соотношениями между параметрами импульса, что предопределяет преимущественное удаление металла в жидком или парообразном состоянии, и др.

Очевидно, что устранить полностью причины, вызывающие образование случайной составляющей неровностей профиля, невозможно, а следовательно, во всех случаях электроэрозионной обработки профиль шероховатости будет иметь систематическую и случайную составляющие. При этом средняя высота выступов, определяющих систематическую составляющую профиля, будет существенно больше средней высоты выступов, определяющих случайную составляющую профиля. Количество же выступов высотой R_{β} будет намного меньше количества выступов R_{γ} , так как между двумя выступами, образованными пересечением лунок и определяемыми R_{β} , находится множество небольших выступов, образованных в результате застывания микропорций расплавленного металла и определяемых R_{γ} (рис. 5).

Для проверки сказанного, а также для определения доли средней высоты $R_{\text{ср}}$ выступов неровностей в соответствующей высоте $R_{\text{ср}}$ реального профиля были записаны профилограммы большого количества лунок и реального профиля при максимально возможных и равных увеличениях в вертикальном (В) и горизонтальном (Г) направлениях. Сопоставление профилограмм показало, что высота $R_{\gamma \text{ ср}}$ на профиле лунки и на реальном профиле поверхности одна и та же и составляет всего 5—20% от $R_{\text{ср}}$ реального профиля, занимая в основном область, примыкающую к меньшим значениям. Отсюда можно заключить, что реаль-

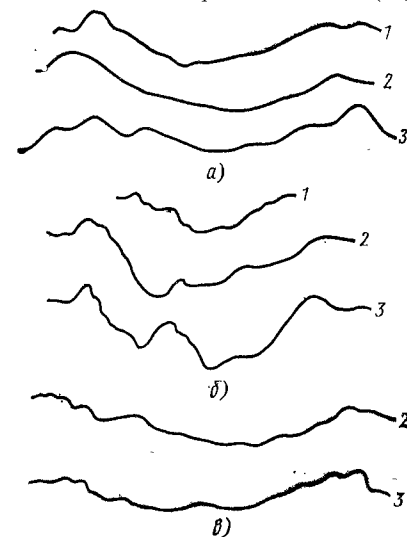


Рис. 5. Профилограммы единичных лунок, полученных в стали (а), алюминии (б) и латуни (в), обработанных электроэрозионным способом на режимах:

1 — $I_{\text{ср}}=2\text{А}$, $f=66\text{ кГц}$; 2 — $I_{\text{ср}}=20\text{А}$, $f=1\text{ кГц}$; 3 — $I_{\text{ср}}=50\text{А}$, $f=1\text{ кГц}$

ный профиль поверхности, полученный в результате электроэрозионной обработки, весьма однороден. Высота R_v существенно меньше R_β , в связи с чем R_{\max} будет в основном определяться высотой R_β .

Однако замена реального профиля профилем, показанным на рис. 4, б и используемым при изучении шероховатости поверхности [15, 35 и др.], не может быть признана правомерной. Дело в том, что вершина выступа поверхности частично испаряется, частично оплавляется под действием теплоты, выделившейся в процессе электрического разряда. При этом можно предположить, что расплавленная микропорция металла вершины выступа на заключительной стадии выброса металла из лунки, по-видимому, не испытывает сколько-нибудь значительного силового воздействия, сравнительно спокойно стекает по боковым поверхностям выступа и застывает на них. Таким образом, выступы поверхности притупляются, их толщина возрастает, а следовательно, соответственно уменьшается ширина впадины. Изучение профилограмм подтверждает такое предположение. В частности, форма вершины выступа профиля близка к форме симметричной относительно оси, расположенной перпендикулярно к средней линии, а углы наклона левой и правой боковых поверхностей профиля к средней линии равны.

Следовательно, в общем виде систематическая составляющая реального профиля шероховатости может быть представлена в виде, показанном на рис. 4, в.

3. СТАДИИ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

Многочисленные исследования качества поверхностного слоя показали, что после электроэрозионной обработки его структура и свойства близки к получаемым после термической обработки [1, 2, 20, 21, 27, 29]. В связи с этим качество поверхности будет определяться не только параметрами импульса, но и свойствами применяемой рабочей жидкости, условиями нагрева и охлаждения поверхности единичной лунки. Поскольку в этом направлении применительно к условиям электроэрозионной обработки проведено еще мало исследований, рассмотрим качественную сторону процессов.

С точки зрения образования в поверхностном слое дефектов (сетки микротрещин) и значительных внутренних напряжений представляют интерес тепловые режимы, при которых поверхностный слой имеет температуру не выше 500°C . Для большинства сталей и сплавов состояние при более высокой температуре считается пластичным, и в материале не должно быть внутренних напряжений, несмотря на возможные структурные изменения, даже если они происходят с изменением объема [8].

При нагреве в процессе электроэрозионной обработки по-

верхностного слоя его качество будет определяться величиной внутренних напряжений, возникающих в результате значительного градиента температур, и структурными превращениями. В определенных условиях напряжения могут превышать предел прочности обрабатываемого металла, что приведет к образованию сетки микротрещин. При заданных параметрах импульса возможности управления величиной внутренних напряжений при нагреве поверхностного слоя весьма ограничены и сводятся в основном к обработке предварительно нагретой заготовки и обработке с принудительным относительным перемещением электродов с большой скоростью (см. гл. V).

При охлаждении поверхностного слоя заготовки в процессе электроэрозионной обработки существенно изменяются его структура и свойства. Возможности воздействия на качество поверхности при этом сравнительно широки и определяются подбором состава рабочей жидкости, а также условиями ведения процесса.

Рассмотрение качественного изменения температуры (см. рис. 1) в среде, окружающей поверхность заготовки, на которой в процессе обработки формируется единичная лунка, а также изменение температуры поверхности самой лунки, позволяет выделить несколько тепловых режимов нагрева и охлаждения ($I—VI$).

Тепловой режим I связан с образованием плоского мгновенного источника тепла, действующего в течение $t \leq t_n$. За это время происходит интенсивный нагрев поверхностных слоев электродов вплоть до их расплавления и испарения. Тепловой режим II охватывает время $t_n \leq t = (3 \div 5)t_n$, т. е. с момента окончания импульса тока до момента дополнительного выброса металла из лунки (см. рис. 1). В этот период поверхность лунки покрыта перегретым металлом с температурой, превышающей его температуру плавления [18].

Тепловой режим III начинается после дополнительного выброса металла из лунки и заканчивается, как можно условно считать, при $t = T_{\text{пл}} = (5 \div 10)t_n$, т. е. одновременно с началом ликвидации газовой полости. Температура поверхности лунки близка к $T_{\text{пл}}$ обрабатываемой заготовки. В это время еще сохраняется значительный градиент температур в поверхностном слое заготовки [18].

Ускоренный процесс охлаждения поверхности лунки (тепловой режим IV) начинается с $t > T_{\text{пл}}$, т. е. после окончания дополнительного выброса металла из лунки, и особенно в момент, когда диаметр газовой полости приближается к минимальному. В это время газовая полость постепенно уменьшается, и ее граница перемещается к центру лунки. Затем наступает момент, когда граница газовой полости, представляющая собой парожидкостную смесь, соприкоснется с периферийной частью поверхности лунки, имеющей высокую температуру. В ре-

ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

зультате часть рабочей жидкости газовой полости превращается в пар. Появление пузырьков пара приводит к пульсации размеров газовой полости [18]. Можно допустить, что размер образовавшегося парового пузырька, даже единичного, будет соизмерим с объемом газовой полости.

Границы существования этого режима и стадию охлаждения поверхности установить сложно, однако в условиях электроэрозионной обработки, учитывая ограниченные размеры межэлектродного промежутка, можно охлаждение поверхности уподобить на этой стадии пленочному кипению. Начало стадии определяется свойствами используемой рабочей жидкости. Так, при обработке в веретенном масле пленочное кипение начинается при температуре поверхности около 750°C и обеспечивает скорость охлаждения $50\text{--}60^{\circ}\text{C}/\text{с}$, а при обработке в воде — при температуре 700°C , обеспечивая скорость охлаждения $150\text{--}200^{\circ}\text{C}/\text{с}$ [30].

Учитывая специфику условий протекания процесса электроэрозионной обработки, сомнительно утверждать, что пленочное кипение жидкости в межэлектродном промежутке переходит в пузырьковое, как это имеет место при охлаждении открытых поверхностей [19]. Однако можно утверждать, что с понижением температуры поверхности лунки рабочая жидкость все чаще соприкасается с ней и, испаряясь, интенсивно отводит тепло. Эта стадия охлаждения (тепловой режим V) происходит с наибольшей скоростью; начало стадии и скорость охлаждения определяются свойствами рабочей жидкости. Например, при использовании веретенного масла этот режим начинается ориентировочно при охлаждении поверхности до 500°C и может протекать со скоростью около $200^{\circ}\text{C}/\text{с}$, а при использовании воды он начинается при охлаждении поверхности до 380°C и имеет скорость в пределах $600\text{--}770^{\circ}\text{C}/\text{с}$ [30].

По мере охлаждения поверхности лунки до температуры кипения рабочей жидкости газовая полость ликвидируется, и жидкость начинает омывать всю поверхность лунки. Наступает последняя стадия охлаждения (тепловой режим VI), которая характеризуется конвективным теплообменом поверхности лунки с рабочей жидкостью, вступивших в непосредственный контакт. Скорость теплообмена на этой стадии весьма умеренная (см. рис. 1) и определяется в основном свойствами рабочей жидкости, величиной температурного перепада между поверхностью лунки и рабочей жидкостью, а также скоростью перемещения рабочей жидкости в межэлектродном промежутке.

Шероховатость поверхности оказывает существенное влияние на эксплуатационные свойства деталей, поэтому изучению ее параметров уделяется большое внимание [9, 22, 43 и др.]

К параметрам шероховатости относятся высота неровностей профиля R , высота неровностей профиля по десяти точкам R_z , среднее арифметическое отклонение профиля R_a , радиусы округления выступов ρ_v и впадин $\rho_{вп}$ профиля, радиус округления вершин выступов r_v , угол наклона боковой поверхности неровности к средней линии профиля α , средний шаг неровностей профиля по вершинам s и по средней линии s_m , число пересечений профиля со средней линией на единицу длины профиля n_0 , число выступов на единицу длины профиля m_v и возвышающихся над средней линией m_0 , коэффициент заполнения профиля пустотами k_p и металлом k_m , относительная опорная длина профиля t_p , определяемые на базовой длине l . На рис. 4 представлен участок профилограммы, на котором показан ряд перечисленных параметров шероховатости.

Каждый из указанных параметров играет важную роль и оказывает существенное влияние на износостойкость контактируемых поверхностей, усталостную прочность, коррозионную стойкость детали и т. д. [9, 22, 43 и др.] Так, в частности, при одинаковой высоте неровностей и при прочих равных условиях меньший износ будет той поверхности, шероховатость которой имеет меньший угол α , большие радиусы ρ_v , $\rho_{вп}$, меньшие шаги s , s_m , больший коэффициент k_m и т. д. Рост ρ_v , k_m , уменьшение s , s_m и α увеличивает опорную длину профиля, что в свою очередь уменьшает удельные нагрузки на контактируемые поверхности.

Таким образом, при сравнении поверхностей, обработанных одним методом, более износостойкой будет поверхность, у которой больше опорная длина профиля. При сравнении поверхностей, обработанных различными способами, и одинаковых параметрах их шероховатости более износостойкой будет поверхность, у которой отсутствует направленная шероховатость. При

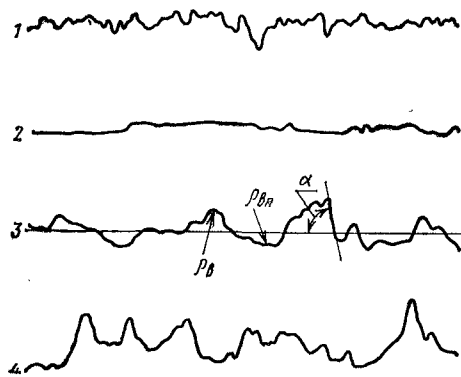


Рис. 6. Профилограммы шлифованной поверхности (1, 2) и поверхности, обработанной электроэрозионным способом (3, 4)

наличии направленной шероховатости, имеющейся у деталей, обработанных резанием, основной объем смазки может быть выдавлен из зоны больших в зону меньших давлений, что предопределяет возможность схватывания контактируемых поверхностей. У поверхностей, обработанных электроэрозионным способом, такого явления нет ввиду отсутствия направленной шероховатости, взаимной изоляции отдельных углублений, в которых сосредотачивается смазка.

На рис. 6 приведены профилограммы шероховатости, записанные в двух взаимно перпендикулярных направлениях с поверхностей, обработанных механическим и электроэрозионным способами. Профилограммы иллюстрируют принципиальное различие шероховатости в направлении перемещения металлорежущего инструмента и в перпендикулярном направлении и близость этих показателей у поверхности, обработанной электроэрозионным способом.

1. СХЕМА ОБРАЗОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ

М. Брюма обратил внимание, что единичные лунки на обрабатываемой поверхности могут располагаться упорядоченно, в виде строчек. Однако характер расположения лунок не оказывает влияния на параметры шероховатости реальной поверхности. Для обеспечения съема металла со всей поверхности необходимо сочетание большого количества строчек. В результате, как бы ни располагались лунки, они будут перекрывать друг друга, обуславливая единую схему образования шероховатости поверхности.

При рассмотрении процесса формообразования новой поверхности введен ряд упрощений. В частности, принято, что рабочая жидкость подается в межэлектродный зазор таким образом, что удаляемые ею в процессе обработки продукты эрозии за пределами газовой полости не оказывают существенного влияния на место прохождения последующих разрядов. После прохождения первого электрического разряда, ось второго разряда с высокой степенью достоверности будет проходить через границу газовой полости по валлику металла, окаймляющему единичную лунку, возникшую после первого разряда. По-види-

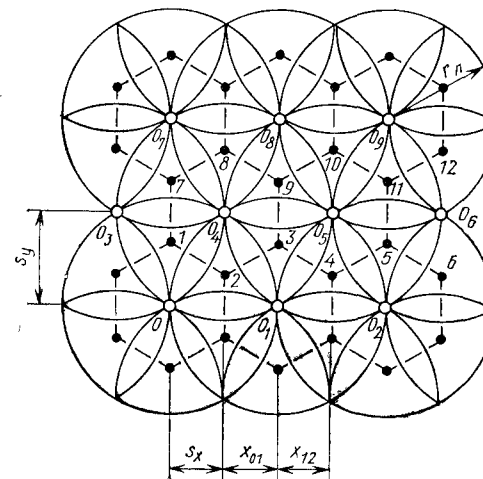
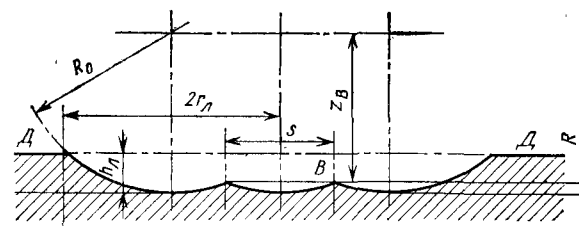


Рис. 7. Схема образования новой поверхности после удаления слоя металла:

● — вершины неровностей;
○ — впадины неровностей

мому, в последующем наиболее выступающие участки на обрабатываемой поверхности будут образовываться при пересечении валликов металла, окаймляющих лунки.

Удаление металла с заготовки происходит вначале в пределах первого слоя, толщина которого равна $h_{п1} - R_1$, и только после его снятия по всей поверхности удаляется второй слой толщиной $h_{п2} - R_2$, где R_2 — высота неровностей профиля шероховатости, определяемая как $R_0 - z_B$ (рис. 7). После удаления первого слоя металла будет сформирована новая поверхность. В реальных условиях она образуется в результате наложения лунок разных размеров и формы, перекрывающих одна другую с различным коэффициентом перекрытия. Вместе с тем идеализированная схема образования новой поверхности как процесса наложения лунок разных размеров позволила выявить ряд особенностей профиля шероховатости, полезных для практики [38].

Рассмотрение новой поверхности (рис. 7) с учетом некоторых особенностей реального профиля позволяет сделать следующие общие замечания. Наиболее удаленные от уровня исходной поверхности $D - D$ точки дна лунок O, O_1, O_2 и т. д. располагаются вполне закономерно, а именно как бы в вершинах треугольников $O_1O_2O_3$ и т. д. Выступы 1, 2, 3 и т. д.,

имеющие наибольшую высоту, располагаются так же закономерно, как бы в вершинах четырех — восьмиугольников, но чаще всего в вершинах шестиугольников (1, 2, 3, 9, 8, 7 и т. д.). При этом каждый из указанных выступов (2, 9 и т. д.) находится в центре тяжести треугольников (OO_1O_4 , $O_4O_5O_1$ и т. д.), в вершинах которых располагаются центры единичных лунок (O , O_1 , O_2 и т. д.).

После удаления первого слоя металла толщиной $h_{л1}—R_1$ при втором проходе с заготовки удаляется следующий, второй слой металла. Логично допустить (при изложенных выше упрощениях), что каналы разрядов будут образовываться между электрод-инструментом и выступами 1, 2, 3, 4 и т. д. При этом указанные выступы явятся центрами лунок, и после удаления второго слоя металла будут представлять собой точки, наиболее удаленные от исходной поверхности заготовки. С другой стороны, точки O , O_1 , O_2 и т. д. после снятия первого слоя металла определяли положение впадин, а после снятия второго слоя в этих местах возможно образование выступов.

Таким образом, после удаления второго слоя металла впадины поверхности (1, 2, 3 и т. д.) могут располагаться как бы в вершинах многоугольников, чаще всего — шестиугольников (1, 2, 3, 9, 8, 7 и т. д.), а наибольшие выступы (O , O_1 , O_2 и т. д.) — преимущественно в вершинах треугольников (OO_1O_4 , $O_1O_3O_5$ и т. д.) вблизи центров упомянутых шестиугольников. После снятия третьего слоя металла с заготовки ее поверхность будет близка по виду к поверхности, полученной после снятия первого слоя.

Расположение выступов и впадин показывает, что после снятия первого и второго слоев металла с заготовки геометрия профиля шероховатости поверхности будет существенно зависеть от места и направления рассмотрения поверхности. Для под-

тверждения сказанного были вычерчены профили в сечениях, параллельных оси X и Y , а также под углом 30° и 60° к оси X после удаления с заготовки первого и второго слоев металла [38]. Сопоставление элементов неровностей, полученных геометрическими построениями и профилографированием, показало их большое сходство (рис. 8).

Таким образом, поверхности, обработанные любым из электроэрозионных методов, состоят из отдельных

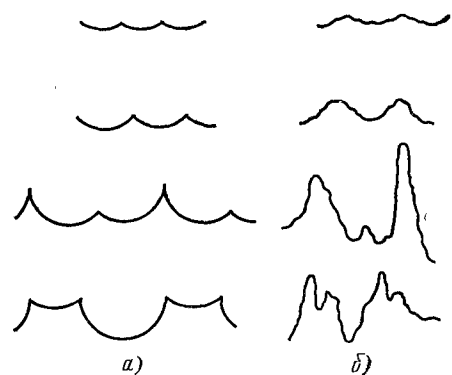


Рис. 8. Характерные неровности профиля, полученные построением (а) и экспериментально (б)

типовых элементов неровностей профиля, размер и форма которых достаточно полно определяются размерами единичных лунок и коэффициентом их перекрытия. Это позволяет развить начатую работу [15] по расчету параметров шероховатости поверхностей, обработанных электроэрозионным способом.

2. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ

Выделение из реального профиля (см. рис. 4, а) систематической его составляющей обычно приводило к профилям (см. рис. 4, б), рассмотренным в работах [15, 35]. Используя указанный профиль, можно провести анализ и расчеты таких параметров шероховатости, как R , s , m_0 , m_v , n_0 и др., когда незначительное местное искажение профиля не имеет принципиального значения. Это заключение подкрепляется результатами проведенных расчетов значения R [15], а также рассмотрения существующей методики определения параметров шероховатости [41].

Вместе с тем использование вышеприведенного профиля (см. рис. 4, б) может дать лишь приближенные значения $r_{вп}$ и α , а для расчета r_v не может быть применено совсем, ввиду искажения вершины выступа поверхности в результате испарения и плавления металла в процессе электроэрозионной обработки. Расплавленный металл, стекая с вершины выступа, увеличивает его размеры по средней линии и соответственно уменьшает ширину впадины. Такая трансформация неровностей профиля приводит к образованию значительного по величине радиуса округления выступов r_v , уменьшению радиусов округления впадин профиля $r_{вп}$ и росту угла α наклона боковой поверхности профиля к средней линии.

Следовательно, в общем виде систематическая составляющая реального профиля шероховатости будет соответствовать представленной на рис. 4, в, которая совместно с профилем, показанным на рис. 4, б, может быть принята в качестве основы для дальнейшего анализа.

Однако параметры шероховатости поверхности будут определяться не только размерами единичных лунок, но и коэффициентом их перекрытия β . В связи с возможностью значительных искажений профиля лунки в общем виде коэффициент перекрытия β по данным [15] и Л. В. Май колеблется от 0 до 2. Измерения показали, что его среднее значение не зависит от режима обработки. С достоверностью 0,99 коэффициент β при обработке стали колеблется в пределах 0,5—1,55 при среднем значении 0,95—1,15, латуни — в пределах 0,15—1,80 при среднем значении 1,15—1,35.

РАСЧЕТ ВЫСОТЫ НЕРОВНОСТЕЙ ПРОФИЛЯ

Несмотря на важность изучения параметров шероховатости, которые определяют вид и износостойкость поверхности, обра-

ботанной электроэрозионным способом, до последнего времени главным образом исследовалась только высота неровностей профиля в зависимости от режима обработки, материала электродов и других факторов [23, 35, 44 и др.]. Значительный объем экспериментов, выполненных многими исследователями, позволяет сделать вывод о том, что связь $R_z = aW_{\text{и}}^b$ при $b = 0,3 \div 0,4$ носит достоверный характер [15, 35, 44 и др.].

Длительность импульса $t_{\text{и}}$ оказывает меньшее влияние на R_z , чем энергия импульса $W_{\text{и}}$. Установлено [2], что

$$R_z = k_3 W_{\text{и}}^{x_3} t_{\text{и}}^{y_3},$$

где k_3 — коэффициент, зависящий от материалов электродов (табл. 2). Независимо от материала электрод-инструмента

Таблица 2

Обрабатываемый материал	Электрод-инструмент	k_3
Сплав на никелевой основе	Латунный (ЛС59-1) и углеродистый (ЭЭГ)	21
	Алюминиевый	22
	Чугунный	25
Сталь 1Х18Н9Т	Латунный, алюминиевый и углеродистый Из серого чугуна	21 24

при обработке сплавов на никелевой основе $y = 0,22$, а при обработке стали 1Х18Н9Т — $0,25$; $x = 0,45$ при обработке обоих типов материалов.

Из приведенного выражения следует, что рост $t_{\text{и}}$ примерно в 10 раз вызывает увеличение R_z в 1,4—1,6 раза, а такое же возрастание $W_{\text{и}}$ приводит к увеличению R_z в 3 раза.

Наряду с экспериментальными исследованиями высота неровностей профиля шероховатости обработанной поверхности определялась и расчетным путем, исходя из параметров лунки. Из геометрических построений с учетом взаимного перекрытия лунок равных размеров Б. Н. Золотых [15] определил максимальную высоту неровностей профиля:

$$R_{\text{max}} = \frac{\beta^2 r_{\text{л}}^2 h_{\text{л}}}{3(r_{\text{л}}^2 + h_{\text{л}}^2)} = \frac{\beta^2 K}{3(K^2 + 1)} r_{\text{л}}.$$

Следует отметить, что при выполнении расчета [15] рассматривалось пересечение трех одинаковых по размерам сфер, частями которых являются единичные лунки, без учета колебания параметров, входящих в выражение для определения высоты неровностей профиля.

При пересечении трех сфер разного диаметра, имеющего R_{01} , R_{02} и R_{03} с центрами C_1 , C_2 и C_3 (рис. 9) образуется выступ с вершиной B , представляющей собой точку пересечения указанных сфер. Определим высоту выступа как расстояние от точки B до дна единичной лунки, максимально удаленного от плоскости $D-D$. Последняя представляет собой след исходной поверхности обрабатываемой заготовки. Пересечение сфер плоскостью $D-D$ образует окружности с центрами O_1 , O_2 , O_3 и радиусами $r_{\text{л}1}$, $r_{\text{л}2}$, $r_{\text{л}3}$, являющимися радиусами лунок. Глубины упомянутых лунок будут соответственно $h_{\text{л}1}$, $h_{\text{л}2}$, $h_{\text{л}3}$.

Приняв средние значения коэффициентов $K = K_1 = K_2 = K_3 = r_{\text{л}}/h_{\text{л}}$ лунок равными между собой, а также условившись, что $R_{01} > R_{02} > R_{03}$, имеем $r_{\text{л}1} > r_{\text{л}2} > r_{\text{л}3}$, $h_{\text{л}1} > h_{\text{л}2} > h_{\text{л}3}$ и $R_{12} < R_{21} > R_{32}$. Расстояния между центрами O_1 , O_2 , O_3 лунок будут равны: между O_1 и O_2 — A_{12} , между O_1 и O_3 — A_{13} , между O_2 и O_3 — A_{23} . Расстояния от центров лунок до линий пересечения двух окружностей обозначены: $O_1 E_1$ — через F_{12} , $O_1 E_3$ — через F_{13} , $O_2 E_2$ — через F_{23} . Определим F_{12} как координату x плоскости, в которой находится линия пересечения сфер C_1 и C_2 с расположенной на ней точкой B :

$$F_{12} = \frac{r_{\text{л}1} (1 - m_{21}^2 + \beta_{12}^2)}{2\beta_{12}} = 0,5 \Delta_{12} r_{\text{л}1}, \quad (1)$$

где $m_{21} = r_{\text{л}2}/r_{\text{л}1} \leq 1$ — коэффициент, определяющий соотношение размеров перекрывающихся лунок; $\beta_{12} = A_{12}/r_{\text{л}1}$ — коэффициент перекрытия единичных лунок, определяемый как отношение межцентрового расстояния A_{12} к радиусу $r_{\text{л}1}$ единичной лунки большого размера; $\Delta_{12} = (1 - m_{21}^2 + \beta_{12}^2)/\beta_{12}$ — коэффициент.

Аналогично можно определить F_{13} и F_{23} :

$$F_{13} = \frac{r_{\text{л}1} (1 - m_{31}^2 + \beta_{13}^2)}{2\beta_{13}} = 0,5 \Delta_{13} r_{\text{л}1}; \quad (1')$$

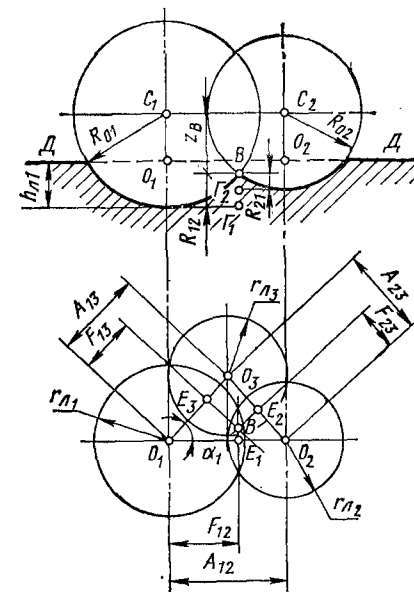


Рис. 9. Расчетная схема для определения высоты R неровностей профиля

$$F_{23} = \frac{r_{л2}(1 - m_{32}^2 + \beta_{23}^2)}{2\beta_{23}} = 0,5\Delta_{23}k_{л2}, \quad (1'')$$

где

$$m_{31} = \frac{r_{л3}}{r_{л1}} \leq 1; \quad m_{32} = \frac{r_{л3}}{r_{л2}} \leq 1; \quad \beta_{13} = \frac{A_{13}}{r_{л1}}; \quad \beta_{23} = \frac{A_{23}}{r_{л2}}.$$

Координаты x_B и y_B точки B найдем путем определения точки пересечения прямых E_1B и E_3B . Учитывая, что прямая E_3B перпендикулярна к прямой O_1E_3 , имеем

$$x_B = F_{12}; \quad y_B = \frac{2F_{13} - F_{12} \cos \alpha_1}{\sin \alpha_1}.$$

Поскольку

$$R_{12} = R_{01} - z_B; \quad z_B = \sqrt{R_{01}^2 - O_1B^2}; \quad O_1B^2 = x_B^2 + y_B^2 = r_{л1}^2 \left[\Delta_{12}^2 + \left(\frac{\Delta_{13} - \Delta_{12} \cos \alpha_1}{\sin \alpha_1} \right)^2 \right] = \Delta_1 r_{л1}^2;$$

$$R_{01} = \frac{r_{л1}^2 + h_{л1}^2}{2h_{л1}} = r_{л1} \frac{K^2 + 1}{2K} = k_{л1} r_{л1},$$

а $K = r_{л1}/h_{л1}$, то

$$R_{12} = r_{л1} \left(k_{л1} - \sqrt{k_{л1}^2 - \Delta_1} \right) = A_{R_{12}} r_{л1}. \quad (2)$$

Угол α_1 определяется по теореме косинусов из треугольника $O_1O_2O_3$. Зависимость A_R от K и β при $m_{12} = m_{13} = 1,0$ приведена на рис. 10.

При равных размерах лунок $m_{12} = m_{13} = 1$; следовательно, $\Delta_{12} = \Delta_{13} = \beta/2$, $\alpha = 60^\circ$ и

$$R_{12} = r_{л1} \left(k_{л1} - \sqrt{k_{л1}^2 - (\beta^2/3)} \right),$$

т. е. имеем выражение, полученное в работе [38].

Представляют интерес высоты R_{13} , R_{21} , R_{23} , R_{31} , R_{32} , определяющие расстояния от точки пересечения двух сфер с вертикальной плоскостью, проходящей через их центры, до дна лунки, образуемой каждой из рассматриваемых сфер (см. рис. 9). Так, $R_{21} = BG_2 = R_{02} - z'_B$. В этом случае $x_{E1} = x_B = F_{12} = 0,5 \Delta_{21} r_{л1}$, а $y_E = 0$; учитывая, выражение (2), получим

$$R_{21} = A_{R_{21}} r_{л1}.$$

По аналогии можно определить и другие высоты, например R_{13} , R_{31} и т. д.

Сопоставление формы элементов неровностей профиля, полученных графически, с реальными, записанными в виде профи-

лограмм, показывает их сходство. Это позволяет сделать не только качественные, но и количественные выводы относительно колебания высоты неровностей поверхности, образующейся в процессе электроэрозионной обработки. Так, при исследовании поверхности стальной детали можно зафиксировать два предельных значения R_{\max} в сечениях, параллельных оси X , одно из которых, в частности, при $K=4,5$, $m_{12} = 0,8$, $\beta=1$ и $1,5$ находится в пределах $(0,013 \div 0,03) r_{л1}$, а другое — в пределах $(0,054 \div 0,125) r_{л1}$, т. е. они отличаются друг от друга при одинаковом коэффициенте перекрытия в 5 раз, а при колебании β от 1 до 1,5 — в 1,7—10 раз.

Следует отметить, что минимальное значение $R_{\max} = (0,014 \div 0,031) r_{л1}$ после снятия первого слоя металла находится в сечении, параллельном оси X , и минимальное значение $R_{\max} = (0,013 \div 0,03) r_{л1}$ после снятия второго слоя металла — в сечении, параллельном оси Y . Максимальное же значение $R_{\max} = (0,072 \div 0,165) r_{л1}$ независимо от порядкового номера снятого слоя металла находится в сечении, параллельном оси Y . Таким образом, при идеализированных условиях рассмотрения шероховатости поверхности высота неровностей профиля может колебаться от

$$R_1 = \left(\sqrt{k_{л1}^2 - \frac{\beta^2}{48}} - \sqrt{k_{л1}^2 - \frac{\beta^2}{12}} \right) r_{л1}$$

до

$$R_2 = \left(k_{л1} - \sqrt{k_{л1}^2 - (\beta^2/3)} \right) r_{л1}.$$

Следует отметить, что при обработке различных металлов имеют место разные пределы колебаний значений β и m (табл. 3), что будет оказывать влияние на разброс значений R_{\max} .

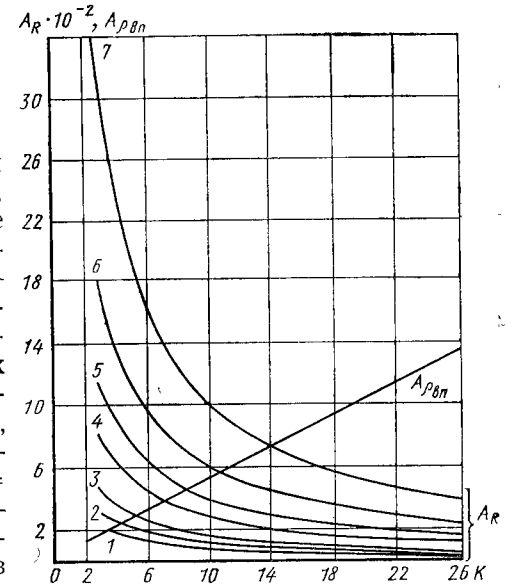


Рис. 10. Зависимость коэффициентов A_R и $A_{R\beta n}$ от K при различном β :
1, 4 — $\beta=1$; 2, 5 — $\beta=1,2$; 3, 6 — $\beta=1,5$; 7 — $\beta=2,0$

Таблица 3

Ряды распределений коэффициента m

Материал	Режим обработки		Частость при m						$m_{ср}$
	f , кгц	$f_{ср}$, А	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	
Сталь Ст3	1	20	1	4	4	8	20	12	0,88
Сталь 4Х13	1	20	—	1	2	8	28	10	0,90
Сплав ВК20	66	2	1	8	16	20	10	4	0,76
Латунь ЛС59-1	1	50	2	6	14	20	12	10	0,80

РАСЧЕТ РАДИУСА ОКРУГЛЕНИЯ ВПАДИН

При отсутствии искажений неровностей радиус округления впадин поверхности будет равен радиусу сферы, частью которой является единичная лунка. При использовании профиля неровностей, показанного на рис. 4, б, радиус округления впадин профиля $\rho_{вп}$ будет равен радиусу окружности R_0 (см. рис. 7), находящейся в плоскости, в которой записан рассматриваемый профиль. Таким образом:

$$\rho_{вп} = R_{oi} = A_{\rho_{вп}} r_{л}, \quad (3)$$

где $A_{\rho_{вп}}$ — коэффициент пропорциональности, изменяющийся от $\sqrt{k_{л}^2 - (\beta^2/12)}$ до $k_{л}$. Так как $k_{л}^2$ существенно больше $\beta^2/12$, то $A_{\rho_{вп}}$ при данном R_0 будет определяться только величиной K (рис. 10).

Максимальное значение $\rho_{вп}$ будет при $A_{\rho_{вп}} = k_{л}$, т. е.

$$\rho_{вп \max} = R_0 = k_{л} r_{л}. \quad (4)$$

Поскольку лунки при стабильном значении K и $k_{л}$ имеют различные размеры, то целесообразно определить $\rho_{вп \max}$ для каждой сферы через соотношение радиусов лунок m . Из соотношения (4) следует, что при обработке в заданных условиях

$$\frac{R_{oi}}{r_{л1}} = \frac{\rho_{вп1}}{r_{л1}} = \frac{\rho_{вп2}}{r_{л2}} = \dots = \frac{\rho_{впn}}{r_{лn}} = k_{л},$$

а значит,

$$\rho_{впn} = \frac{r_{лn}}{r_{л1}} \rho_{вп1} = m_{л1} \rho_{вп1} = m_{л1} k_{л} r_{л1},$$

что в общем виде позволяет записать

$$\rho_{впn} = m_{л1} k_{л} r_{л1}.$$

При этом, если $r_{л1}$ имеет максимальное значение, то $m_{л1} < 1$. Коэффициент $m_{л1}$ в широком диапазоне режимов в случае обработки латуни колеблется от 0,4 до 1,0, а в случае обработки стали — от 0,5 до 0,9 при наиболее вероятном значении для обоих случаев 0,8—1,0.

По методике [41] $\rho_{вп}$ определяется из профилограммы по уравнению

$$\rho_{вп} = \frac{V d_{вп}^2}{8 \Gamma^2 h_{вп}}, \quad (5)$$

где V и Γ — вертикальное и горизонтальное увеличения соответственно; значения $d_{вп}$ и $h_{вп}$ ясны из рис. 4.

Уменьшение $d_{вп}$ из-за образования наплыва металла на боковых поверхностях выступов в связи с расплавлением вершин последних приведет к уменьшению $\rho_{вп}$, определяемому по уравнению (5). В частности, снижение $d_{вп}$ на 15% уменьшает $\rho_{вп}$, подсчитываемый по методике [41], на одну треть. В то же время рассмотренное изменение профиля неровности не оказывает влияния на величину $\rho_{вп}$, рассчитываемую по равенству (3). Установлено, что при электроэрозионной обработке различных сталей $\rho_{вп}$, подсчитанный по равенству (3), больше, чем определяемый по уравнению (5), в 1,4—1,6 раза, а при обработке твердых сплавов — в 1,15—1,3 раза.

РАСЧЕТ ШАГА НЕРОВНОСТЕЙ ПРОФИЛЯ

Шаг неровностей профиля по вершинам s для каждого профиля определяют из геометрических соображений. Например, (см. рис. 7)

$$s_i = x_{oi} + x_{i2},$$

где x_{oi} и x_{i2} — координаты линии пересечения окружностей с центрами O_0 и O_1 , а также O_1 и O_2 соответственно. При $r_{л0} < r_{л1} < r_{л2}$ по аналогии с равенствами (1) — (1'') можно записать

$$x_{oi} = \Delta_{oi} r_{л1} 0,5 \text{ и } x_{i2} = \Delta_{i2} r_{л1} 0,5.$$

Таким образом,

$$s_i = 0,5 r_{л1} (\Delta_{oi} + \Delta_{i2}),$$

или в общем виде

$$s_i = A_s r_{л1},$$

где A_s — коэффициент пропорциональности.

При рассмотрении поверхности под произвольным углом теоретически можно получить любое значение s_i . Из вышеизложенного следует, что рост величины R_z в пределах базовой

длины l , определяемой согласно ГОСТ 2789—73 по одной профилограмме, дает большую погрешность, так как s при рассмотрении поверхности по ряду направлений может быть значительно больше l .

Шаг s_i неровностей профиля по вершинам обычно определяется по профилограммам как расстояние между соседними вершинами, возвышающимися над средней линией. В итоге из геометрических построений (см. рис. 7) следует, что s_i будет равно шагу неровностей профиля s_{mi} по средней линии, если s_i измеряется в направлении осей координат; в других случаях $s_{mi} < s_i$. При записи профилограммы трасса датчика может пройти мимо максимальных выступов профиля. Независимо от этого при обработке профилограмм, по методике [41], средняя линия профиля проводится с учетом зафиксированных на профилограмме неровностей, хотя они и не являются характерными для поверхности, обработанной электроэрозийным способом. Высота указанных неровностей также используется при определении s , s_m , R_{\max} , R_z , R_a , что дает искаженное представление о действительных параметрах шероховатости.

РАСЧЕТ m_v , M_v , m_0 И n_0

Число характерных выступов поверхности m_v , имеющих максимальную для данной шероховатости высоту, на 1 мм длины профиля $m_v = 1/s$. При рассмотрении поверхности в различных направлениях m_v может колебаться от нуля до $1/s_{\min}$. Вместе с тем число выступов M_v на 1 мм² поверхности, при прочих равных условиях, является характерной величиной для рассматриваемой поверхности и может быть определено из равенства

$$M_v = m_{vx} m_{vy} = 1/(s_x s_y).$$

При этом M_v будет колебаться в зависимости от изменения s_x и s_y (см. рис. 7). Число же неровностей профиля m_0 , возвышающихся над средней линией, на 1 мм длины профиля будет $m_0 = 1/s_m$. При этом m_0 колеблется от $1/s_{m \max}$ до $1/s_{m \min}$.

Число пересечений профиля со средней линией n_0 в пределах 1 мм длины профиля $n_0 = 2 m_0$ и колеблется в пределах, определяемых изменением m_0 .

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА k_m ЗАПОЛНЕНИЯ ПРОФИЛЯ МЕТАЛЛОМ

Известно, что

$$k_m = 1 - k_{\Pi}. \quad (6)$$

k_{Π} может быть определен в пределах шага неровностей профиля как отношение площади F_{Π} , очерченной контуром AEG , к общей площади sR_{\max} , занимаемой рассматриваемым профилем (см. рис. 4, б):

$$k_{\Pi} = \frac{F_{\Pi}}{sR_{\max}} = \frac{\rho_{\text{вп}}^2 \left(\frac{\pi\varphi_0}{90^\circ} - \sin 2\varphi_0 \right)}{2sR_{\max}}, \quad (7)$$

$$\text{где } \varphi_0 = \arccos(1 - A_0); \quad A_0 = \frac{R_{\max}}{\rho_{\text{вп}}} = \frac{A_R}{A_{\rho_{\text{вп}}}}$$

изменяются в зависимости от K .

Учитывая рис. 4, можно записать

$$s/2\rho_{\text{вп}} = \sin \varphi_0 = 2\sqrt{A_0 - A_0^2};$$

с другой стороны,

$$\sin 2\varphi_0 = 2\sin \varphi_0 \cos \varphi_0 = 2\sqrt{2A_0 - A_0^2} (1 - A_0).$$

Подставляя последние выражения в равенство (7) и учитывая условие (6), после преобразования запишем

$$k_m = \frac{1 + A_0 - T}{2A_0}, \quad (8)$$

$$\text{где } T = \frac{\pi\varphi_0}{180^\circ \sqrt{2A_0 - A_0^2}}.$$

k_m практически не зависит от K и β и для профиля на рис. 4, б при подсчете по уравнению (8) равен 28—36%.

РАСЧЕТ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ОПОРНОЙ ДЛИНЫ ПРОФИЛЯ

Эта длина равна (см. рис. 4, б)

$$t_p = \frac{\Sigma l_i}{l} = \frac{2ql_i}{qs} = \frac{2l_i}{s}, \quad (9)$$

где $q = l/s$; $l_i = (s/2) - \rho_{\text{вп}} \sin \varphi_i$;

$$\varphi_i = \arccos[1 - A_0(1 - \varepsilon)]; \quad \varepsilon = \rho/R_{\max}.$$

Подставляя приведенные выражения в равенство (9) и проведя преобразование, получим

$$t_p = 1 - \sqrt{\frac{2 - A_0 - 2\varepsilon}{2 - A_0}}. \quad (10)$$

При $K > 6$ коэффициент A_0 становится существенно меньше двух, что позволяет пренебречь им и записать выражение (10) в виде

$$t_p = 1 - \sqrt{1 - \varepsilon}.$$

Зависимость t_p от ε представлена на рис. 11.

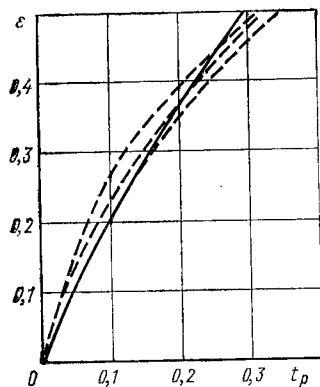


Рис. 11. Изменение относительной опорной длины профиля t_p от величины сближения ε , полученное (—) расчетом и экспериментально (---)

РАСЧЕТ УГЛА НАКЛОНА БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРОФИЛЯ К СРЕДНЕЙ ЛИНИИ

Исходя из равенства площадей ВГД и ДЕЖ определена точка Д на теоретическом профиле шероховатости (см. рис. 4, б). Угол наклона к профилю в данной точке соответствует искомому углу α_T :

$$\alpha_T = \arccos\left(\frac{1 + T - A_0}{2}\right).$$

Экспериментально установлено, что угол α , как правило, больше α_T из-за местного искажения профиля шероховатости вследствие застывания расплавленного металла на боковой поверхности выступов. Вполне очевидно, что степень искажения профиля зависит от теплофизических свойств обрабатываемого металла, определяемых,

в частности, его вязкостью в расплавленном состоянии, а также режимом обработки, обуславливающим состояние металла в процессе его удаления с поверхности заготовки. Учесть влияние указанных факторов на искажение профиля шероховатости в настоящее время не представляется возможным, поэтому значение угла можно определить из выражения

$$\alpha = A_\alpha \alpha_T,$$

где A_α — коэффициент (табл. 4).

Таблица 4

Коэффициент A_α

Материал заготовки	Режим обработки (W_H , Дж; t_H , мкс)		
	$W_H < 0,01$, $t_H < 10^{-5}$	$0,01 < W_H < 0,1$; $10^{-5} < t_H < 10^{-4}$	$0,1 < W_H < 1$; $10^{-4} < t_H < 10^{-3}$
Медь	1,1	2—2,2	—
Сталь углеродистая	1,05	1,5—2	1,8—2,1
» нержавеющая	1,05	1,5—2	2,0—2,3
Твердые сплавы	1	1,3	—
Другие материалы (приближенные значения)	1,05	1,7	2,0

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ

Рассмотрев воздействие единичного импульса на поверхность заготовки, можно установить качественную картину изменения параметров шероховатости поверхности, обработанной электроэрозионным способом. В частности, с увеличением W_H при постоянной t_H , так же как с ростом t_H при постоянной W_H , с поверхности обрабатываемой заготовки до определенной W_H в первом случае и до определенной t_H во втором удаляется все больший объем металла за один импульс. При этом диаметр и глубина лунки, образующейся под воздействием одного импульса, изменяются по-разному. При электроэрозионной обработке стали с ростом W_H от 0,2 до 1 Дж при $t_H = 130$ мкс r_L возрастает с 0,21 до 0,45 мм, в то время как h_L практически остается постоянной. С увеличением t_H с 130 до 430 мкс при $W_H = 0,5$ Дж размер r_L остается практически неизменным, а h_L возрастает с 0,039 до 0,50 мм [18].

Исходя из приведенных данных, можно предположить, что с ростом W_H и t_H будут возрастать $\rho_{вп}$ и s . Вместе с тем, очевидно, что чем больше s , тем меньше n_0 и m_0 . С увеличением W_H выделяется большее количество теплоты в течение одного импульса, следовательно, все выступающие участки профиля будут больше оплавлены, а значит, будут иметь больший радиус округления ρ_v . С ростом t_H также более интенсивно будут округляться вершины выступов профиля ввиду того, что теплота в данном случае будет выделяться более длительно.

Поскольку с увеличением W_H весьма интенсивно растет r_L при незначительном изменении h_L и при этом увеличивается ρ_v , то, очевидно, средняя линия профиля не будет смещаться в сторону дна впадины или в сторону вершин выступов. Аналогичные соображения приводят к идентичному заключению относительно положения средней линии профиля и при изменении t_H . В результате можно сделать вывод, что угол α будет изменяться незначительно с изменением t_H и W_H .

Относительно закона распределения параметров шероховатости следует отметить, что малые по величинам параметры определяются искажениями профиля единичных лунок каплями застывшего металла, неравномерным выбросом металла из лунки и другими причинами. Таких искажений в пределах даже одного шага s между наиболее высокими выступами может быть много. Более значительные по величине параметры шероховатости определяются пересечением лунок. Но больших по размерам R , s и др. будет меньше, чем малых по размерам параметров. Отсюда можно ожидать, что средняя величина, например, высоты неровностей профиля по отношению к $R_{ср}$ нормального распределения будет смещаться в сторону меньших значений высот, где влияние выступов, образованных в резуль-

тате застывания капле металла и его перемещения в расплавленном состоянии, наиболее значительно. В итоге может быть существенное отклонение распределения параметров шероховатости от нормального закона.

Экспериментальное исследование параметров шероховатости выполнялось с использованием профилограмм, записанных профилографами типа 201 и Пертен с поверхностями заготовок из сталей 45, 1X18H9T и металлокерамических сплавов Т14К8 и Т30К4. Образцы из стали 45 и сплавов обрабатывались электроэрозионным способом медным электрод-инструментом в керосине на модернизированном станке мод. 4Б722, оснащенный генератором ШГИ-40-440, на следующих режимах:

Режим	I	II	III	IV
f , кГц	88	44	22	8
$I_{ср}$, А	5	20	30	40

При этом сплавы обрабатывались на прямой, а сталь 45 — на обратной полярности включения электродов. Образцы из нержавеющей стали 1X18H9T обрабатывались на специальной установке, формирующей единичные импульсы, по методике, описанной в работе [2]. С каждого образца записывалось 3—5 профилограмм, которые обрабатывались по методике НИИМАШ [41].

В целях более полного использования по вертикали поверхности ленты, на которой записывались профилограммы, и большего удобства при определении параметров шероховатости были определены предпочтительные увеличения профиля по вертикали В и горизонтально Г. Такими увеличениями Г и В соответственно являются 100 и 200, 100 и 400, 200 и 800, 200 и 1000, 400 и 2000 и др.

Исследования показали, что величины соответствующих изучаемых параметров шероховатости поверхностей металлокерамических твердых сплавов Т14К8 и Т30К4 совпадают, в связи с чем в дальнейшем для простоты изложения упоминается только одна марка сплава — Т14К8.

На рис. 12 показано изменение основных параметров шероховатости поверхности в зависимости от режимов электроэрозионной обработки $W_{и}$ и $t_{и}$. При изучении всех исследуемых материалов графики подтверждают качественную картину изменения параметров, выявленную при изучении геометрии единичных лунок.

В зависимости от исследуемых режимов обработки R_z , ρ_B , $\rho_{вп}$ изменяются в весьма широких пределах (рис. 12 и 13). Так, при обработке стали 1X18H9T R_z изменяется от 40 до 75, ρ_B от 200 до 400, а $\rho_{вп}$ от 200 до 450 мкм, при обработке стали 45 в исследуемом диапазоне режимов R_z находится в пределах 10—25, $\rho_B = 30 \div 140$, $\rho_{вп} = 60 \div 160$ мкм, при обработке твердых спла-

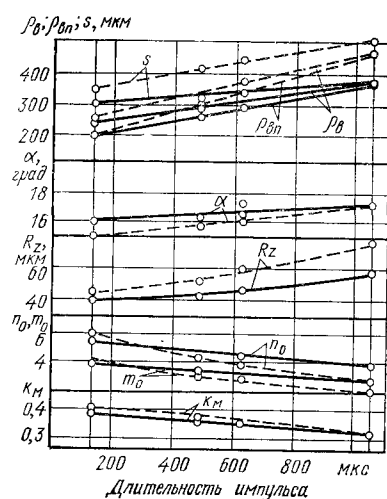


Рис. 12. Влияние длительности импульса на параметры шероховатости поверхности стали 1X18H9T; энергия импульса 0,2 Дж (—) и 0,5 Дж (---)

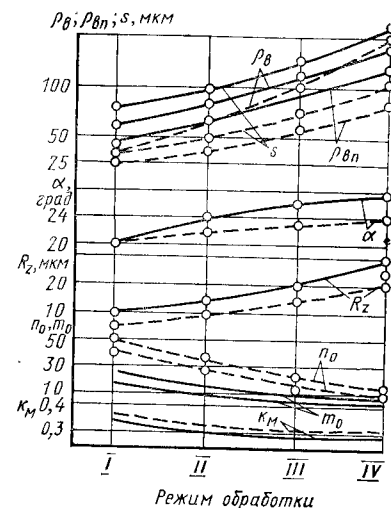


Рис. 13. Влияние режима электроэрозионной обработки на параметры шероховатости поверхности деталей из стали 45 (—) и металлокерамического сплава Т14К8 (---)

вов R_z колеблется от 5 до 25 мкм, ρ_B от 25 до 80 мкм, $\rho_{вп}$ от 20 до 100 мкм.

Такие параметры как s , ν_0 , m_0 изменяются в исследуемых режимах обработки до 1,5 раз, при этом с переходом на более грубые режимы обработки s растет, а ν_0 и m_0 уменьшаются. В весьма незначительных пределах изменяются α и k_M : α от 15 до 25°, а k_M от 0,28 до 0,4; использование более грубых режимов обработки приводит к некоторому увеличению α и уменьшению k_M .

Результаты обработки профилограмм шероховатостей поверхности исследуемых материалов, обработанных на всех используемых режимах, показали, что изучаемые параметры шероховатости не подчиняются нормальному закону распределения. Во всех случаях значения частоты изменения R , ρ_B , $\rho_{вп}$ и α возрастают с уменьшением любого параметра. Типовые полигоны распределений, полученные в результате обработки профилограмм, записанных с поверхностей стали 45, сплава Т15К6 и стали 1X18H9T, приведены на рис. 14. Их условно можно разделить на две части, одна из которых определяется распределением R_B , другая — R_Y .

Для установления закона распределения был проанализирован ряд законов. Изучение возможности применения нормально закона распределения позволило получить асимметрию A_c

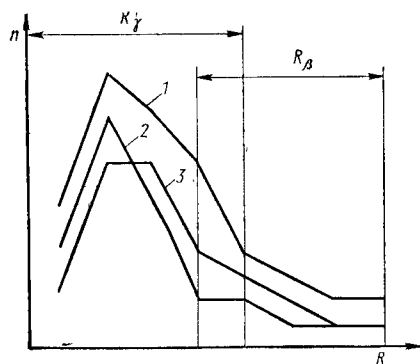


Рис. 14. Типовые полигоны распределений высоты неровностей профиля поверхностей стали 45 (1) 1X18H9T (2) и твердого сплава Ti15K6 (3)

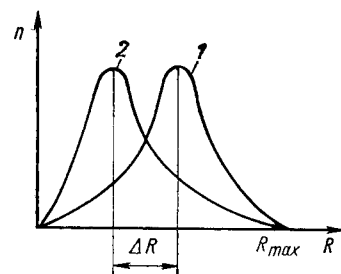


Рис. 15. Сопоставление распределений R неровностей профиля поверхностей, обработанных механическим (1) и электроэрозионным (2) способами

в пределах $0,3-0,55$, эксцесс $\epsilon = -(0,2 \div 0,4)$ и вероятность для критерия согласия Пирсона $P(\chi^2) = 0,1 \div 0,367$, что вызывает сомнение в правомерности использования указанного закона. Вместе с тем, если отбросить часть правых ветвей распределений R приведенных на рис. 14, то экспериментальное распределение R будет совпадать с нормальным законом распределения.

Однако такая операция противоречит физической природе формирования R и его распределению, как суммы распределений R_β и R_γ , поэтому ее нельзя признать правомерной. В связи с этим была изучена возможность использования других законов распределения. Установлено, что такие параметры шероховатости поверхности, обработанной электроэрозионным способом, как R , радиусы округления выступов ρ_B и впадин $\rho_{вп}$, угол α наклона боковой поверхности профиля к средней линии, подчиняются нормальному логарифмическому закону распределения. При этом $P(\chi^2) = 0,8 \div 0,95$, а $A_c = 0,05 \div (-0,12)$ и $\epsilon = -(0,003 \div 0,1)$. В табл. 5 в качестве примера приведены результаты исследования распределения R и ρ_B при обработке сплава Ti14K8 и стали 1X18H9T.

Среднее значение R шероховатости поверхности, обработанной электроэрозионным способом, смещено на величину ΔR в сторону меньших значений высот неровностей в сравнении с нормальным законом распределения высот в результате механической обработки (рис. 15). Это приводит к существенно неравномерному распределению металла по высоте шероховатости и значительному уменьшению относительной опорной длины профиля t_p при контактировании сопрягаемых поверхностей. Так, при относительном сближении $\epsilon = 0,5$ поверхностей, обработан-

Таблица 5
Изменение $P(\chi^2)$ при нормальном законе (НЗ) и нормальном логарифмическом законе (НЛЗ) распределения R и ρ_B

Материал и условия обработки	Закон распределения	Средние значения, мкм		$P(\chi^2)$
		R	ρ_B	
Сплав Ti14K8. Генератор ШГИ-40-440; полярность обратная; медный электрод-инструмент	НЛЗ	3,26	—	0,81
	НЗ	4,58	—	0,1
	НЛЗ	—	32,6	0,8
	НЗ	—	46,1	0,1
Сталь 1X18H9T; полярность прямая; медный электрод-инструмент; $W_{и} = 0,2$ Дж, $t_{и} = 130$ мкс	НЛЗ	22	—	0,85
	НЗ	38,3	—	0,367
	НЛЗ	—	224	0,9
	НЗ	—	396	0,1

ных электроэрозионным способом на режимах, изменяющихся в широком диапазоне, $t_p = 0,2$, а поверхностей, обработанных механическим способом, $t_p = 0,5$.

Сопоставление расчетных параметров шероховатости с экспериментальными показало их хорошее совпадение. Таким образом, проведенные исследования позволяют более полно сопоставить основные параметры шероховатости поверхностей, обработанных электроэрозионным способом и резанием.

Сопоставление ρ_B и α шероховатых поверхностей стальных деталей, обработанных электроэрозионным и другими способами, показывает (табл. 6), что ρ_B возрастает существенно, а α — незначительно с переходом к грубым режимам электроэрозионной обработки, в то время, как при точении, внутреннем шлифовании, строгании и виброобкатывании, наоборот, при грубой обработке ρ_B и α уменьшаются [43]. При $R_z = 10 \div 40$ мкм ρ_B шероховатости поверхности, обработанной электроэрозионным способом, значительно выше, чем поверхностей, обработанных шлифованием, точением и строганием, и только такие методы обработки, как виброобкатывание и выглаживание, обеспечивают большее значение ρ_B , чем после электроэрозионной обработки.

Таким образом, параметры шероховатости поверхности, обработанной электроэрозионным способом, существенно отличаются от соответствующих параметров поверхностей, обработанных методами резания и виброобкатыванием. Изученные параметры для каждого материала не являются постоянными и изменяются в пределах исследуемых режимов обработки в большей (R_z , ρ_B , $\rho_{вп}$, s , n_0 , m_0) или меньшей (α , k_m) степени. В ре-

Таблица 6

Сравнение основных параметров шероховатости поверхностей, обработанных электроэрозионным способом и методами резания

Показатели	Электроэрозионный способ	Резание
Закон распределения R	Нормальный логарифмический	Нормальный
Изменение с ростом R : α	Практически не изменяется	Увеличивается [43]
$\rho_{вс}$	Увеличивается	Уменьшается [43]
t_p % при ϵ , %:	Увеличивается	Увеличивается [43]
Сталь 10	Режим III	Точение [9]
Сталь 20	1—3	
Сталь 50	3—8	50
Коэффициент аппроксимации зависимости	16—30	Точение [9]
$t_p = b\epsilon^v$ при обработке стали:	Режим III	
b	0,9—1,2	1—2
v	0,25—0,7	1,2—2
Коэффициент заполнения профиля металлом k_m	0,28—0,42	0,5
Направленность шероховатости	Нет	Имеется

Примечание. Режим ЭЭО; $f=22$ кГц, $I_{ср}=30$ А.

в результате при эксплуатации деталей машин, инструментов и многих типов штампов, обработанных электроэрозионным способом, происходит интенсивное смятие неровностей, постоянное разделение контактирующих поверхностей слоем смазки, отсутствует их схватывание, обуславливая иной характер износа в сравнении с износом поверхностей, обработанных слесарно-механическим способом.

Изложенное еще раз показывает, что требования к качеству поверхности деталей, обработанных методами резания, не могут быть применимы к поверхностям, обработанным электроэрозионным способом.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗОН ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Свойства поверхностного слоя, как установлено многими исследователями [1, 2, 7, 20, 21, 27, 29 и др.], существенно изменяются в результате электроэрозионной обработки. Однако в полной мере свойства этого слоя не определены. Для удобства изучения исследователи разбивают рассматриваемый слой на зоны: одни делят его на белый слой и зону термического влияния, другие выделяют в нем несколько зон с различной структурой, третьи отмечают, что он состоит из расплавленного слоя, зоны, подвергшейся химическому воздействию, зоны макродеформации, зоны микродеформации и т. д. [21, 27 и др.]. Отмечалось, что при определенных условиях наблюдается покрытие поверхности обрабатываемой заготовки тонким слоем материала электрод-инструмента и элементами рабочей жидкости, в частности углеродом [1, 2, 44, 27, 29, 32 и др.].

На основе изложенного представляется возможным поверхностный слой после электроэрозионной обработки по толщине условно разделить на следующие зоны (рис. 16): 1 — зону насыщения элементами рабочей жидкости; 2 — зону отложения материала электрод-инструмента; 3 — белый слой, образованный из расплавленного материала заготовки; 4 — зону термического влияния; 5 — зону пластической деформации. Последовательность образования зон, их количество, структура и свойства в значительной мере зависят от обрабатываемого материала, а также от режима обработки, применяемой рабочей жидкости, материала электрод-инструмента и условий ведения процесса. Между зонами, как правило, нет четкой разницы, а в большинстве случаев они перекрывают друг друга. Вместе с тем, каждая из перечисленных зон имеет свои особенности, влияющие на те или иные свойства поверхности и во многих случаях предопределяющие возможность успешной эксплуатации детали. При этом каждая зона, даже незначительной толщины, играет весьма важную роль. Рассмотрим эти зоны в отдельности.

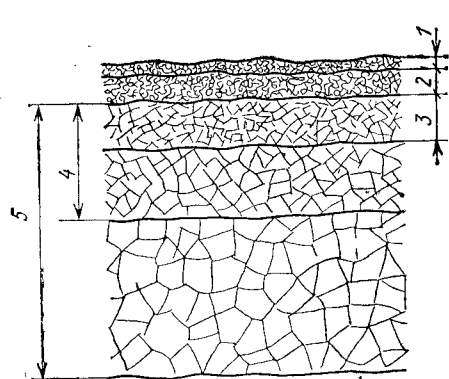


Рис. 16. Схематическое расположение зон поверхностного слоя, подвергнутого электроэрозионной обработке

ЗОНА НАСЫЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАМИ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ

Вследствие мощного теплового воздействия при выделении электрической энергии в процессе электроэрозионной обработки рабочая жидкость разлагается. Отдельные ее элементы проникают в поверхностный слой заготовки, диффундируют в него и образуют с обрабатываемым материалом химические соединения. Замечено отложение углерода в виде сажи на поверхности заготовки, обрабатываемой

электроэрозионным способом на ряде режимов. Углерод образовывался в результате разложения минерального масла, используемого в качестве рабочей жидкости. Это, наряду с другими явлениями, приводило в процессе электроэрозионной обработки на ряде режимов к шлакованию межэлектродного зазора, что нарушало стабильность процесса. Кроме того, углерод диффундировал в поверхностный слой, образуя карбиды [21, 27].

При электроэрозионной обработке в смеси воды с индустриальным маслом 12, а также в полиметилсилоксановой жидкости марок ПМС-6 и ПМС-10 на обрабатываемых поверхностях образцов также отлагаются продукты разложения используемых жидкостей в виде темных пятен. Эти пятна легко удаляются с поверхности.

В целях выявления проникновения в верхнюю часть поверхностного слоя образцов элементов жидкости ПМС-10, разлагающейся под воздействием электрических разрядов, были проведены эксперименты по электроэрозионной обработке образцов из сталей ХВГ и Р18. Жидкость ПМС-10 при температуре 20°С имеет вязкость 10 сСт, плотность 0,9418 г/см³, температуру вспышки не ниже 170°С. Обработка образцов проводилась на станке мод. 4531 на двух режимах: 1-й режим характеризовался напряжением холостого хода $U_{х.х}=130$ В, рабочим напряжением $U_p=80$ В, силой тока короткого замыкания $I_{к.з}=2,6$ А, рабочей силой тока $I_p=0,9$ А, емкостью $C=2$ мкФ, $W_{и}=6 \cdot 10^{-3}$ Дж; 2-й режим характеризовался $U_{х.х}=130$ В, $U_p=90$ В, $I_{к.з}=0,43$ А, $I_p=0,43$ А, $C=0,35$ мкФ, $W_{и}=10^{-3}$ Дж.

Спектральный анализ образцов на содержание кремния показал, что независимо от режима обработки и марки стали содержание кремния в поверхностном слое возросло до 0,84—1,1%, что превышает в несколько раз его содержание в исследуемых сталях и является результатом диффузии этого элемента

в обрабатываемый материал. Это явление представляет практический интерес, связанный с возможностью повышения таким образом коррозионной устойчивости деталей [36].

ЗОНА ОТЛОЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТА

Образование второй зоны, которая характеризуется присутствием материала электрод-инструмента, связано с переносом части энергии на заготовку факелами, состоящими из паров материала электрод-инструмента. Образование этой зоны возможно, как правило, при подключении электрод-инструмента к отрицательному полюсу источника питания (прямая полярность) в случае электроэрозионной обработки на малых межэлектродных зазорах или такого изменения условий ведения процесса, которое нарушает его стабильность. Материал электрод-инструмента может не только концентрироваться на поверхности заготовки, но и диффундировать в более глубокие слои, например в слой расплавленного материала заготовки, и образовывать там различные фазы — твердые растворы, соединения и т. п.

При обработке стальных деталей электрод-инструментом из ЭЭГ, МПГ и других углеродистых композиций углерод, диффундируя в глубь обрабатываемой поверхности, обуславливает образование карбидов. При использовании электрод-инструментов из меди и вольфрамомедных композиций может быть образована зона из материала электрод-инструмента, которая тонким слоем будет покрывать обрабатываемую поверхность. Кроме того, медь может проникать в зону расплавленного материала заготовки, образуя отдельные включения.

Для определения условий, при которых происходит перенос меди электрод-инструмента на поверхность заготовки, были проведены эксперименты. Использовались электрод-инструменты различных размеров; ими велась обработка образцов из стали 45 и 5ХНМ, закрепленных на столе станка и вращающихся в процессе самой обработки. При экспериментах $I_{ср}$ изменялся от 2 до 120 А, $t_{и}$ — от 26 до 2200 мкс, а f — от 0,4 до 8 кГц. В качестве рабочей жидкости использовалось трансформаторное масло.

Эксперименты показали, что слой меди появляется только при обработке с прямой полярностью включения электродов. При обработке образцов без вращения медь на поверхности заготовки начинает появляться при $I_{ср}=5$ А, $t_{и}=140$ мкс и $f=1$ кГц, а при $I_{ср}=10$ А, $t_{и}=310$ мкс и $f=1$ кГц слой с содержанием меди до 80% достигает толщины 10 мкм. Содержание железа в этом слое образца из стали 45 незначительное и составляет 20%, что подтверждается кривыми интенсивности I/I_c характеристического излучения элементов (рис. 17):

При обработке на режимах $I_{ср}=60 \div 100$ А, $t_{и}=2200$ мкс медь была обнаружена по всей толщине белого слоя, доходя-

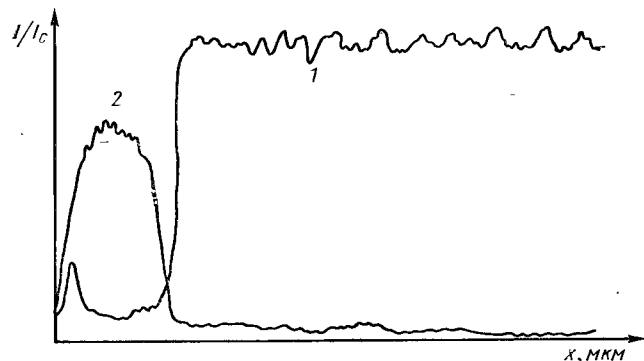


Рис. 17. Изменение содержания железа (1) и меди (2) в поверхностном слое образца из стали 45, обработанного электроэрозионным способом на режиме $T_{cp}=10A$, $t_n=310$ мкс, $f=1$ кГц по глубине x поверхностного слоя

щей до 0,3 мм. Непосредственно на поверхности наблюдались скопления меди, каждое площадью в несколько квадратных миллиметров. Эти отложения, как правило, сравнительно легко отделяются от поверхности обрабатываемой заготовки. По глубине белого слоя медь располагается отдельными вкраплениями с размером поперечного сечения от нескольких микрометров до сотых долей миллиметра.

При обработке медным пластинчатым электрод-инструментом образца из стали 45, вращающегося с частотой 30 000 об/мин, отложение меди на поверхности заготовки наблюдалось при более мягких режимах. При описываемых экспериментах электрод-инструмент с поперечным сечением 5×20 мм подводился к торцу вращающегося образца. В связи с интенсивным вращением последнего в зоне обработки образовывалась газожидкостная смесь, что вызывало существенное уменьшение межэлектродного зазора, облегчая процесс переноса меди на обрабатываемую поверхность при более мягких режимах обработки.

Слой толщиной в несколько десятков микрометров, содержащий медь, образуются при обработке заготовок на более грубых режимах ($I_{cp} > 60$ А, $t_n > 1000$ мкс) при поперечных размерах электрод-инструмента не более 3—5 см².

Стальные детали можно насыщать не только медью, но и другими элементами, содержащимися в электрод-инструменте. Обработка заготовок медновольфрамовыми электрод-инструментами позволяет при $t_n < 1000$ мкс и $W_n = 0,5$ Дж обеспечить легирование стальной поверхности вольфрамом и медью.

Образование зоны проникновения материала электрод-инструмента в обрабатываемый материал существенно влияет на свойства поверхностного слоя, а следовательно, на эксплуатационные свойства изготавливаемых деталей.

БЕЛЫЙ СЛОЙ

Толщина белого слоя металла зависит от величины W_n и t_n , а также от температуропроводности материала заготовки. После удаления микропорции металла на поверхности заготовки остается зона со структурой, резко отличающейся от исходной. Белый слой, как правило, имеет мелкозернистую структуру, обладающую высокой химической стойкостью, что затрудняет ее выявление путем травления. На микрошлифах этот слой имеет вид белых полос, откуда он и получил свое название [21, 27, 29].

При обработке стали на мягких режимах (при $W_n < 0,1$ Дж и $t_n < 100$ мкс) белый слой располагается на поверхности заготовки отдельными участками толщиной от нескольких до 40—50 мкм и длиной до 250—260 мкм. Размеры оплавленных участков, образовавшихся при обработке различных сталей, приведены в табл. 7. Толщина белого слоя при обработке

Таблица 7
Размеры, протяженность и толщина белого слоя

Сталь	Рабочая жидкость	Размеры зоны, мкм	
		Максимальная толщина	Протяженность
5ХНМ	Индустриальное масло	25	42—180
	Керосин	20	80—255
	Парафин (100° С)	27	110—240
	ПМС-6 (70° С)	35	120—240
ШХ15	Индустриальное масло	30	38—214
	Керосин	29	130—240
	ПМС-6 (28° С)	40	200—230
	ПМС-6 (70° С)	40	160—250
Ст45	Индустриальное масло	28	50—250
	Керосин	25	95—210
	Парафин (100° С)	46	54—300
	ПМС-6 (70° С)	19	50—130

Режимы обработки: $W_n = 0,06 \div 0,07$ Дж, $t_n = 40 \div 50$ мкс.

предварительно нагретых заготовок на мягких режимах мало зависит от температуры T_z заготовки. Более существенное влияние T_z на толщину белого слоя оказывает на грубых режимах обработки $t_n > 100$ мкс и $W_n > 0,2$ Дж. Так, при обработке стали У10, закаленной до HRC 60—65, в рабочей жидкости

ПМС-10 при $I_{cp}=10$ А и $t_{и}=140$ мкс толщина слоя находилась в пределах 25—30 мкм независимо от температуры заготовки, которая изменялась от 20 до 150°С. Однако при обработке заготовок в тех же условиях, но при $t_{и}=2200$ мкс, максимальная толщина слоя изменялась от 165 мкм при $T_3=20^\circ$ С до 310 мкм при $T_3=150^\circ$ С (табл. 8).

Таблица 8

Толщина белого слоя (мкм) в закаленной стали У10, обработанной на станке мод. 4Б722 с генератором ШГИ-125-100 при $I_{cp}=10$ А, в рабочей жидкости ПМС-10

$t_{и}$, мкс	Температура заготовки, °С			$t_{и}$, мкс	Температура заготовки, °С		
	20	80	150		20	80	150
140	27—38	38—43	27—40	1740	108—114	119—189	124—200
310	22—50	38—54	27—54	2200	150—165	162—270	118—310
780	65—81	81—102	54—81				

На грубых режимах белый слой сплошь покрывает обработанную поверхность. Толщина слоя при обработке деталей при $I_{cp}>100$ А колеблется от нескольких десятых до 1,5 мм.

Приведенные данные показывают, что размеры белого слоя зависят от свойств обрабатываемого материала, рабочей жидкости и особенно от режима обработки. При этом $t_{и}$ оказывает определяющее влияние. Так, при обработке сплава ЭИ437 и стали 12Х18Н9Т при $W_{и}$, изменяющейся в 10 раз, толщина белого слоя изменилась в 2—3 раза в зависимости от $t_{и}$, а при изменении $t_{и}$ в 8 раз — в 5—9 раз в зависимости от $W_{и}$. Аналогичная картина имеет место и при обработке заготовок из углеродистых и легированных сталей [2].

В белом слое легко образуются сплавы компонентов материала с материалом электрод-инструмента и элементами рабочей жидкости, а также карбиды и окислы. Так, при обработке стали Х12М образуются карбиды железа, хрома, молибдена типа M_7C_3 , а при обработке стали ХВГ — карбид $Cr_{23}C_4$. Кроме того, при обработке стали Х12М в расплавленной зоне обнаружены окислы Fe_3O_4 и $FeCr_2O_4$ [1].

Спектральный анализ образцов из стали ХВГ после электроэрозионной обработки в жидкости ПМС-10 при $W_{и}=6 \cdot 10^{-3}$ Дж показал существенное изменение содержания ряда элементов в поверхностном слое в сравнении с исходным состоянием. Так, содержание марганца уменьшилось с 0,8—1,1% до 0,2—0,5% хрома — с 0,9—1,2 до 0,5—0,7%, а содержание кремния увеличилось более чем в 2 раза.

Изменение химического состава наблюдалось также после электроэрозионной обработки сплава ЭИ437Б и стали

12Х18Н9Т, однако четкой зависимости изменения содержания элементов в поверхностном слое от $W_{и}$ и $t_{и}$ не обнаружено [2].

После быстрого охлаждения рассматриваемый слой в отдельных случаях имеет ледебуритное строение с образованием первичных кристаллов цементита в ледебуритной основной массе. При электроэрозионной обработке стальных деталей медным электрод-инструментом в воде белый слой может также иметь мартенситную структуру.

Под оплавленным слоем структура обрабатываемого металла изменяется вследствие выделения из раствора карбидов и превращений, соответствующих разным стадиям отпуска [27, 37].

При обработке на всех режимах, и особенно на грубых, в рассматриваемом слое наблюдаются поры, кратеры, различные включения, нарушающие ее сплошность. С целью выявления пористости была определена дифференциальная емкость поверхности образцов в растворе 1 н $Na_2SO_4+0,02$ н $NaCl$. Для испытаний были взяты образцы из сталей ХВГ, Р18 и 3Х13, обработанные непрерывно движущейся электрод-проволокой на станке мод. 4531 с генератором ТГ-130 на двух режимах при напряжении холостого хода $U_{х.х}=120 \div 130$ В и напряжении рабочего хода $U_p=80 \div 90$ В. Первый режим характеризуется силой тока короткого замыкания $I_{к.з}=2,6$ А, силой рабочего тока $I_p=0,9$ А; $C=2$ мкФ; $W_{и}=6 \cdot 10^{-3}$ Дж, а второй — $I_{к.з}=0,45$ А; $I_p=0,15$ А; $C=0,35$ мкФ; $W_{и}=10^{-3}$ Дж. В качестве контрольных использовались образцы, обработанные точением.

На рис. 18 представлены результаты замеров дифференциальной емкости у исследуемых образцов. Следует отметить, что исходная пористость у образцов из стали ХВГ, обработанных электроэрозионным способом на обоих режимах, больше, чем у точеных, у образцов из стали Р18 — меньше, а у образцов из нержавеющей стали 3Х13 — та же. При этом, чем грубее режим обработки, тем больше пористость поверхностного слоя образцов из стали ХВГ и Р18.

Дифференциальная емкость образцов из стали 3Х13, обработанных электроэрозионным способом, не изменяется во времени, у всех же остальных увеличивается. При этом у точеных образцов, особенно из стали ХВГ и Р18, через некоторое время рост дифференциальной емкости резко замедляется, а у образцов, обработанных электроэрозионным способом, растет длительно, особенно у образцов из стали ХВГ. Такой характер изменения дифференциальной емкости можно объяснить постепенным раскрытием пор, которые находились в белом слое под воздействием раствора электролита [36]. При обработке на грубых режимах через рассматриваемый слой и нижележащие зоны могут проходить микротрещины.

Во всех случаях белый слой резко отличается по виду от остальной части поверхностного слоя. После термообработки детали из углеродистой стали, обработанной электроэрозион-

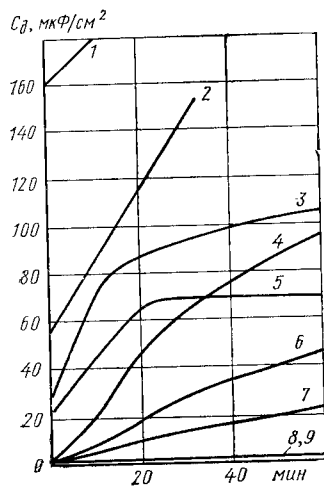


Рис. 18. Дифференциальная емкость C_d образцов из стали ХВГ (1, 2, 3), Р18 (4, 5, 6) и 3Х13 (7, 8, 9), обработанных механическим способом (3, 5, 7) и электроэрозионным способом на первом (1, 4, 8) и втором (2, 6, 9) режимах

ным способом, рассматриваемый слой существенно изменяется. Так, при отпуске резкая граница между ним и остальной частью поверхностного слоя исчезает, начинает образовываться переходная зона. В результате отжига часть углерода диффундирует из белого слоя в глубь поверхностного слоя, микротвердость зоны уменьшается [32].

ЗОНА ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ

Зона термического влияния значительно превышает по размерам белый слой. На структуру рассматриваемой зоны оказывают влияние материал обрабатываемой заготовки, его исходное состояние, свойства рабочей среды, а также режим обработки. Глубина структурных изменений определяется толщиной слоя металла заготовки, температура в которой превышает температуру структурных изменений. В первом приближении глубину H_T зоны термического влияния можно определить исходя из следующих соображений. Теплота, выделяющаяся при электрическом разряде, проникает в обрабатываемую заготовку на глубину H_0 [18]:

$$H_0 = 40 \sqrt{\pi a t_{\text{и}}} \text{ мкм,}$$

где $t_{\text{и}}$ — длительность импульса, мкс; a — коэффициент температуропроводности, $\text{см}^2/\text{с}$.

После удаления микропорции металла объемом, ограниченном размерами единичной лунки глубиной $h_{\text{л}}$, величина H_T будет определяться выражением

$$H_T = H_0 - h_{\text{л}}$$

На мягком режиме обработки зона термического влияния имеет малые размеры, что обуславливает близкие по величине высокие скорости охлаждения всех участков рассматриваемой зоны. В итоге при обработке стали У10 импульсами энергии $W_{\text{и}} < 10^{-3}$ Дж в зоне термического влияния образуется мелкозернистая мартенситная структура.

Выяснено [27], что при обработке стальных деталей и использовании малых $W_{\text{и}}$ и $t_{\text{и}}$ в углеродсодержащих рабочих

жидкостях мелкозернистая мартенситно-трооститная структура образуется независимо от исходной твердости обрабатываемой детали. С ростом $t_{\text{и}}$ (при соответствующем увеличении $W_{\text{и}}$) картина изменяется: растет толщина рассматриваемой зоны, различные ее участки начинают охлаждаться с существенно отличающимися друг от друга скоростями, что обуславливает образование разнообразнейших структур металла [27].

При обработке стали импульсами $W_{\text{и}} = 10^{-2} \div 10^{-3}$ Дж толщина зоны термического влияния возрастает. После обработки в минеральных маслах и керосине увеличивается количество в структуре остаточного аустенита, зачастую выходящего на поверхность. При обработке стали У8 импульсами $t_{\text{и}} = 100$ мкс и $W_{\text{и}} = 5$ Дж рассматриваемая зона имеет аустенитно-мартенситную структуру с содержанием остаточного аустенита, зависящим от состава и свойств рабочей жидкости. После обработки стали в керосине количество остаточного аустенита составило 31%, в индустриальном масле 12—24%, в смеси воды с индустриальным маслом 18%. После обработки в воде аустенит в поверхностном слое отсутствует.

Остаточный аустенит обнаружен в поверхностном слое заготовок из закаленных сталей, обработанных в керосине на станке мод. 4531 на режиме $U_{\text{х.х}} = 150$ В, $I_{\text{к.з}} = 2,0$ А, $C = 2$ мкФ [1].

В зависимости от условий ведения электроэрозионной обработки зона термического влияния имеет закаленные участки с мелкозернистой структурой, участки вторичной закалки, которые зачастую при обработке на грубых режимах чередуются с участками отпуска [7, 21, 27]. На рис. 19 показаны микрофотографии поверхностного слоя деталей из углеродистой стали У10, обработанных на ряде режимов.

В итоге, после электроэрозионной обработки углеродистой стали появление тех или иных структур и их чередование в пределах зоны термического влияния будут определяться состоянием стали, режимом обработки и свойствами рабочей жидкости. Последовательность расположения структур от поверхности в глубь металла после обработки закаленной стали на мягких режимах ($W_{\text{и}} < 10^{-3}$ Дж) в углеродсодержащих рабочих жидкостях в основном будет следующей: мартенсит, основной металл; при обработке на более грубых режимах: аустенит, мартенсит, троостито-сорбит, отпущенный металл, основной металл, а при обработке на тех же режимах в воде: мартенсит, троостито-сорбит, отпущенный металл, основной металл.

При обработке в углеродсодержащей жидкости на грубых режимах при $W_{\text{и}}$ в несколько джоулей на поверхности образуется ледебурит, после которого следуют указанные выше структуры. При обработке незакаленной углеродистой стали расположение структурных составляющих аналогично вышеприведенным, отличие заключается в отсутствии зоны отпуска.

Толщина зоны термического влияния у закаленной стали

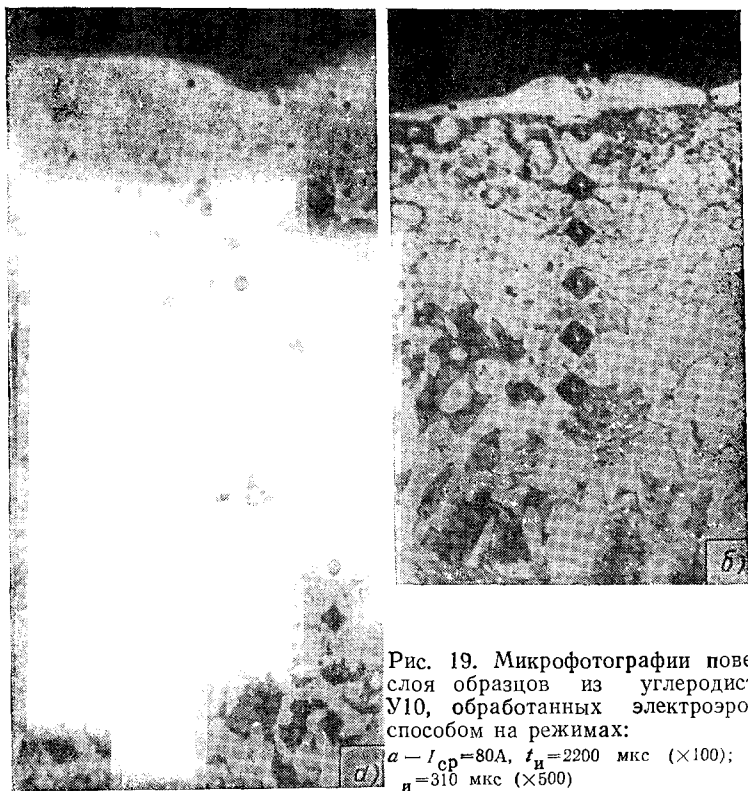


Рис. 19. Микрофотографии поверхностного слоя образцов из углеродистой стали У10, обработанных электроэрозионным способом на режимах:

а — $I_{\text{ср}} = 80 \text{ А}$, $t_{\text{и}} = 2200 \text{ мкс}$ ($\times 100$); б — $I_{\text{ср}} = 5 \text{ А}$, $t_{\text{и}} = 310 \text{ мкс}$ ($\times 500$)

(в частности, ШХ15) больше, чем у незакаленной в связи с нагревом основной структуры (мартенсита) до температуры ниже критических точек [37].

ЗОНА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

В процессе электроэрозионной обработки поверхность металла испытывает значительные ударные воздействия, связанные с перемещением волны напряжений от расширения и сжатия металла при нагреве и охлаждении обрабатываемой заготовки под воздействием электрического разряда; от давления газа, образовавшегося в результате испарения рабочей жидкости; от давления струй факелов, движущихся со скоростью, близкой к скорости звука; от возникающих в процессе обработки электростатических и электромагнитных сил, а также от протекающих в зоне термического влияния структурных изменений и других факторов. Под их воздействием происходит пластическая деформация поверхностного слоя обрабатываемой заготовки, в ряде случаев выходящая за пределы зоны термического влияния.

Зона пластической деформации проявляется в виде измельчения зерен, образования больших дислокаций, а также изменения параметров решетки. Так, И. С. Стекольников обнаружил существенное изменение зерна алюминия далеко за пределами единичной лунки, М. М. Писаревский выявил, что величина параметра решетки аустенита равна $3,64^\circ$ вместо $3,59^\circ$, соответствующей исследуемой марки стали. Также выявлено, что глубина зоны пластических деформаций при обработке углеродистых сталей зависит от их химического состава: с увеличением содержания углерода глубина зоны растет, а с увеличением содержания кремния уменьшается.

Подсчетом дислокаций с высокой точностью определена толщина зоны пластической деформации при обработке углеродистой стали в зависимости от величины $W_{\text{и}}$. При $W_{\text{и}} = 4 \cdot 10^{-2}$ Дж толщина рассматриваемого слоя составляет 40 мкм, при $W_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-4}$ Дж — 20 мкм, а при $W_{\text{и}} = 2 \cdot 10^{-4}$ Дж — 10 мкм (по данным О. Кошика).

2. МИКРОТВЕРДОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Рассмотренные изменения структуры поверхностного слоя и связанные с ними пластические деформации оказывают существенное влияние на степень наклепа ΔH и микротвердость HV , которые связаны выражением

$$\Delta H = \frac{HV_{\text{п}} - HV_{\text{о}}}{HV_{\text{о}}} 100\%,$$

где индексы «п» и «о» относятся к микротвердости поверхностного слоя и основного металла соответственно.

Существенное влияние на изменение микротвердости поверхностного слоя (толщину зоны наклепа) оказывает материал заготовки электрод-инструмента, состав рабочей жидкости и режим обработки.

Глубина зоны наклепа у углеродистых сталей зависит от изменения содержания в них углерода и кремния. Так, при увеличении углерода в стали до 0,8% глубина зоны наклепа при электроэрозионной обработке импульсами с $t_{\text{и}} > 500$ мкс находится в пределах 80—200 мкм, а при $t_{\text{и}} = 100$ мкс — в пределах 20—50 мкм. С другой стороны, рост содержания кремния в стали до 1,5% приводит к изменению глубины зоны наклепа при $t_{\text{и}} > 500$ мкс от 150 до 80 мкм, а при $t_{\text{и}} = 100$ мкс — от 60 до 30 мкм (по данным О. Кошика).

Установлено [2], что микротвердость поверхности жаропрочного сплава ЭИ437Б повышается после электроэрозионной обработки с 4,05—4,4 до 4,7—5,07 ГПа, а стали 12Х18Н9Т — с 1,7—3,0 до 4,7—5,0 ГПа при использовании в качестве электрод-инструмента латуни ЛС59-1, алюминия АД0 и углеграфитовой композиции ЭЭГ. При использовании электрод-инстру-

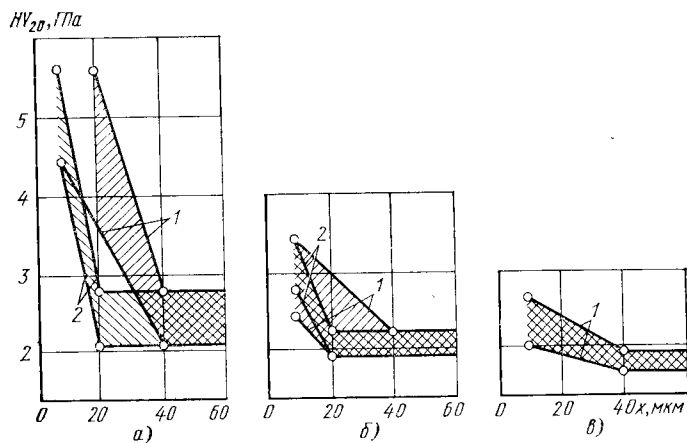


Рис. 20. Изменение микротвердости в поверхностном слое образцов из стали P18 (а), ХВГ (б) и 3X13 (в) после электроэрозионной обработки на первом (1) и втором (2) режимах. (Горизонтальные линии определяют границы изменения микротвердости основного металла)

мента из серого чугуна микротвердость резко увеличивается и составляет при обработке сплава ЭИ437Б 6,5—7,0 ГПа и стали 12X18Н9Т 16—17 ГПа.

По данным А. П. Исаева, степень наклепа образцов из жаропрочных сплавов, обработанных на режиме $I_{ср}=0,5$ А, $f=22$ кГц, составляет 7% у сплава ЭИ327 вместо 21% при абразивном шлифовании и 11% у сплава ЭИ765 вместо 24%. Степень наклепа сплава ЭИ893 после электроэрозионной обработки и абразивного шлифования 17%.

На рис. 20 показано изменение микротвердости, измеренной с помощью прибора ПМТ-3 при нагрузке 20 гс, в поверхностном слое образцов из сталей P18, ХВГ и 3X13, обработанных в жидкости ПМС-10 на станке мод. 4531 на двух режимах при $U_{к.к}=120 \div 130$ В, $U_p=80 \div 90$ В: 1) $I_{к.к}=2,6$ А, $I_p=0,9$ А, $C=2$ мкФ, $W_{и}=6 \cdot 10^{-3}$ Дж; 2) $I_{к.к}=0,45$ А, $I_p=0,15$ А, $C=0,35$ мкФ, $W_{и}=10^{-3}$ Дж. Для установления степени разброса значений HV_{20} было исследовано по 10—12 образцов взятых сталей, обработанных на каждом режиме. Установлено, что белый слой имеет прерывистый характер и располагается на поверхности отдельными пятнами, максимальная толщина которых 20—25 мкм при обработке на первом режиме и около 10 мкм на втором. Максимальные разброс и величина HV_{20} наблюдаются у стали P18, самые малые разброс и значение HV_{20} — у стали 3X13. Максимальные значения HV_{20} у всех исследуемых сталей не зависят от режима обработки. При обработке сталей P18, ХВГ на первом режиме глубина наклепа составляет 40 мкм, а на втором режиме — 20 мкм. Глубина наклепа у

стали 3X13 на обоих режимах находится в пределах 20—40 мкм.

Следует отметить, что в ряде случаев микротвердость тонкого поверхностного слоя была несколько ниже микротвердости последующих слоев. При обработке на станке мод. 4531 закаленных до твердости HRC 50—56 заготовок из стали ХВГ и У10 в керосине и воде такое изменение микротвердости наблюдается в большинстве случаев. Указанное явление объясняется образованием остаточного аустенита, количество которого зависит от свойств рабочей жидкости и обрабатываемого материала [1].

На изменение микротвердости поверхностного слоя, а также толщины наклепа значительное влияние оказывают свойства рабочей жидкости, охлаждающей поверхность лунки после прохождения импульса тока. Образование тех или иных структур в поверхностном слое, определяющих значение микротвердости, во многом зависит от скорости охлаждения нагретой поверхности, а также от охлаждающей способности рабочей жидкости (рис. 21).

Установлено [30], что с ростом вязкости рабочей жидкости уменьшается скорость отвода тепла от охлаждаемой поверхности. Кроме того, при использовании различных масел на охлаждаемой поверхности единичных лунок образуется газопаровая пленка, обуславливающая пленочное кипение при использовании масла промышленное 20 в диапазоне температур 750—500°С и пузырьковое кипение с дальнейшим понижением температуры (500—380°С), при котором скорость охлаждения максимальна. При последующем понижении температуры до комнатной наступает конвективный теплообмен с умеренной скоростью охлаждения нагретой поверхности. Если в качестве рабочей жидкости используется вода, диапазон температур пузырькового кипения совпадает с диапазоном температур при конвективном теплообмене в случае охлаждения маслом. Это может привести к резкому начальному снижению температуры поверхности единичной лунки до 170—350°С при использовании воды и до 600—400°С при охлаждении маслом. Исходя из этого, градиент температур при охлаждении водой будет значи-

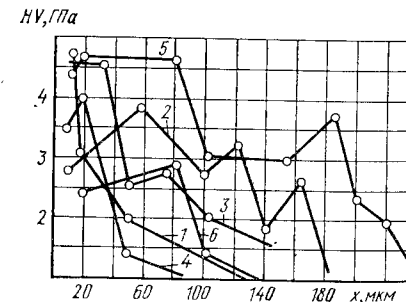


Рис. 21. Изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя при электроэрозионной обработке медным электрод-инструментом стали 45 при $I_{ср}=20$ А, $f=8$ кГц в дистиллированной воде $T_0=70^\circ$ С (1), промышленном масле 12 $T_0=20^\circ$ С (2) и $T_0=70^\circ$ С (3), керосине (4), смеси воды с промышленным маслом 12 $T_0=20^\circ$ С (5), жидкости ПМС-6 $T_0=70^\circ$ С (6)

тельно больше, чем при использовании масла. Охлаждение нагретой поверхности в диапазоне температур 350—200°С происходит со скоростью 75—10°С/с при использовании масла и с большей во много раз скоростью при использовании воды [30].

Изложенное позволяет объяснить причины изменения структур и микротвердости поверхностного слоя, а также определить направления разработки новых рабочих жидкостей, обеспечивающих получение определенных свойств поверхностного слоя. Так, для получения его высокой и однородной твердости необходимо быстрое охлаждение поверхности единичной лунки при высоких ее температурах и более медленное охлаждение в сравнении с охлаждением водой в области низких температур. Этим требованиям может удовлетворить смесь масла с водой. Использование такой рабочей жидкости при температуре поверхности единичной лунки выше температуры кипения масла, очевидно, обеспечит охлаждение обрабатываемой поверхности со скоростью более высокой, чем при охлаждении маслом. Здесь проявляются охлаждающие свойства воды.

При температуре поверхности единичной лунки ниже температуры кипения масла, но выше температуры кипения воды, масло конденсируется и покрывает охлаждаемую поверхность. В этот период скорость охлаждения нагретой поверхности в основном будет определяться охлаждающей способностью масла. В итоге микротвердость поверхностного слоя будет соответствовать микротвердости, полученной после электроэрозионной обработки в воде, а толщина слоя наклепа будет близка к образуемой при использовании в качестве рабочей жидкости масла (см. рис. 21). Таким образом, максимальная толщина упроченного слоя может быть получена при обработке в индустриальном масле и смеси воды с индустриальным маслом, а минимальная — при обработке в керосине и дистиллированной воде. Некоторое уменьшение микротвердости поверхности в сравнении с микротвердостью на глубине 10—20 мкм связано с содержанием на поверхности остаточного аустенита.

Часто значения микротвердости по толщине поверхностного слоя имеют два максимума. Это определяется своеобразием расположения образовавшихся структур: поверхностный слой имеет два слоя мартенсита с прослойками троостит-мартенсита, обладающими различной твердостью.

3. ВНУТРЕННИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ

Изучению остаточных напряжений в поверхностных слоях деталей, обработанных различными методами резания и прошедших термическую, а также электроэрозионную обработку, посвящено много работ [8, 16, 21, 37 и др.], анализ которых позволяет сделать следующие выводы.

Высокие скорости нагрева и охлаждения, значительные структурные изменения металла при электроэрозионной обработке определяют появление в поверхностном слое тепловых и структурных напряжений. Распространение теплоты в тело заготовки в течение времени $t < t_{н}$ и отвод теплоты в тело заготовки в течение времени $t > t_{н}$ происходит симметрично относительно оси, проходящей через центр единичной лунки. В связи с этим нормальные напряжения будут постоянно сжимающими, а тангенциальные равны между собой и могут быть как сжимающими, так и растягивающими. В течение времени $t < t_{н}$ волна растягивающих тепловых напряжений идет впереди сжимающих напряжений в глубь поверхностного слоя. Очевидно, что при определенных условиях возможно образование сетки микротрещин внутри поверхностного слоя без выхода их на поверхность обрабатываемой заготовки. Со стороны поверхности они могут быть закрыты зоной расплавленного металла заготовки [18].

В течение времени $t \geq t_{н}$, когда происходит охлаждение поверхности единичной лунки, волна сжимающих тепловых напряжений идет впереди растягивающих в глубь поверхностного слоя. Кроме того, в процессе нагрева и охлаждения обрабатываемой поверхности образуются структурные напряжения, вызванные существенным изменением структуры поверхностного слоя. Эти напряжения в сочетании с тепловыми, компенсируя или усиливая друг друга, образуют остаточные внутренние напряжения σ_0 . Таким образом, в конечном счете величина остаточных внутренних напряжений будет определяться режимом.

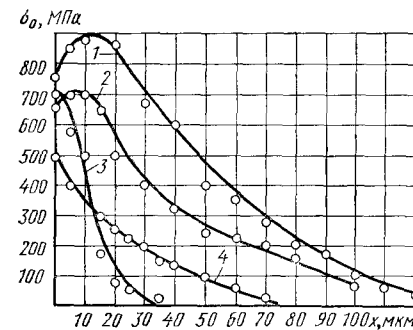


Рис. 22. Изменение остаточных внутренних напряжений σ_0 по глубине поверхностного слоя сплава ЭИ437 (1, 2) и стали ХВГ (3, 4), обработанных электроэрозионным способом на режимах:

$W_H = 0,2$ Дж, $t_H = 1050$ мкс (1); $W_H = 4,5$ Дж, $t_H = 1050$ мкс (2), $U_{x.x} = 150$ В, $I_{к.з} = 1,8$ А, $C = 0,3$ мкФ (3, 4), в индустриальном масле (1, 2), деионизованной воде (3) и керосине (4)

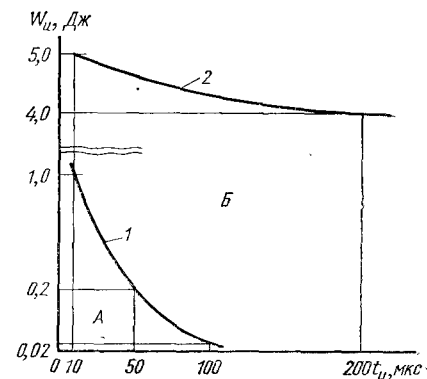


Рис. 23. Соотношения между W_H и t_H , определяющие электроэрозионную обработку твердых (1) и жаропрочных (2) сплавов без сетки микротрещин

обработки, материалом заготовки, свойствами рабочей жидкости и условиями обработки. На рис. 22 показано изменение σ_0 по глубине поверхностного слоя при обработке различных материалов на ряде режимов [1, 2]. Экспериментальные данные свидетельствуют, что определяющее влияние на величину σ_0 оказывает длительность импульса и в меньшей степени энергия импульса [2]. Величина σ_0 при определенных режимах обработки, зависящих от свойств обрабатываемого металла, может повысить предел прочности последнего и привести к образованию сетки микротрещин.

На графике, построенном по данным [2, 17, 42] (рис. 23), показаны соотношения между $W_{и}$ и $t_{и}$, определяющие границы выбора параметров импульсов, обеспечивающих электроэрозионную обработку металлокерамических твердых сплавов (кривая 1) и жаропрочных материалов (кривая 2) без образования сетки микротрещин в поверхностном слое. При обработке твердых сплавов сетка микротрещин будет отсутствовать при любых соотношениях между $W_{и}$ и $t_{и}$ в зоне А ниже кривой 1, а при обработке жаропрочных материалов — в зонах А и Б ниже кривой 2. При обработке тех же материалов импульсами, $W_{и}$ и $t_{и}$ которых располагаются выше соответствующих кривых, в поверхностном слое обрабатываемых заготовок возникнет сетка микротрещин.

Следует отметить, что при обработке металлокерамических твердых сплавов на сравнительно мягких режимах, параметры импульсов которых далеко отстоят от границы раздела (см. рис. 23), также образуются остаточные внутренние напряжения. Их максимальные значения независимо от режима обработки (режим I — $W_{и}=3 \cdot 10^{-3}$ Дж, $t_{и}=15 \div 20$ мкс; II — $W_{и}=3 \cdot 10^{-3}$ Дж, $t_{и}=8$ мкс; III — $W_{и}=5 \cdot 10^{-4}$ Дж, $t_{и}=8$ мкс) находятся в пределах 0,5—0,65 ГПа. При обработке сплава на режиме I, который характеризуется наибольшей длительностью импульса, значительные σ_0 , равные 0,3—0,4 ГПа, сохраняются на глубине 60—70 мкм и, в других случаях, на глубине около 30 мкм. Значения $\sigma_0=0,05 \div 0,1$ ГПа имеют место на глубине 80—90 мкм, а в образцах, обработанных на режимах II и III на глубине 60—70 мкм.

Максимальная дисперсность структуры и величина внутрен-

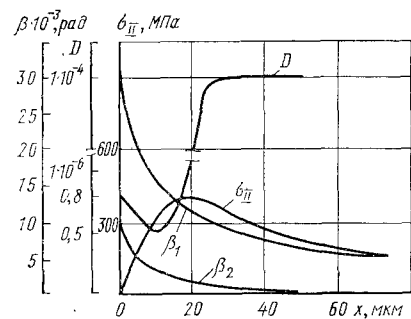


Рис. 24. Изменение истинных физических уширений β_1 и β_2 линий (211) и (110) соответственно, блоков мозаики D и напряжений второго рода σ_{II} по глубине поверхностного слоя

них напряжений второго рода наблюдаются не на самой поверхности, а на глубине около 20 мкм. На рис. 24 показано изменение истинных физических уширений β_1 линий (211), уменьшающегося от $3 \cdot 10^{-3}$ рад на поверхности до $6 \cdot 10^{-3}$ рад на глубине 70 мкм, и β_2 линий (110), уменьшающегося от 27×10^{-3} рад на поверхности до нуля на глубине 50 мкм. На этом же рисунке дано изменение размеров блоков мозаики и величины напряжений второго рода σ_{II} по глубине поверхностного слоя. Исследуемый образец из стали 45 был обработан электроэрозионным способом в дистиллированной воде при $I_{ср}=20$ А, $f=8$ кГц.

ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К КАЧЕСТВУ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

Для обеспечения максимального срока службы детали состояние ее рабочих поверхностей должно соответствовать условиям эксплуатации. Качество поверхности определяется геометрическими и физическими показателями, которые зависят от способа обработки детали. Каждый способ предопределяет свои параметры шероховатости поверхности, особенности сформированного поверхностного слоя. К таким особенностям качества поверхности, обработанной электроэрозионным способом, в отличие от полученной механическим способом, можно отнести своеобразие структуры, отсутствие направленной шероховатости, иной закон распределения параметров шероховатости, иное изменение с уменьшением R_z таких, например, параметров, как угол α наклона боковой поверхности к средней линии, радиусы округления ρ_b и $\rho_{вп}$ выступов и впадин неровностей профиля, относительная опорная длина профиля t_p при различных сближениях ϵ . Сопоставление внешнего вида, а также ряда параметров шероховатости поверхностей, обработанных механическим и электроэрозионным способами, подтверждает их принципиальное различие (см. табл. 6).

В связи с этим оценка качества поверхности, обработанной слесарно-механическим способом, основанная на требованиях, исходящих из характера ее износа, не может быть применена к поверхности, обработанной электроэрозионным способом. С целью обоснования требований к качеству рабочих поверхностей, обработанных электроэрозионным способом, целесообразно рассмотреть работу ряда типовых деталей. Поскольку электроэрозионный способ обработки наиболее широко используется в инструментальном производстве, подробно изучению подверглись рабочие поверхности деталей штампов и инструментов.

Параметры шероховатости поверхности штампов и инструментов исследовались в процессе эксплуатации последних. Рабочие поверхности экспериментальных штампов и инструментов

обрабатывались на различных режимах, диапазон изменения которых устанавливался для каждого типа исследуемого инструмента. Перед началом и в процессе работы штампов и инструментов с разных участков их рабочих поверхностей записывались профилограммы с помощью профилографов 201 и Пертен. Параметры шероховатости определялись путем обработки профилограмм по методике НИИМАШ [41].

Профилограф фирмы Пертен удобен для записи профилограмм шероховатостей поверхностей крупногабаритных деталей. Переносный измерительный блок прибора устанавливается на детали или в непосредственной близости с ним таким образом, чтобы датчик, находящийся на выдвигаемой скалке, располагался на исследуемом участке поверхности. При записи профилограммы сигналы от измерительного блока подаются на записывающий блок прибора, который обеспечивает изменение вертикального и горизонтального увеличения в широких пределах.

1. КОВОЧНЫЕ ШТАМПЫ

Были попытки радикально изменить технологический процесс обработки полостей ковочных штампов: предлагалось [5] с помощью электроэрозионного способа обработки окончательно, без какой-либо последующей слесарной доводки формировать поверхность рабочей полости штампа. Было установлено, что если у нового штампа максимальная высота неровностей 15—16 мкм, то после 2100 поковок она снижается до 7—8 мкм. После более продолжительной работы фиксировались случаи снижения максимальной высоты неровностей до 5 мкм. Размеры ручья штампа при этом находятся в допустимых пределах [5].

В ЭНИМСе, с учетом ряда достижений в области электроэрозионной обработки, проведены исследования и подтверждена возможность успешной эксплуатации ковочных штампов, рабочие поверхности которых обработаны электроэрозионным способом до $R_z=20\div 40$ мкм без последующей слесарной доводки полости [28]. Новая технология используется рядом предприятий при изготовлении простых по форме, неглубоких полостей с большими углами ϕ наклона боковых поверхностей к вертикали. Ведутся работы по применению этой технологии для обработки глубоких фасонных полостей. Однако при уменьшении угла ϕ штампуемая деталь «залипает», т. е. не удаляется из полости штампа, что вновь приводит к необходимости слесарной доводки ряда поверхностей фасонной полости. Это связано с тем, что изменение параметров шероховатости, определяющих, при прочих равных условиях, износостойкость штампа, еще не изучены, поэтому нет четких требований к параметрам шероховатости поверхности, а следовательно, детальных рекомендаций по применению электроэрозионной обработки.

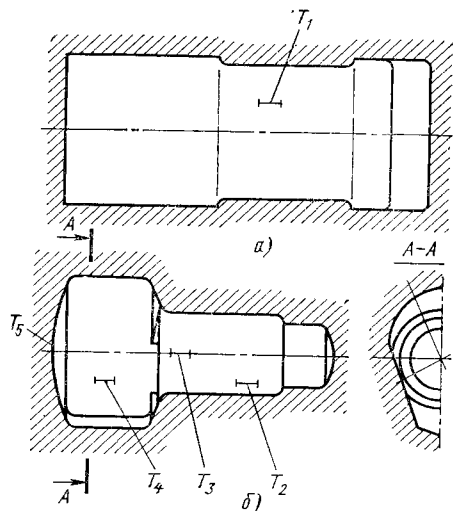


Рис. 25. Полости заготовительного (а) и окончательного (б) ручьев штампа для штамповки разжимного кулака

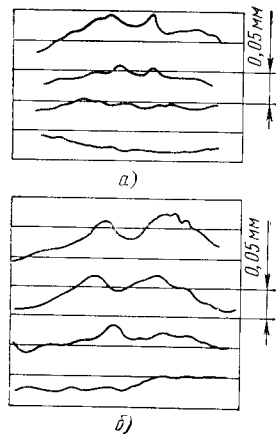


Рис. 26. Профилограммы, записанные с рабочих участков штампа в процессе эксплуатации

В целях изучения изменения высоты R_z , радиусов округления $\rho_{\text{в}}$ и $\rho_{\text{вп}}$ выступов и впадин, угла α наклона боковой поверхности неровностей к средней линии полости заготовительных ручьев ковочных штампов для штамповки разжимного кулака автомашины ЗИЛ-130 были обработаны электророзионным способом с получением $R_z = 40 \div 300$ мкм, а полости окончательных ручьев — с $R_z = 20 \div 150$ мкм. Обработка велась на копировально-прошивочном станке мод. 4А724, оснащённом генератором ШГИ-125-100.

Учитывая, что условия работы различных участков полостей резко отличаются, профилограммы шероховатостей снимались на пяти участках верхней и на пяти участках нижней половины штампа (рис. 25). Исходя из данных работы [4], можно полагать, что поверхность полости штампа на участках T_1 , T_2 в основном будет сминаться, на участках T_5 подвергаться истиранию, а на участках T_3 , T_4 испытывать совместное действие смятия и истирания. Испытания штампов из стали 5ХНМ проводились в производственных условиях на 0,7-тонном молоте конструкции ЗИЛ. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовался концентрированный раствор поваренной соли в воде.

На рис. 26, а показаны профилограммы, записанные с участка T_4 верхней половины, а на рис. 26, б — с участка T_2 нижней половины ковочного штампа, показанного на рис. 25, перед началом испытаний, а также после 5; 20 и 12 200 отштампован-

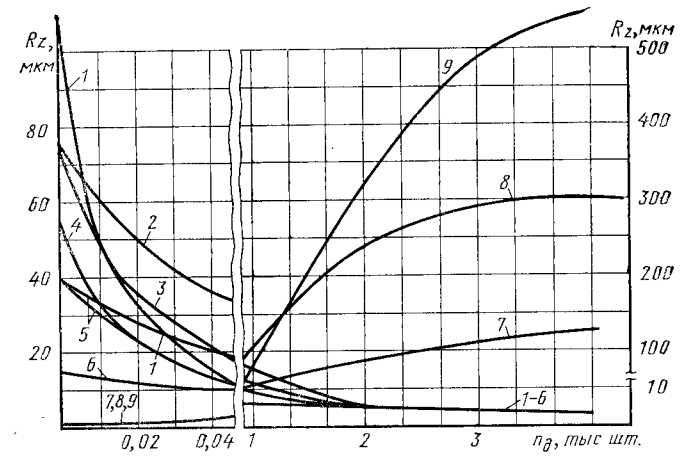


Рис. 27. Изменение R_z в зависимости от числа n_d отштампованных деталей

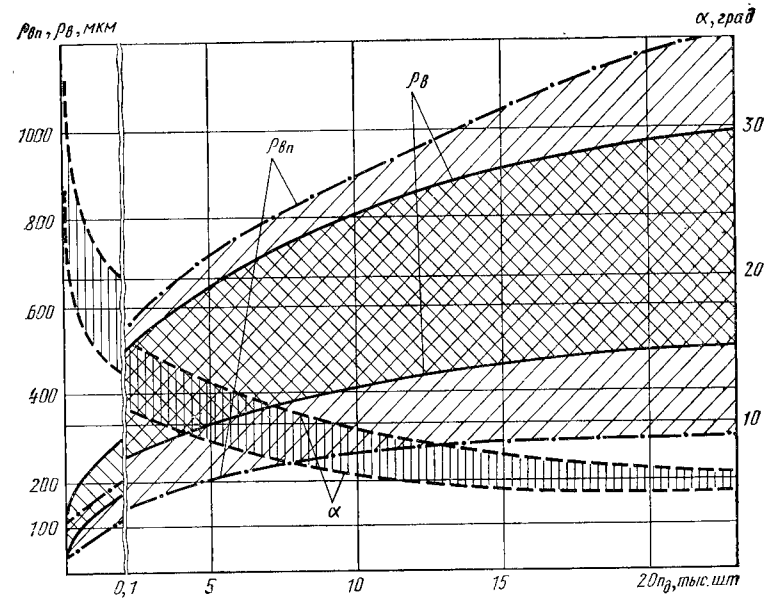


Рис. 28. Изменение $\rho_{\text{вп}}$, $\rho_{\text{в}}$, α в зависимости от числа отштампованных деталей

ных деталей. Из рассмотрения профилограмм следует, что шероховатость поверхности полости интенсивно сглаживается. Уменьшение высоты неровностей профиля сопровождается изменением формы выступов и впадин, что происходит из-за деформации выступов и смещения микропорций металла под действием нагрузок в процессе штамповки. При этом особенно интенсивные изменения размеров и формы выступов и впадин происходят в первоначальный момент времени работы штампа. На рис. 27 показано изменение R_z , а на рис. 28 — изменение ρ_v , $\rho_{вп}$ и α с ростом числа n_d отштампованных деталей.

На рис. 27, кроме результатов исследований автора, представленных кривыми 1—5, соответствующими номерам изучаемых участков полости штампа (рис. 25), условно в виде кривой 6 показано, по данным работ [5, 28], изменение высоты R_z неровностей профиля полости штампа, обработанной электроэрозионным способом, а также изменение R_z ряда участков полостей, обработанных слесарно-механическим способом [4].

Как видно из рис. 27, изменение высоты неровностей профиля поверхностей, обработанных только электроэрозионным способом, как по исследованиям автора, так и по работам [5, 28] имеет одинаковый характер.

Эксперименты показали, что независимо от исходной шероховатости и изучаемой части поверхности полости, с ростом числа штампуемых деталей существенно уменьшается R_z (особенно в начальный период работы штампа), достигая после 2000 штамповок 5 мкм, а ρ_v и $\rho_{вп}$ непрерывно растет, особенно в период до 5—10 штамповок; в последующем их рост замедляется. Более интенсивное изменение R_z и ρ_v наблюдается на участках T_1 , T_2 , T_5 обеих половин исследуемых штампов (см. рис. 25). Однако, если высота неровностей профиля в процессе работы у исследуемых штампов непрерывно уменьшается, то у штампов, обработанных слесарно-механическим способом, наоборот, непрерывно растет (кривые 7—9 на рис. 27).

Таким образом, характер изменения высоты неровностей поверхностей полостей штампов, обработанных слесарно-механическим и электроэрозионным способами, принципиально различен. Это определяется разным характером изнашивания поверхностей сравниваемых штампов, обусловленным резко отличающимися показателями качества изнашиваемых поверхностей.

Своеобразный характер изменения неровностей поверхности обусловлен также малой относительной опорной длиной профиля t_p , что является следствием уменьшения коэффициента заполнения профиля металлом k_m с 0,45 до 0,3 при переходе к грубым режимам электроэрозионной обработки и одновременного увеличения угла α от 16 до 34° в изученном диапазоне режимов обработки. Следовательно, при первых же штамповках в связи с малой площадью контакта штампуемого ме-

талла с металлом штампа выступы неровностей поверхности полости интенсивно сминаются, особенно на участках, обработанных на более грубых режимах.

Ввиду отсутствия явления схватывания штампуемого металла с металлом штампа вырывов частиц металла с поверхности штампа не наблюдается, поэтому механизм изменения геометрии неровностей профиля сохраняется в течение всего периода эксплуатации штампа между работами по восстановлению размера полости.

Смятие наиболее высоких выступов профиля ведет к существенному увеличению ρ_v и опорной длины профиля. Изучение изменения d_v , h_v , $d_{вп}$, $h_{вп}$, определяющих ρ_v и $\rho_{вп}$ (см. рис. 4), показывает, что с ростом числа n_d отштампованных деталей растет только d_v , а остальные показатели уменьшаются (рис. 29). Следовательно, при смятии средняя часть выступов профиля выпучивается, увеличивая d_v , что приводит к росту ρ_v . С увеличением d_v уменьшаются $d_{вп}$ и $h_{вп}$, но интенсивность их изменения различна: $h_{вп}$ уменьшается больше с ростом числа отштампованных деталей, чем $d_{вп}$, что в итоге приводит к росту $\rho_{вп}$. Таким образом, с ростом числа отштампованных деталей увеличивается поверхность контакта штампуемого металла с металлом штампа, уменьшается удельное давление на каждый выступ профиля и, как следствие, после определенного времени работы штампа, снижается скорость изменения R_z и ρ_v .

Вполне очевидно, что температурное и механическое воздействие на поверхность ручьев штампа в процессе его эксплуатации влияет на структуру и свойства поверхностного слоя, от чего также зависит стойкость штампа. На рис. 30 показаны фотографии микроструктуры поверхностных слоев ручья штампа, обработанного электроэрозионным способом при $I_{ср} = 30$ А, $t_{и} = 1000$ мкс на обратной полярности медным электрод-инструментом.

Структура поверхностного слоя ручья изменяется уже после 10—15 отштампованных деталей; в дальнейшем она изменяется незначительно. На механизм износа полости штампа, обработанной электроэрозионным способом, существенное влияние оказывают также особенности деформации металла в различных участках штампа. Однако рассмотрение этих вопросов выходит за пределы настоящей работы.

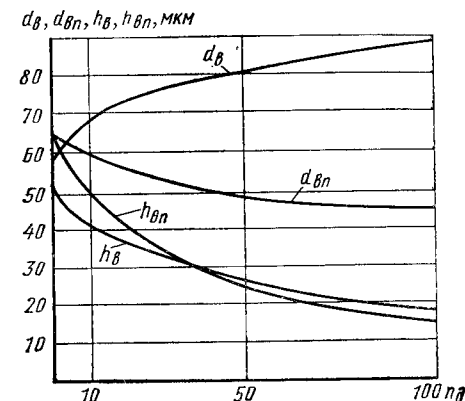


Рис. 29. Изменение d_v и h_v выступа, $d_{вп}$ и $h_{вп}$ впадины в зависимости от числа отштампованных деталей

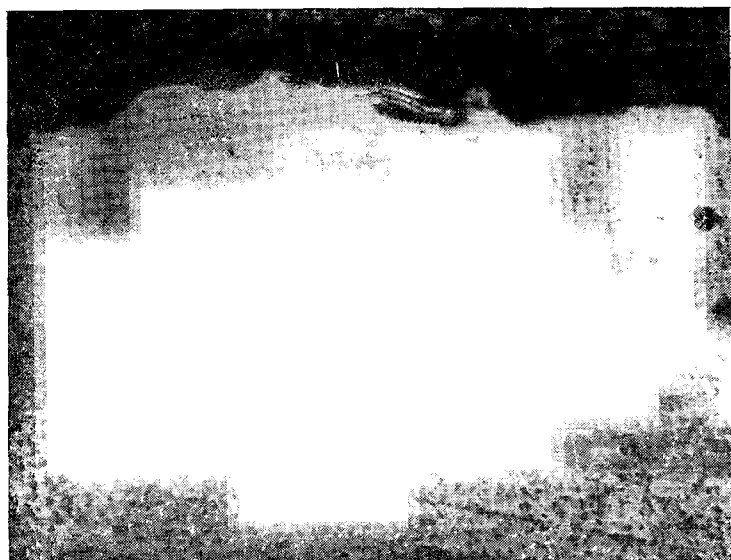


Рис. 30. Фотографии микроструктуры поверхностных слоев ручья ковочного штампа, обработанного на режиме $I_{ср}=30A$ и $t_d=1000$ мкс ($\times 100$)

Следует отметить, что после штамповки 5—10 деталей они в последующем легко выбрасываются из полости исследуемого штампа независимо от исходной шероховатости его поверхности. В целях выяснения процесса залипания штампуемой детали в полости штампа были проведены соответствующие испытания ковочных штампов на молотах и прессах. В первом случае заготовка выбрасывается из полости штампа силами упругости при ударе подвижной бабы молота с верхней половиной штампа по штампуемой заготовке. Во втором случае заготовка выбрасывается выталкивателем. При испытаниях молотового штампа для штамповки разжимного кулака подтвердились данные М. И. Бурды о том, что залипание штампуемых деталей в полости ковочного штампа, обработанной электроэрозионным способом с $R_z=20\div 50$ мкм, происходит практически так же, как и в полости окончательно обработанной слесарно-механическим способом с $R_z=5\div 15$ мкм.

Первые 5—10 штамповок залипали в полости штампа, и для их удаления требовалось несколько дополнительных ударов. Отштампованные детали стали извлекаться из полости значительно легче после того, как боковые ее поверхности, наклоненные к вертикали под углом меньше 15° , были зачищены механическим способом. При этом с отдельных участков поверхности полости были удалены наиболее выступающие вершины

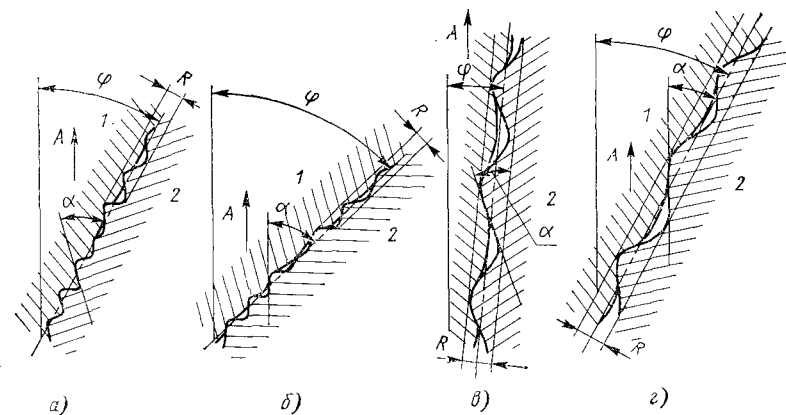


Рис. 31. Схема контактирования штампуемой детали с поверхностью штампа

неровностей и снят незначительный припуск в пределах шероховатости, полученной после электроэрозионной обработки.

Испытания штампа с выбрасыванием отштампованной детали выталкивателем проводились на 2000-тонном прессе АЯК (США) с применением в качестве смазки смеси турбинного масла с графитом. Результаты оказались весьма близкие к полученным при испытании штампов на молотах. Это дает основания сделать общие выводы для обоих типов штампов.

Полученные экспериментальные данные позволили определить угол φ наклона боковых поверхностей полости штампа к вертикали, при котором штампуемая деталь не будет залипать в штампе. Полного контакта штампуемого металла со всеми участками поверхности полости штампа не может произойти в связи с упругой деформацией штампуемого материала и наличием неровностей поверхности штампа после снятия нагрузки, заполнением впадин неровностей смазкой, твердыми веществами, входящими в смазку, и окалиной в процессе штамповки. Исходя из этого можно предположить, что штампуемый металл будет контактировать с верхней частью выступов примерно до средней линии профиля шероховатости поверхности штампа (рис. 31). Однако при выбрасывании штампуемой детали 1 из ручья штампа 2 по стрелке А независимо от величины R_z отштампованную деталь нельзя свободно извлечь из полости, если $\alpha > \varphi$ (рис. 31, а, в). Следовательно, деталь при данной величине R и α будет легко, без выталкивателей, удаляться из полости штампа, обработанной только электроэрозионным способом, если (рис. 31, б, г) $\varphi \geq \alpha_{ср}$, где φ — угол наклона боковой поверхности к вертикали, $\alpha_{ср}$ — средняя величина угла наклона боковой поверхности неровности к средней линии профиля. При наличии выталкивателей угол φ может быть уменьшен.

Из приведенных материалов следует, что параметрами ше-

роховатости поверхности, определяющими работоспособность ковочного штампа, являются ρ_v и α . Величина R_z не оказывает влияния на качество штампуемых деталей. Таким образом, учитывая полученные результаты, целесообразно вести электроэрозионную обработку полости штампа, обеспечивая $\rho_v > 300$ мкм и $\alpha < 10^\circ$.

2. РАСКАТНЫЕ ВАЛКИ

Раскатные валки используются для горячей раскатки колец подшипников. Цилиндрическая заготовка из стали ШХ15, нагретая до температуры 950°C , надевается на раскатной валок 1 (рис. 32). Для получения конического кольца 2 к роликоподшипнику рабочая часть раскатного валка имеет конус. Ведущий диск 3 вращается с частотой 200 об/мин и перемещается в сторону раскатного валка, обеспечивая деформацию кольца 2. Зона контактирования ведущего диска и раскатного валка с кольцом охлаждается водой, подаваемой через специальное сопло 4. Раскатной валок 1 приводится во вращение кольцом 2, которое вращается от ведущего диска 3. В процессе раскатки металл деформируется и перераспределяется по высоте кольца, что приводит к интенсивному и неравномерному изнашиванию валков.

Обычно раскатные валки изготовляют из стали 5ХНМ, закаливают до $HRC\ 50-54$ и после термообработки протачивают их рабочую поверхность, обеспечивая $R_z = 10-20$ мкм. Для определения требований к качеству рабочей поверхности валков электроэрозионная обработка их велась на ряде режимов с изменением $I_{\text{ср}}$ от 2 до 100 А и $t_{\text{и}}$ от 40 до 2200 мкс на станке мод. 4Б722, оснащенный генератором ШГИ-125-100 на прямой и обратной полярности в рабочей жидкости ПМС-10 и трансформаторном масле. В качестве электрод-инструмента использовалась медная пластина толщиной 15—20 мм и длиной, равной длине боковой стороны конической рабочей поверхности раскатного валка. Валок, установленный в приспособлении, вращался с частотой 20 об/мин, а электрод-инструмент, за-

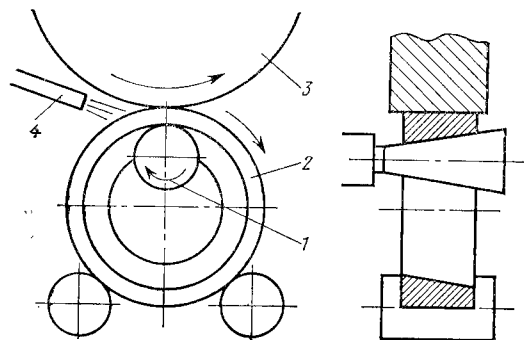


Рис. 32. Схема горячей раскатки конических колец подшипников

крепленный в шпинделе станка, перемещался от автоматического регулятора подачи. В итоге параметры шероховатости обработанных поверхностей валков изменялись в широких пределах: R_z — от 10 до 300 мкм, ρ_v — от 50 до 500 мкм, α — от 15 до 20° .

Следует отметить, что стойкость раскатных валков, доходившая до 4500 колец, наблюдалась только у валков, обработанных на особо грубых режимах, при которых $I_{\text{ср}} = 80-100$ А, а $t_{\text{и}} = 2200$ мкс. В связи с этим дальнейшие исследования проводились с валками, обработанными на данных режимах.

Поскольку деформация заготовки происходит неравномерно по высоте кольца, степень изменения параметров шероховатости различных участков рабочей поверхности различна. Однако на всех участках наблюдалось уменьшение R_z и α , рост ρ_v и $\rho_{\text{вп}}$. При этом существенные изменения рассматриваемых параметров шероховатости поверхности валков, обработанных резанием, наблюдаются после раскатки 100—150 колец, а валков, обработанных электроэрозионным способом, после 500—600 колец. После горячей раскатки 50—100 колец подшипников, до раскатки 400-го кольца валками, обработанными механическим способом, и до 2500—4500-го кольца валками, прошедшими электроэрозионную обработку на грубых режимах, параметры шероховатости изменялись незначительно и находились в пределах $R_z = 5-10$ мкм, $\rho_v = 1000-2000$ мкм, $\alpha = 2-5^\circ$, $\rho_{\text{вп}} = 2000-3000$ мкм. На рис. 33 показаны профилограммы, записанные с рабочей поверхности валков.

Следует отметить, что при эксплуатации валков наблюдается их проскальзывание относительно деформируемого кольца, что обуславливает более интенсивное изнашивание рабочей поверхности валка. При этом у валков, обработанных механическим способом, проскальзывание начинается при раскатке уже первых

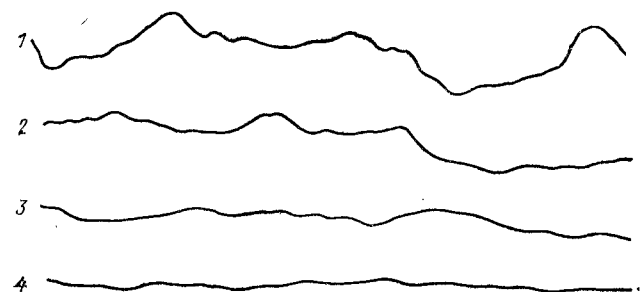


Рис. 33. Профилограммы шероховатости с участка раскатного валка, обработанного при $I_{\text{ср}} = 80$ А, $t_{\text{и}} = 2200$ мкс до начала испытаний (1) и после раскатки 10 (2), 100 (3) и 1800 (3) колец. Увеличение $B \times 200$, $\Gamma \times 100$ (1, 2, 3); $B \times 400$, $\Gamma \times 200$ (4)

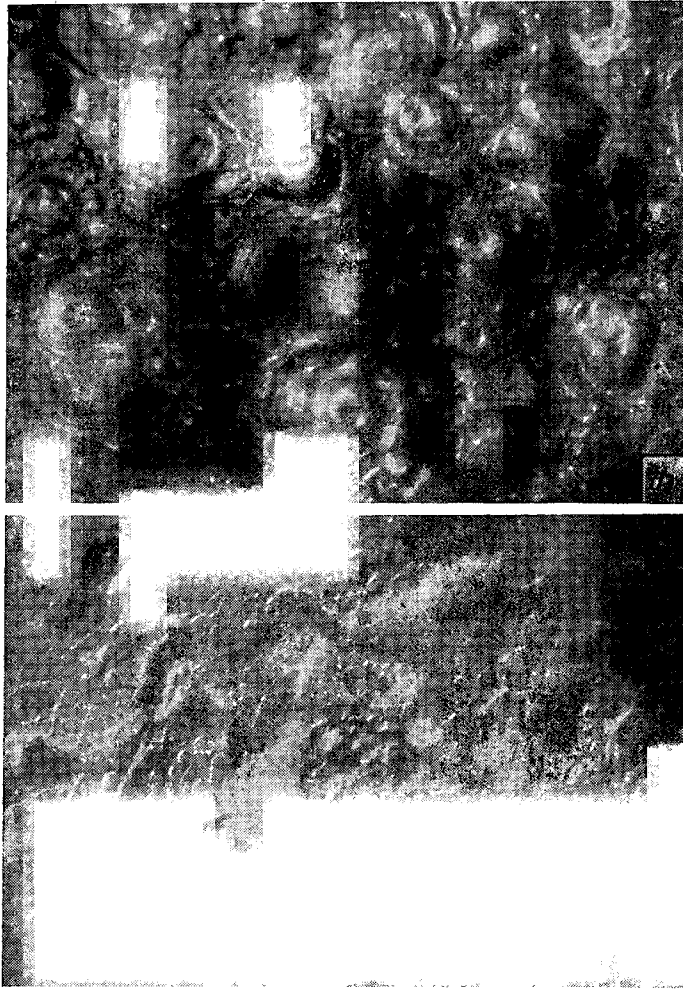


Рис. 34. Фотографии рабочих поверхностей раскатных валков, обработанных электроэрозионным способом перед эксплуатацией (а) и после раскатки 2000 колец (б) (X18)

колец и все более интенсифицируется в последующем. Прокальзывание валков, обработанных электроэрозионным способом, начинается после того, как R_z и α уменьшатся соответственно до 10—20 мкм и 5—8°, а ρ_B увеличится до 1000—2000 мкм.

На рис. 34 представлены фотографии рабочих поверхностей валков, обработанных электроэрозионным способом, перед эксплуатацией и после раскатки 2000 колец.

Производственные испытания показали, что стойкость валков, обработанных электроэрозионным способом, в 5—10 раз выше, чем стойкость валков, обработанных резанием. Высокая стойкость валков может быть получена при обработке их рабочих поверхностей на грубых режимах ($I_{cp} > 80$ А, $t_{и} > 2000$ мкс), обеспечивающих получение $R_z > 20$ мкм, $\alpha > 10^\circ$ и $\rho_B > 1000$ мкм.

3. ВЫРУБНЫЕ ШТАМПЫ

Электроэрозионная обработка рабочих поверхностей матриц вырубных штампов применяется уже давно, однако до сих пор стальные и твердосплавные матрицы подвергаются последующей слесарной доводке поверхностей, как правило до $R_a = 0,2 \div 0,5$ мкм в зависимости от толщины и свойств штампуемого материала [33]. Такая обработка сложнораскатных деталей, какими являются матрицы и пуансоны, существенно повышает их себестоимость. Вместе с тем при изготовлении ряда деталей вырубных штампов электроэрозионная обработка применяется в качестве окончательной операции [3, 28, 40 и др.]. Для более глубокого изучения влияния процесса электроэрозионной обработки на изменение параметров шероховатости поверхности, были испытаны штампы различных типов, рабочие поверхности матриц и пуансонов которых были обработаны с $R_z = 3 \div 35$ мкм.

Для выяснения изменения исходной шероховатости рабочих поверхностей твердосплавных пуансонов и матрицы обрабатывались механическим и электроэрозионным способами. Испытания штампов показали, что исходная шероховатость поверхности пуансонов, обработанных механическим способом до $R_a = 0,5 \div 2$ мкм, а также доведенных слесарной обработкой до $R_a = 0,04 \div 0,1$ мкм, в процессе работы изменяется существенно, чем шероховатость поверхностей, доведенных до $R_a = 0,2 \div 0,5$ мкм (рис. 35). Следует отметить, что пуансоны, обработанные абразивным шлифованием до $R_a = 1,5 \div 2$ мкм, выходили из строя раньше, чем заканчивался процесс их приработки. Высота неровностей профиля твердосплавных пуансонов и матриц, обработанных электроэрозионным способом с получением $R_a = 0,6 \div 2,5$ мкм, по мере роста числа вырубленных деталей, изменяется и, достигнув $R_a = 0,15 \div 0,5$ мкм, стабилизируется (рис. 35).

На рис. 36 показаны профилограммы шероховатости рабочих поверхностей пуансонов, записанные в направлении, перпендикулярном их движению. Поверхности пуансона после 300 тыс. вырубленных деталей имеют шероховатость, преимущественно направленную вдоль оси пуансона. На поверхности видны частицы металла вырубленной детали. Существенно различная величина R_a предопределяет в процессе эксплуатации штампов износ рабочих поверхностей за счет их истирания при механи-

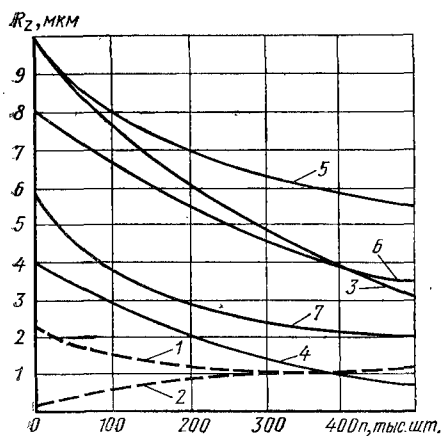


Рис. 35. Изменение шероховатости рабочих поверхностей твердосплавных пуансонов (1—4) и матриц (5—7), обработанных абразивным (—) и электроэрозионным (---) способами (кривые 6, 7—по данным М. Л. Шапиро)

ческом сцеплении с металлом штампуемой заготовки (при больших R_a) и схватывания материалов штампа и заготовки (при малых R_a) [40].

Поверхность твердосплавных деталей после электроэрозионной обработки имеет повышенную износостойкость в связи с образованием в поверхностном слое более мелкой структуры и таких соединений, как W_2C . Очевидно, что для обеспечения нормальной стойкости твердосплавных штампов электроэрозионную обработку рабочих поверхностей пуансонов и матриц следует вести при значениях $W_{и}$ и $t_{и}$ в пределах зоны А (см. рис. 23), что будет обеспечивать обработку заготовок без появления микротрещин. Использовать значения $W_{и}$ и $t_{и}$ около границы между зонами А и Б нецелесообразно, особенно $t_{и} > 100$ мкс. В этом случае поверхностный слой становится пористым, в нем образуются рыхлости и зоны измененного состава, что снижает его стойкость к ударным нагрузкам.

Стойкость стальных штампов для вырубке деталей из стали 35 толщиной 3 мм, пуансоны и матрицы которых обработаны электроэрозионным способом на режимах, обеспечивающих высоту неровностей профиля в пределах $R_z = 5 \div 15$ мкм, не ниже

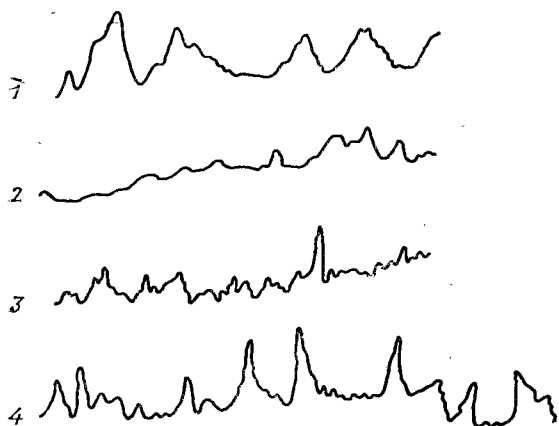


Рис. 36. Профилограммы, записанные с боковых поверхностей твердосплавных пуансонов до испытания (1, 3) и после 0,3 млн вырубленных деталей из стали Э42 толщиной 0,5 мм (2, 4). Увеличение: 1, 2— $V \times 8000$, $\Gamma \times 450$; 3— $V \times 30000$, $\Gamma \times 450$; 4— $V \times 15000$, $\Gamma \times 450$

Рис. 37. Изменение P (1) и R_z (2—5) в зависимости от числа вырубленных деталей n_d при начальном зазоре $2z_{н}$: 1 и 5—0,049 мм; 2—0,018 мм; 3—0,043 мм; 4—0,023 мм

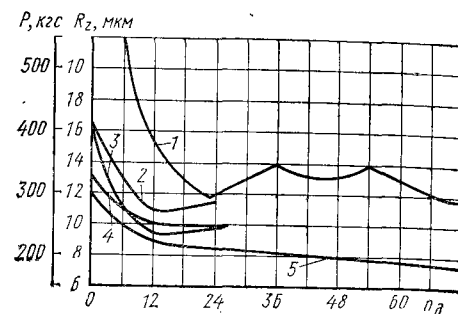
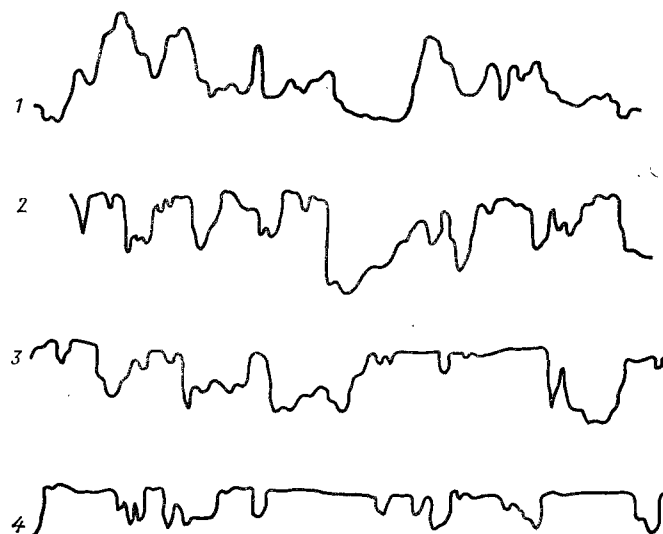


Рис. 38. Профилограммы с рабочего участка окна матрицы перед началом испытаний (1) и после 6 (2), 12 (3), 65 (4) вырубленных деталей. Увеличение $V \times 1000$, $\Gamma \times 200$



стойкости штампов, шероховатость поверхностей рабочих элементов которых доведена слесарно-механическим способом до $R_a = 0,2 \div 0,5$ мкм.

Для более детального выявления необходимых параметров шероховатости рабочих поверхностей стальных матриц вырубных штампов были проведены специальные эксперименты. Прямоугольные рабочие окна матриц, изготавливаемых из стали У8, вырезали на станке мод. 4531 с генератором ТГ-130 непрерывно движущейся электрод-проволокой в рабочей жидкости ПМС-10 на режимах $I_{к.з} = 1,6$ А, $C = 2$ мкФ и $I_{к.з} = 2$ А, $C = 1,5$ мкФ при постоянных значениях $U_{х.х} = 145$ В и $U_p = 70 \div 75$ В. С использованием таких матриц вырубали детали из стали 45 толщиной 1,5 мм на специальном 10-тонном прессе типа Автограф 1—10Т фирмы Шимадзу, обеспечивающем запись усилия. После каждых шести вырубленных деталей производились замеры окна матрицы и запись профилограмм с ее рабочих поверхностей.

На рис. 37 показано изменение R_z и усилия вырубki P в зависимости от числа вырубленных деталей. После первых 20—25 вырубok величины R_z и P стабилизируются. На рис. 38 показаны профилограммы, записанные после различного числа вырубленных деталей. В табл. 9 приведены результаты обра-

Таблица 9

Изменение параметров шероховатости в зависимости от числа вырубленных деталей n_d

n_d	R , мкм	s , мкм	$\rho_{вп}$, мкм	$\rho_{в}$, мкм	$r_{в}$, мкм	n_0	m_0
Профилограмма № 1							
0	3—21	20—160	6—279	5—125	3—45	0,0250	0,0203
12	1,25—8,5	20—185	7—280	12,5—722	16,5—2381	0,0245	0,0187
65	1—6	20—215	8—151	158—3375	116—17482	0,0166	0,0133
Профилограмма № 2							
0	2,5—26	10—130	5—164	4—51	1—30	0,0304	0,0234
12	2—7,5	15—180	6—78	15—375	7—248	0,0293	0,0169
65	1,5—6,5	15—250	2—82	19—6328	9—4308	0,0193	0,0121

ботки профилограмм, а на рис. 39 — изменение рассмотренных параметров с полигонами их распределения по данным обработки профилограммы № 2. Величины s , n_0 и m_0 претерпевают лишь небольшие изменения в сравнении с другими изучаемыми параметрами шероховатости. При этом абсолютные значения R и $\rho_{вп}$, а также диапазон их варьирования уменьшается, а для $\rho_{в}$ и $r_{в}$, наоборот, существенно возрастает. В связи с деформацией выступов неровностей, происходящей в результате вырубki и запрессовки вырубленных пластин в матрицу, изменяется вид распределения изучаемых параметров. Максимальная частота R и $\rho_{вп}$ смещается в сторону меньших значений, а частота $\rho_{в}$ и $r_{в}$ — в сторону больших.

Эксперименты показали, что после 20—25 вырубok все расширяемые параметры шероховатости независимо от перво-

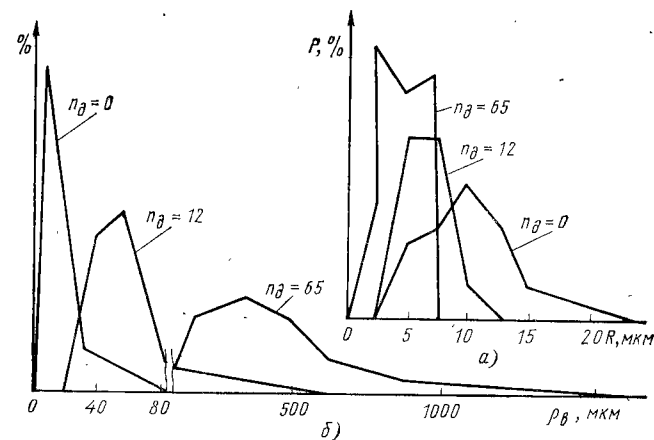


Рис. 39. Полигонные распределения R (а) и $\rho_{в}$ (б) в зависимости от числа вырубленных деталей n_d

начальной величины двустороннего зазора $2z_{п}$ между матрицей и пуансоном стабилизировались. R уменьшается за счет срезания наиболее выступающих вершин и смятия неровностей. Эта же причина обуславливает рост $\rho_{в}$ и $r_{в}$.

Необходимо отметить существенную зависимость параметров шероховатости, образовавшейся после 20 вырубok от исходной величины зазора $2z_{п}$ между матрицей и пуансоном. На рис. 40 показано влияние $2z_{п}$ на изменение R_z при вырубке деталей из стали 45 толщиной 1,5 мм. Исходная высота неровностей профиля R_z матрицы составляла 13 и 17 мкм. При $2z_{п}=24\%$ (абсолютная величина двустороннего зазора 0,36 мм) после 20 вырубok R_z уменьшилась с 17 до 12,5 мкм у одной матрицы и с 13 до 11,7 мкм — у другой. При $2z_{п}=2\%$ наблюдается более существенное изменение R_z : с 17 до 10,5 мкм у одной матрицы и с 13 до 9,8 мкм — у другой.

Уменьшение высоты неровностей профиля приводит к увеличению зазора между матрицей и пуансоном, который практически стабилизируется после 20—25 вырубленных деталей (табл. 10). При уменьшении $2z_{п}$ с 24 до 2% растут усилия вырубания, проталкивания вырубленных деталей через матрицу

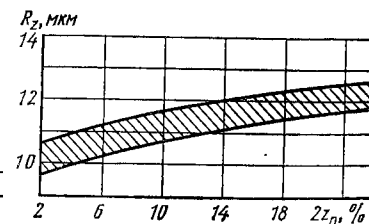


Рис. 40 Изменение R_z в зависимости от исходной величины зазора $2z_{п}$ после 20 вырубленных деталей

Таблица 10

Изменение двустороннего зазора $2z_{\text{п}}$ между матрицей и пуансоном с ростом числа вырубленных деталей $n_{\text{д}}$

$n_{\text{д}}$	$2z_{\text{п}}, \text{ мм}$				
0	0,360	0,250	0,135	0,075	0,030
6	0,366	0,257	0,144	0,085	0,049
12	0,372	0,346	0,152	0,094	0,052
20	0,376	0,270	0,159	0,102	0,060
25	0,378	0,272	0,162	0,105	0,064
30	0,381	0,275	0,166	0,109	0,069

и снятия отхода с пуансона, что обуславливает более интенсивное уменьшение R_z при малых $z_{\text{п}}$. В результате уменьшения высоты неровностей профиля после 20 вырубков первоначальный зазор 0,36 мм ($2z_{\text{п}}=24\%$) возрос на 4,5% и стал 0,376 мм, в то время как зазор 0,03 мм ($2z_{\text{п}}=2\%$) увеличился вдвое (табл. 10).

Так же существенно в процессе эксплуатации штампа изменяется и $\rho_{\text{в}}$. Если до начала испытаний $\rho_{\text{в}}$ выступала неровностей профиля рабочей поверхности у матрицы № 1 составлял 3—21 мкм, то после $n_{\text{д}}=20$ среднее значение $\rho_{\text{в}}$ изменилось в зависимости от величины $2z_{\text{п}}$:

$2z_{\text{п}}, \%$	24	17	9	5	2
$\rho_{\text{в}}, \text{ мкм}$	15—35	30—50	300—500	350—600	700—1000

Изменение параметров шероховатости рабочих поверхностей матриц вырубных штампов происходит за счет перемещения вырубленной детали относительно матрицы при значительных удельных давлениях $p_{\text{м}}$ на поверхность контакта. $p_{\text{м}}$ изменяется, при прочих равных условиях, в зависимости от марки штампуемого материала и величины $z_{\text{п}}$. В связи с этим в первом приближении наиболее целесообразные параметры шероховатости, к которым в данном случае относятся R_z и $\rho_{\text{в}}$, можно выбрать по значению $p_{\text{м}}$:

$p_{\text{м}}, \text{ МПа}$	100—150	150—200	200—250	250—300	300—350	350—400
$\rho_{\text{в}}, \text{ мкм, не менее}$	30	50	150	300	500	700
$R_z, \text{ мкм, не более}$	12—14	12—14	11—12	10—11	8—10	8—10

$$p_{\text{м}} = k_{\text{ш}} p_{\text{в}} = k_{\text{ш}} P b \tau_s,$$

где $k_{\text{ш}}$ — коэффициент пропорциональности, зависящий от $z_{\text{п}}$; $P_{\text{в}}$ — усилие вырубания; P, b — периметр и толщина вырубаемой детали; τ_s — сопротивление штампуемого материала срезу при вырубке.

Процессы вырубке детали, перемещения ее в матрице и отхода по пуансону сопровождаются не только механическим, но и тепловым воздействием на рабочие поверхности матрицы и пуансона. Поэтому свойства и структуры поверхностного слоя, определяющие наряду с параметрами шероховатости износ штампа, должны наиболее полно удовлетворять условиям работы штампов.

Исследования, проведенные во ВНИИЭМ, показали, что вырубные штампы обладают высокой стойкостью, если металл их рабочих частей имеет карбидную неоднородность в 2—3 балла, а поверхностный слой содержит остаточный аустенит в пределах 10—15%. Такая структура поверхностного слоя может быть получена при электроэрозионной обработке в широком диапазоне режимов (см. гл. III).

4. ПРЕСС-ФОРМЫ ДЛЯ ПРЕССОВАНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН

Пресс-формы состоят из твердосплавной матрицы 1 (рис. 41), запрессованной в стальную обойму 2, верхнего 3 и нижнего 4 пуансонов, оснащенных твердосплавными пластинами 5. Рабочие поверхности пуансона и матриц в настоящее время окончательно доводятся вручную до $R_a=0,1\div 0,3$ мкм. Для получения твердосплавных пластин смесь 6 прессуется следующим образом. После засыпки смеси 6 верхний пуансон 3 опускается в матрицу 1 на 2 мм, затем происходит прессование нижним пуансоном 4, после чего осуществляется окончательный дожим смеси верхним пуансоном. Завершающей стадией процесса является выталкивание нижним пуансоном 4 отпрессованной смеси 6 из матрицы. Таким образом, боковые поверхности твердосплавной матрицы имеют три зоны: I, II и III абразивного воздействия карбидов твердосплавной смеси. При этом наиболее интенсивному истиранию подвергается поверхность матрицы в зоне II.

Для установления требований к параметрам шероховатости рабочих поверхностей был изготовлен ряд матриц методом прямого копирования на станке фирмы АГИЕ и путем выре-

Таблица 11

Изменение R_a , ρ_B и r_B (мкм) рабочей поверхности матрицы в зависимости от числа отпрессованных пластин N

N	Сторона матрицы	R_a	ρ_B	r_B
0	1	1,8	30,6	10,2
	2	2,5	24,8	8,6
	3	2,5	39,1	9,8
	4	1,3	38,7	10,7
100	1	1,0	40,2	16,4
	2	0,65	42,5	26,4
	3	0,66	39,7	23,14
	4	0,8	46,24	24
1000	1	1,8	91	28,8
	2	2,7	89,7	39,7
	3	1,3	81,84	34,8
	4	2,3	88,3	36,2

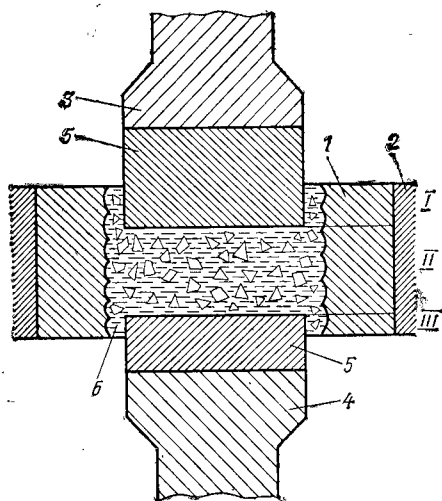


Рис. 41. Схема прессования твердосплавной смеси в пресс-форме

зания непрерывно движущейся электрод-проволокой на станке мод. 4531 на режимах, обеспечивающих R_z в пределах 2—16 мкм. После отпрессовки нескольких десятков пластин параметры шероховатости рабочих поверхностей матриц существенно изменились: R_z и α уменьшились, ρ_B возрос. Вполне очевидно, что за счет воздействия карбидов прессуемой смеси срезаются вершины микронеровностей боковых поверхностей пуансонов и матрицы. В процессе дальнейшей эксплуатации матрицы в увеличившийся зазор между матрицей и пуансоном попадают карбиды прессуемой смеси, которые царапают боковые поверхности, что приводит к некоторому росту R_z . При этом ρ_B продолжает увеличиваться, хотя темпы его изменения снижаются. В табл. 11 приведено изменение ряда параметров шероховатости поверхностей (сторон) матрицы для прессования четырехгранных твердосплавных пластин, а на рис. 42 показаны профилограммы шероховатости поверхности матрицы.

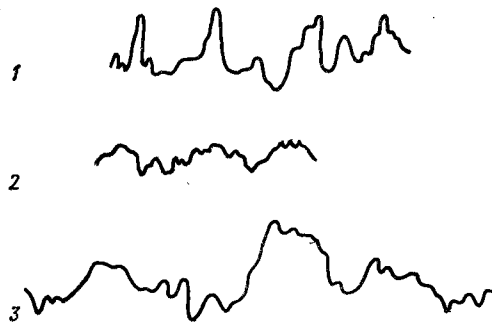


Рис. 42. Профилограммы шероховатости рабочей поверхности матрицы до испытания (1), после отпрессовки 100 (2) и 1000 (3) твердосплавных пластин. Увеличение Вх2000, Гх200

Проведенные эксперименты показали, что матрицы, обработанные электроэрозионным способом, могут обеспечить прессование пластин с требуемыми точностью и качеством. Так, независимо от изменения параметров шероховатости рабочих поверхностей пресс-форм при их работе твердосплавные пластины имели постоянное значение $R_a=0,7\div 1,65$, что находится в пределах нормы (R_a до 2,5 мкм).

5. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Исследование в процессе эксплуатации состояния рабочих поверхностей ковочных и вырубных штампов, раскатных валков и матриц для прессования твердосплавных пластин, обработанных электроэрозионным способом, выявило следующую закономерность. Независимо от высоты R_z неровностей профиля радиусы округления выступов ρ_B и впадин $\rho_{вп}$, а также угол α наклона боковой поверхности профиля к средней линии в весьма короткий срок I периода работы (рис. 43, а) стабилизируются, достигая определенных значений, и в дальнейшем изменяются мало. В этот период формируются равновесные параметры шероховатости, наиболее полно отвечающие условиям эксплуатации изучаемых поверхностей. При этом указанные параметры поверхностей, обработанных электроэрозионным способом, отличаются от соответствующих параметров поверхностей, обработанных слесарно-механическими способами. Следовательно, требования к качеству поверхностей, обрабатываемых электроэрозионным способом, исходящие из опыта слесарно-механической обработки, нельзя считать обоснованными и

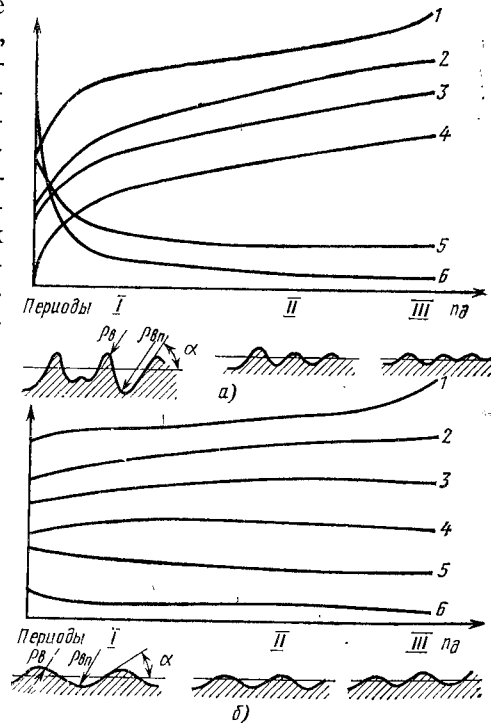


Рис. 43. Изменение размера полости или отверстия (1), износа (2), ρ_B (3), $\rho_{вп}$ (4), R_z (5) и α (6) в зависимости от числа изготовленных деталей n_d при различной начальной шероховатости поверхности, обработанной электроэрозионным способом в обычных условиях (а) и с оптимальными параметрами шероховатости (б)

способствующими повышению эффективности производства.

Следует отметить, что после электроэрозионной обработки рабочих поверхностей рассматриваемых штампов и инструментов значения R_z , R_a , ρ_B , $\rho_{\text{ВП}}$ и α далеки от оптимальных, что предопределяет в I период работы интенсивное изнашивание поверхностей. В результате существенно изменяется размер формообразующей полости, увеличивается размер формуемой детали, а следовательно, расход металла.

Во II периоде работы штампов и инструментов все рассматриваемые параметры шероховатости поверхности изменяются сравнительно мало. III период работы связан с существенными изменениями размера формообразующей полости в связи со специфическим характером изнашивания ее поверхности, и дальнейшая эксплуатация штампов и инструментов становится невозможной. R_z , R_a , ρ_B , α в этот период изменяются незначительно.

Аналогичные результаты получены при исследовании высадочного инструмента, волок, пресс-форм для прессования деталей из пластмасс и цветных металлов.

В целях обеспечения стабильности размеров формуемых деталей, снижения расхода металла, повышения сроков службы

штампов и инструментов, сохранения посадок сопрягаемых деталей целесообразно обеспечивать при электроэрозионной обработке рабочих полостей наиболее соответствующие значения параметров шероховатости поверхности, определяющими из которых являются R_z , ρ_B и α . Решение этой задачи существенно изменит условия изнашивания в I период работы штампов и инструментов, что приведет к иному характеру изменения рассмотренных выше параметров шероховатости (рис. 43, б).

В табл. 12 приведены требования к параметрам шероховатости поверхностей исследуемой технологической оснастки. Поскольку проведенные исследования не охватывали всего многообразия условий эксплуатации штампов и инструментов, указанные требования для условий, отличных от описанных в данной работе, следует считать ориентировочными.

Таблица 12

Требования к параметрам шероховатости рабочих поверхностей технологической оснастки, обрабатываемых только электроэрозионным и слесарно-механическим способами

Наименование	Электроэрозионный способ		Слесарно-механический способ (данные заводов)
	По данным автора	По литературным данным	
Ковочные штампы: заготовительные ручки окончательные »	$\rho_B > 100$ мкм, $\alpha \leq 20^\circ$ $\rho_B > 300$ мкм, $\alpha \leq 10^\circ$	$R_z =$ $= 10 \div 20$ мкм	$R_a = 1,0 \div$ $\div 2,0$ мкм
Стальные вырубные штампы	$R_z = 8 \div 12$ мкм, $\rho_B = 30 \div 700$ мкм	$R_a = 0,2 \div$ $\div 2$ мкм	$R_a = 0,2 \div$ $\div 0,5$ мкм
Раскатные валки	$\rho_B \geq 1000$ мкм, $\alpha \geq 10^\circ$ $R_z > 20$ мкм	—	$R_z = 10 \div$ $\div 20$ мкм
Твердосплавные пресс-формы для прессования твердосплавных пластин	$R_a \leq 2,5$ мкм, $\rho_B \geq 50$ мкм	—	$R_a = 0,1 -$ $- 0,2$ мкм

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Между технологическими показателями и режимами электроэрозионной обработки существует тесная взаимосвязь. Установлены четкие зависимости высоты неровностей профиля, величины внутренних напряжений, производительности и других показателей от параметров импульса, регулирование которых приводит к одновременному изменению всех технологических показателей [2, 25, 44 и др.].

Установление обоснованных требований к качеству поверхности, обработанной электроэрозионным способом, требует изыскания возможностей независимого изменения каждого технологического показателя, в том числе каждого параметра шероховатости поверхности, при любом используемом режиме обработки. Так, шероховатость рабочих поверхностей ковочных штампов, стальных и твердосплавных вырубных штампов должна иметь r_v , значительно превышающий радиус выступов неровностей, получаемых в обычных условиях ведения процесса электроэрозионной обработки. Представляется возможным резко увеличить r_v , ведя обработку при больших $t_{и}$, однако при этом в поверхностном слое возникают значительные остаточные внутренние напряжения и возможно образование сетки микротрещин. Для повышения эффективности электроэрозионной обработки в данном случае необходимо обеспечить поверхность без микротрещин и значительных σ , ведя процесс при любой $t_{и}$.

Во многих случаях целесообразно после электроэрозионной обработки сохранить белый слой, обладающий повышенной микротвердостью, при величине R_z , соответствующей чистовым режимам. Для образования на поверхности заготовки толстого белого слоя обработку необходимо вести при большой $t_{и}$, а для получения шероховатости с большой высоты выступов R_z — при малой $t_{и}$. Одновременно реализовать эти условия при обычном ведении процесса невозможно. Имеется много примеров такого рода.

Вместе с тем ряд работ последних лет показывает, что, изме-

няя условия ведения процесса, можно регулировать параметры шероховатости поверхности и физико-механические свойства поверхностного слоя.

1. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОДОВ И РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ НА ВЕЛИЧИНУ ОСТАТОЧНЫХ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Рассмотрение процесса нагрева и охлаждения поверхности единичной лунки, образующейся под воздействием электрического разряда, и этому сопутствующих явлений (см. гл. III) показало возможность значительного уменьшения остаточных внутренних напряжений при электроэрозионной обработке. Сопоставление температур, при которых образуются тепловые и структурные внутренние напряжения во время нагрева и охлаждения поверхностного слоя, приводит к следующим заключениям: а) при температуре более 500°C внутренние напряжения в поверхностном слое практически отсутствуют; б) при температуре структурных превращений в охлаждаемой поверхности детали возникают значительные внутренние напряжения, которые могут вызвать образование сетки микротрещин.

Для значительного снижения внутренних напряжений в поверхностном слое, обработанном электроэрозионным способом, необходимы такие внешние условия, при которых во время обработки пластичность материала заготовки была бы выше, чем в нормальных условиях, а после обработки заготовки охлаждение ее на воздухе, начиная с температуры структурных превращений, происходило бы медленнее, чем в масле, керосине, воде, эмульсии. Указанные условия могут быть соблюдены при обработке детали, нагретой до температуры структурных превращений и ее последующем охлаждении на воздухе или в рабочей жидкости.

Однако при нагреве заготовки свыше 100°C во время ее обработки, например, в керосине, трансформаторном масле и других подобных средах возможно возгорание последних. Кроме того, производительность процесса резко падает вследствие значительного газовыделения, при котором электрические разряды протекают уже не в жидкой, а в газовой среде. Следовательно, в данном случае необходимо применение иных рабочих сред, в частности таких, которые становятся жидкотекучими при повышенных температурах. К ним относятся, например, парафин, стеарин, озокерит, церезин, такие предельные углеводороды, как гексадекан (цетан), эйкозан, триаконтан и др. (табл. 13), а также широкий ряд кремнийорганических жидкостей (табл. 14).

Диапазон изменения T_0 заготовки, обеспечивающий существенное снижение внутренних напряжений, определяется ее свой-

Таблица 13

Вещество	Температура, °С	
	плавления	кипения
Парафин	50—70	350—500
Озокерит	—	До 700
Гексадекан	18,2	286,8
Эйкозан	36,8	342,7
Триаконтан	65,2	446,4
Тетракоктан	81,5	520

Таблица 14

Некоторые свойства полиметилсилоксановых и полиэтилсилоксановых жидкостей

Марка жидкости	Вязкость при температуре 20° С, сСт	Температура вспышки, °С, не ниже,
ПМС-10	10	170
ПМС-20	20	180
ПМС-50	50	200
№ 4	32—55	150
№ 7	42—48	190

ствами, а также параметрами режима обработки, определяющим из которых является длительность импульса. При обработке жаропрочных материалов с $t_{и}$ более 200 мкс температура нагрева должна быть в пределах 200—400° С, молибдена при обработке с $t_{и}$ более 100 мкс — 100—300° С, твердых сплавов с $t_{и}$ более 200 мкс — 300—600° С, в зависимости от конкретного состава материала.

Нагрев обрабатываемой заготовки может осуществляться как в ванне с рабочей жидкостью, так и непосредственно электроконтактным способом. При этом для обработки следует использовать специальный станок, один из вариантов принципиальной схемы которого показан на рис. 44.

Обрабатываемая заготовка 1 устанавливается на специальном столе 2 станка и прижимается к контактам 3 и 4 устройства для нагрева. Заготовка и электрод-инструмент 20 включены в

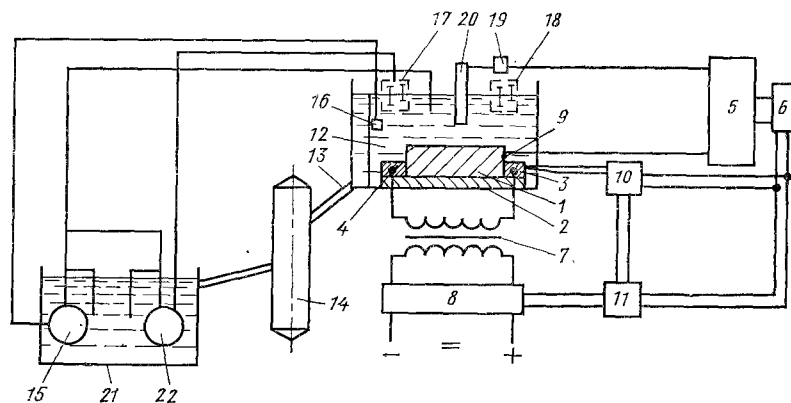


Рис. 44. Принципиальная схема станка для электроэрозионной обработки деталей в предварительно нагретом состоянии

цепь генератора импульсов 5, управляемого от пульта 6. Пульт связан через устройство 11 с механизмом 8 регулирования режима работы источника питания 7 для нагрева заготовки, а через устройство 10 — с датчиком 9 измерения температуры заготовки. Рабочая ванна 12 связана трубопроводом 13 с охладителем 14, откуда рабочая жидкость поступает в дополнительный бак 21. Охлажденная жидкость из бака подается в рабочую ванну насосом 15, рабочий режим которого регулируется датчиком 16 измерения температуры жидкости. Дополнительный насос 22 подает жидкость по команде, поступающей от уровнемера 17. Уровнемер 18 при снижении уровня жидкости в ванне 12 ниже критической отметки с помощью устройства 19 отключает генератор импульсов 5 и источник питания 7 устройства для нагрева заготовки.

Датчик 9, устройства 10 и 11 позволяют поддерживать температуру заготовки в заданных пределах, обусловливаемых свойствами обрабатываемого материала. При достижении максимальной температуры для данных условий обработки источник питания 7 выключается до момента, когда температура заготовки снизится до минимально допустимой. При несоответствии фактической температуры заготовки с заданной источник питания 7 и генератор импульсов 5 будут выключены.

Для обеспечения пожарной безопасности температура верхнего слоя рабочей жидкости в ванне 12 поддерживается в требуемых пределах, для чего осуществляется охлаждение жидкости с применением охладителей 14 и интенсивный ее обмен в ванне 12 с помощью насосов 15 и 22 при постоянном автоматическом контроле температуры датчиком 16 и уровня уровнемерами 17 и 18. Таким образом, в процессе обработки остаются нагретыми до высоких температур только те слои рабочей жидкости, которые омывают заготовку и элементы нагревательного устройства.

При электроэрозионной обработке сталей У12, ХГ и др. в парафине, нагретом до 180—200° С, остаточные напряжения, измеренные прибором ПИОН, снизились в 2,5—3 раза у стали У12 и еще более у стали ХГ по сравнению с остаточными напряжениями при обработке этих материалов в керосине или трансформаторном масле. Электроэрозионная обработка молибдена без появления микротрещин в поверхностном слое заготовки в парафине, нагретом до 100—200° С, стала возможна при энергии импульса 0,05 Дж, тогда как обработка в керосине без появления микротрещин в поверхностном слое возможна только при энергии импульса 0,01 Дж (табл. 15).

Поверхности молибденовых образцов перед осмотром под микроскопом МИМ-7 при увеличении 160 полировались электролитическим способом в спиртовом растворе серной кислоты в течение 20 с при токе 10 А. Электроэрозионная обработка образцов велась с применением специального источника питания,

Таблица 15

Наличие сетки микротрещин в поверхностном слое молибдена, обработанного в различных средах при $U_{\text{хх}}=250$ В и скважности $n_{\text{ск}}=2$

Режим обработки				Рабочая среда		
$I_{\text{к.з.}}, \text{ А}$	$\frac{I_{\text{н.о.}}}{I_{\text{н.н}}}, \text{ А}$	$\frac{t_{\text{н.о.}}}{t_{\text{н.н}}}, \text{ макс}$	$\frac{f_{\text{н}}}{f_{\text{н}}}, \text{ кГц}$	Керосин, $T=80^\circ \text{C}$	Парафин, $T=100^\circ \text{C}$	Парафин, $T=200^\circ \text{C}$
				Наличие микротрещин		
6	$\frac{8}{4}$	$\frac{130}{8}$	$\frac{3,8}{67}$	Нет	Нет	Нет
	$\frac{20}{20}$	$\frac{30}{8}$	$\frac{16,7}{67}$	Есть	»	»
20	$\frac{20}{2}$	$\frac{60}{8}$	$\frac{8}{67}$	»	»	»
	$\frac{10}{8}$	$\frac{90}{8}$	$\frac{6}{67}$	»	«	»

формирующего гребенчатые импульсы. Индексы «о» и «н» (см. табл. 15) характеризуют параметры импульсов соответственно основных и наложенных на основной. Длительность $t_{\text{н.о}}$ и сила тока $I_{\text{н.о}}$ в основном импульсе регулируются в широких пределах, длительность импульсов $t_{\text{н.н}}$, наложенных на основной импульс и образующих «гребенку», имеет постоянную величину 8 мкс. Общая сила тока в импульсе $I_{\text{н}}=I_{\text{н.о}}+I_{\text{н.н}}$.

2. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Производительность обработки $\gamma_{\text{з}}$ является важным технологическим показателем процесса, определяющим его эффективность. Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко установили [24], что производительность электроэрозионного процесса зависит от свойств материала электродов, режима обработки, свойств и состава рабочей жидкости. Б. А. Красюк указал на связь между режимом обработки и теплофизическими свойствами материала заготовки, Б. Н. Золотых установили [13] связь между производительностью и $W_{\text{и}}$, $t_{\text{и}}$, теплопроводностью λ , температуропроводностью a и другими теплофизическими характеристиками материала заготовки. Эти работы позволили сделать вывод, что между $W_{\text{и}}$ и $t_{\text{и}}$ существует строгая взаимосвязь и что максимум производительности с ростом энергии импульса $W_{\text{и}}$

смещается в сторону больших $t_{\text{и}}$, а с ростом коэффициента теплопроводности λ — в сторону коротких импульсов [18].

Ведутся исследования процесса с целью повышения производительности электроэрозионной обработки, разработка новых генераторов импульсов, станков, обеспечивающих регулирование режимов в процессе обработки детали в соответствии с изменением размера обрабатываемой поверхности и условий ведения процесса и т. д. [3, 12, 44 и др.]. В результате существенно повысилась производительность прецизионной и грубой электроэрозионной обработки [35, 44 и др.].

Внедрение на ряде заводов электроэрозионного способа позволило увеличить производительность обработки глубоких отверстий малого диаметра в 3,5 раза, вырезания окон в 2 раза и обработки сложнофасонных деталей в 8,3 раза, снизив себестоимость соответственно на 22, 48 и 82%.

Однако следует отметить, что все исследования были направлены на установление влияния отдельных факторов на производительность процесса и его стабилизацию, чтобы увеличить съем металла в единицу времени; на повышение производительности при данной величине R_z и отсутствии сетки микротрещин в поверхностном слое заготовки. Вместе с тем нет разработок высокопроизводительных процессов, которые обеспечивали бы оптимальные для данных условий эксплуатации деталей значения таких параметров шероховатости поверхности, как $R_{\text{в}}$, a , $R_{\text{вп}}$, R_z и таких показателей ее качества, как внутренние напряжения, микротвердость поверхностного слоя и др.

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ

В качестве рабочей жидкости при электроэрозионной обработке используются жидкие нефтепродукты: трансформаторное и индустриальное масло, керосин, смесь керосина с различными маслами. В последние годы все шире применяют дистиллированную деионизированную и промышленную воду. Особый интерес представляет использование рабочей жидкости, состоящей из воды и масла, ввиду доступности ее компонентов и легкости получения с различным содержанием воды, что позволяет влиять не только на производительность процесса, но и на качество обрабатываемой поверхности (см. гл. III).

Двухкомпонентные жидкости готовились с применением ультразвукового и механического перемешивания. При ультразвуковом способе перемешивание воды и масла производят в ультразвуковой ванне типа УЗВ15 с помощью генератора УЗМ1,5. Затем смесь поступает в рабочий бак станка и помпой подается в межэлектродный зазор. Из зоны обработки заготовки жидкость, пройдя фильтрующее устройство, снова поступает в ультразвуковую ванну для очередного перемешивания.

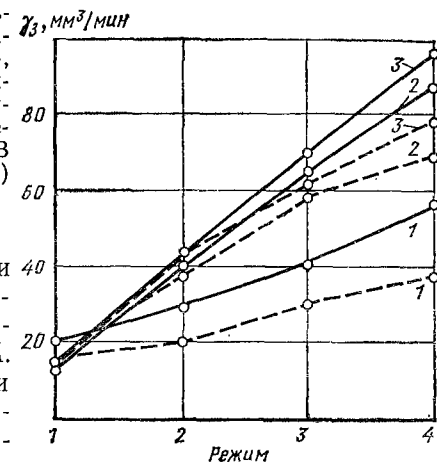
При механическом перемешивании в бак станка заливают воду и масло в требуемом соотношении. Помпу устанавливают в баке так, чтобы ее заборная часть была на границе раздела воды и масла. При включении помпы происходят забор и механическое перемешивание компонентов. Описанная схема проста в исполнении, но при ее использовании сложно поддерживать заданный состав смеси за счет постоянного изменения высоты уровня воды и масла. Кроме того, имеет место неравномерность эмульгирования масла в воде. Однако эксперименты, проведенные Е. Н. Савельевым под руководством и при участии автора, показали, что эти недостатки при использовании рассматриваемой жидкости на электроэрозионных шлифовальных станках не оказывают существенного влияния на производительность процесса.

Эмульсия из воды и масла, приготовленная механическим перемешиванием, недолговечна: пройдя зону обработки, она расслаивается. Это упрощает ее очистку, так как примеси скапливаются главным образом на дне (крупные металлические продукты эрозии), на границе раздела сред (продукты эрозии, плотность которых больше, чем у масла, но меньше, чем у воды) и на поверхности (удерживаемые масляной пеной мелкие металлические частицы и смолистые вещества, образовавшиеся в результате разложения масла). Рабочая жидкость, пройдя межэлектродный зазор при обработке деталей на грубых режимах, сливается непосредственно в бак, а при чистовой обработке предварительно пропускается через фильтрующее устройство.

При круглом наружном шлифовании деталей на модернизированном универсальном круглошлифовальном станке мод. 3Б12 с генератором типа ВГ-3В и ШГИ-125-100 в качестве рабочих жидкостей использовались трансформаторное масло и смесь масла с водой в соотношении 1:1. Эксперименты показали, что производительность при использовании смеси, приготовленной ультразвуковым способом, на несколько процентов выше, чем при использовании жидкости, приготовленной механическим перемешиванием. Смесь масла с водой не воспламеняется при обработке во всем диапазоне исследуемых режимов ($I_{ср}$ изменялся до 60 А), в то время как обработка в трансформаторном масле была затруднительна при $I_{ср}$ около 30 А. Таким образом, применение в качестве рабочей жидкости указанной смеси позволяет более полно использовать генератор импульсов и повысить производительность грубой обработки вдвое. Производительность обработки твердосплавной заготовки на мягком режиме в трансформаторном масле близка или выше, чем в смеси (рис. 45), а при шлифовании на самом грубом режиме генератора ВГ-3В — значительно ниже.

По данным Троицкого станкостроительного завода, высокопроизводительная обработка различных полостей и отвер-

Рис. 45. Изменение производительности шлифования при использовании трансформаторного масла (1), смеси масла с водой, приготовленной ультразвуковым (2) и механическим (3) смешиванием, при ведении процесса от генератора ВГ-3В с частотой импульсов 8 (—) и 22 кГц (---)



стий с использованием смеси масла с водой, а также эмульсолов возможна на грубых режимах генераторов МГИ-2М, ТГ 0,15-250 и ШГИ-63-440. При этом процесс протекает устойчиво при использовании графитовых электрод-инструментов, которые в зависимости от применяемого источника питания включаются в качестве анода или катода.

ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ

Предварительный нагрев рабочих жидкостей, в которых ведется электроэрозионная обработка, может оказать существенное влияние на производительность процесса за счет изменения свойств жидкости и теплофизических характеристик материала электродов. Изменение температуры T_0 влияет на вязкость рабочей жидкости, облегчает или затрудняет удаление продуктов эрозии из зоны обработки, а следовательно, изменяет производительность процесса γ_z . Зависимость γ_z от вязкости жидкости имеет максимум [39, 44]. Следует отметить, что при нагреве рабочей жидкости на γ_z может также влиять газовыделение из жидкости и ее разложение. Поскольку с ростом T_0 одновременно с изменением свойств рабочей жидкости несколько изменяются и теплофизические характеристики электродов, то весьма сложно выявить влияние на γ_z только одного интересующего нас фактора. Кроме того, при одинаковой вязкости жидкостей может быть существенно различный характер γ_z в зависимости от используемой жидкости.

С учетом сказанного, влияние T_0 на γ_z изучалось с использованием ряда рабочих жидкостей, а именно: ПМС-10, масла индустриального 12, дистиллированной воды и керосина, обладающих различной вязкостью. Методом прямого копирования на режиме $U_{х.х}=110$ В, $I_{к.з}=10$ А, $C=50$ мкФ обрабатывались отверстия в твердом сплаве ВК15, а непрерывно движущимся электрод-проволокой разрезались на режиме $U_{х.х}=120$ В, $I_{к.з}=3,5$ А, $C=3$ мкФ заготовки из закаленных до HRC 57—60

сталей ШХ15 и Х12Ф1. Эксперименты показали, что рост T_0 от 20 до 70°С не вызывает изменений производительности при обработке в керосине заготовок из сталей ВК15, ШХ15 и Х12Ф1, что, по-видимому, связано со слабым влиянием температуры на вязкость керосина.

Производительность обработки в воде с ростом T_0 имеет тенденцию к падению, несмотря на уменьшение вязкости с 1 сСт при $T_0=20^\circ\text{C}$ до 0,6–0,7 сСт при $T_0=50^\circ\text{C}$. При этом, если до температуры $T_0=50^\circ\text{C}$ наблюдалось незначительное уменьшение γ_3 , то при T_0 свыше 70°С γ_3 резко падало. В этом диапазоне температуры в межэлектродном зазоре, заполненном водой, появляются пузырьки пара, нарушающие нормальное протекание процесса.

Рост T_0 с 20 до 50°С снижает вязкость масла промышленное 12 с 55–60 до 8–9 сСт, что облегчает его попадание в зону обработки и выброс продуктов эрозии. В итоге γ_3 в этом диапазоне температур при обработке сплава ВК15 имеет максимум [39]. При дальнейшем росте T_0 , особенно свыше 70–80°С, наблюдается интенсивное выделение газов в связи с испарением легких фракций масла, что приводит к нарушению стабильности процесса и падению γ_3 . Повышение T_0 в исследуемом диапазоне вызывает четко выраженный рост γ_3 при обработке стали в ПМС-10. Вязкость этой жидкости с ростом T_0 изменяется в широком диапазоне (от 10 сСт при 20°С до 3,2 сСт при 100°С), при этом не наблюдается газовыделения до весьма высокой T_0 в связи с отсутствием легко испаряемых фракций. В исследуемом диапазоне T_0 при использовании ПМС-10 не удалось обнаружить максимума γ_3 (рис. 46).

Для выявления влияния T_0 рабочей жидкости в более широком диапазоне на производительность обработки и износ электрод-инструмента В. С. Кайнорьяном под руководством автора была проведена электроэрозионная обработка образцов из стали У8, закаленной до HRC 58 и 62, и стали Х18Н9Т электрод-инструментами из меди М1. Выбор этих марок сталей обусловлен различным характером изменения их теплофизических характеристик (таких как теплопроводность λ и температуропроводность a) с ростом температуры. Образцы обрабатывались в специальном приспособлении, оснащенном системой нагрева и регулировки температуры рабочей жидкости. Приспособление с закрепленным образцом устанавливалось на столе станка мод. 4Б722, оснащенном генератором ШГИ-125-100. Обработка велась с вибрацией электрод-инструмента на обратной полярности импульсами прямоугольной формы на различных режимах. Средняя сила тока $I_{\text{ср}}$ изменялась от 2,5 до 20 А, а длительность импульса $t_{\text{и}}$ от 140 до 780 мкс.

Относительное изменение производительности γ_3 при $t_{\text{и}}=310$ мкс и $f=1$ кГц в зависимости от T_0 рабочей жидкости показано на рис. 47. Производительность γ_3 на режимах $I_{\text{ср}} <$

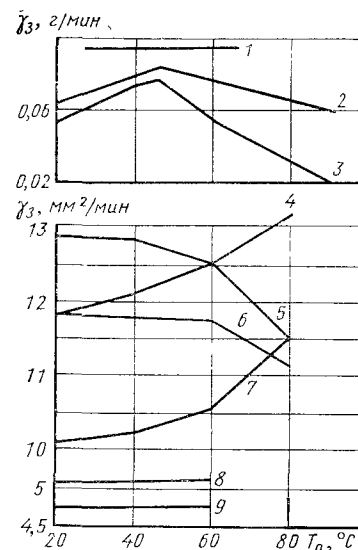


Рис. 46. Изменение производительности γ_3 в зависимости от температуры T_0 керосина (1, 8, 9), масел: промышленное 12 (2) и трансформаторное (3), жидкости ПМС-10 (4, 7) и дистиллированной воды (5, 6) при обработке твердого сплава ВК15 (1–3), сталей ШХ15 (4, 5, 8) и Х12Ф1 (6, 7, 9)

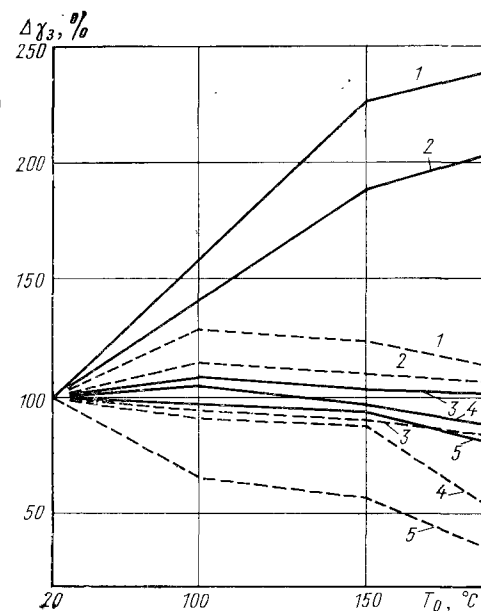


Рис. 47. Влияние температуры рабочей жидкости на относительное изменение производительности электроэрозионной обработки стали У8 (—) и Х18Н9Т (---) при $t_{\text{и}}=310$ мкс и различном $I_{\text{ср}}$:
1 — $I_{\text{ср}}=2,5\text{A}$; 2 — $I_{\text{ср}}=5\text{A}$; 3 — $I_{\text{ср}}=10\text{A}$;
4 — $I_{\text{ср}}=15\text{A}$; 5 — $I_{\text{ср}}=20\text{A}$

$<5\text{A}$ и $t_{\text{и}} < 310$ мкс растет до определенной температуры T_0 жидкости, зависящей от $I_{\text{ср}}$, $t_{\text{и}}$ и материала заготовки. В случае обработки стали У8 максимальное значение γ_3 наблюдается около $T_0=200^\circ\text{C}$, а в случае обработки стали Х18Н9Т — в диапазоне 80–150°С в зависимости от режима. Интенсивность роста γ_3 при обработке стали У8 больше, чем при обработке стали Х18Н9Т. Рост γ_3 в определенной степени связан с уменьшением вязкости рабочей жидкости и, соответственно с улучшением условий удаления продуктов эрозии из межэлектродного промежутка. В то же время различные значения T_0 , обеспечивающие наибольшую γ_3 для выбранных марок сталей на одних и тех же электрических режимах, по-видимому, определяются теплофизическими характеристиками обрабатываемых материалов.

С увеличением $t_{\text{и}}$ производительность обработки γ_3 для исследуемых материалов уменьшается с переходом к малым зна-

чениям I_{cp} и резко падает при $I_{cp} > 10$ А. Так, при обработке на режиме $t_{и} = 780$ мкс и $I_{cp} = 10 \div 20$ А γ_3 снижается с ростом T_0 от 20 до 200° С в 2—3 раза. Резкое падение γ_3 на грубых режимах определяется интенсивным парообразованием в межэлектродном промежутке, как это имеет место при использовании масел в качестве рабочих жидкостей [31]. В данных же условиях предварительный нагрев жидкости способствует образованию пара при переходе к обработке с $I_{cp} > 10$ А и $t_{и} > 310$ мкс.

Повышение T_0 рабочей жидкости до нескольких сот градусов оказывает влияние на такие теплофизические характеристики электродов, как коэффициенты теплопроводности λ и температуропроводности a , определяющие эффект эрозии. Известно [18], что максимальная γ_3 достигается при определенных значениях $W_{и}$ и $t_{и}$, величины которых связаны с λ и a . Поскольку теплофизические характеристики с ростом T_0 у одних материалов возрастают, а у других уменьшаются (табл. 16), для обеспечения требуемого эффекта эрозии необходимо для каждого материала электрод-инструмента и обрабатываемой заготовки подбирать свой температурный режим, в котором он должен находиться в процессе электроэрозионной обработки.

Таблица 16

Изменение коэффициента теплопроводности λ в зависимости от температуры

λ , Вт/(м·град) (по данным В. Э. Вилецкого и В. И. Юдаева)							
Металл	Температура, °С						
	-150	-100	0	200	400	600	
Медь чистая	480	420	400	380	360	—	
Железо	—	—	70	60	40	20	

λ , кал/(см·с·град) (по данным А. Н. Резникова и В. И. Туманова)							
Материал	Температура, °С						
	0	60	100	200	400	600	800
Сплав ВК8	0,145	—	0,136	0,128	0,1	—	0,07
Сталь 40	0,122	—	0,177	0,112	0,1	—	0,06
Сталь X18H9T	0,03	—	0,035	0,038	0,05	—	—
Сплав Т15К2	—	0,01	—	0,03**	—	0,12	—
» Т14К6	—	0,03*	—	0,08**	—	—	—
» Т19К6	—	0,008*	—	0,06**	—	0,42	—
» Т17К15	—	0,01	—	0,02**	—	—	—

* При температуре 70°С.
** При температуре 220°С.

Например, для уменьшения износа электрод-инструмента γ_3 , при прочих равных условиях, необходимо увеличивать коэффициент теплопроводности, а для повышения γ_3 — уменьшать. Чтобы обеспечить указанные условия, требуется менять температуру каждого электрода, в общем случае нагревая один и охлаждая другой. Так, при электроэрозионной обработке стальной заготовки медным электрод-инструментом с целью повышения γ_3 и уменьшения γ_3 целесообразно охлаждать электрод-инструмент, и нагревать заготовку. При обработке заготовки из циркония молибденовым электрод-инструментом целесообразно нагревать последний и охлаждать заготовку.

Чтобы реализовать рассматриваемое положение, необходимо иметь средства для охлаждения и нагрева электродов, а также рабочие жидкости, в которых возможно вести процесс электроэрозионной обработки при повышенных температурах. Для этого можно использовать парафин, имеющий температуру кипения 350—500° С, триаконтан — 446,4° С, тетраоконтан — 520° С и др. Охлаждать электрод-инструмент или обрабатываемую заготовку можно, в частности, проточной холодной водой, жидким азотом, а также воздухом, охлажденным в вихревой трубке. С этой целью в электрод-инструменте предусматривают каналы, по которым прокачивают охладитель (воду, воздух, сжиженный газ и др.). Для охлаждения обрабатываемую заготовку помещают в специальное приспособление, чтобы подвести охладитель по возможности ближе к обрабатываемой поверхности.

Для получения наибольшего эффекта при обработке детали из сплава Т15К2 медным электрод-инструментом целесообразно нагревать деталь до 600° С, а электрод-инструмент охлаждать, например, до -150° С (см. табл. 16). При использовании в качестве рабочей жидкости тетраоконтана нагревать заготовку можно только до 400—450° С. Глубокое охлаждение электрод-инструмента можно обеспечить жидким азотом. При разработке новых составов рабочей жидкости с более высокой температурой кипения появится возможность нагревать заготовки, в частности, из стали или твердого сплава, до более высоких температур.

3. УВЕЛИЧЕНИЕ РАДИУСА СКРУГЛЕНИЯ ВЫСТУПА ПРОФИЛЯ ШЕРОХОВАТОСТИ

При обработке многих типов штампов и инструментов целесообразно сохранить белый слой, обладающий повышенной твердостью, и обеспечить величину r_b больше получаемой в нормальных условиях ведения процесса, при уменьшенной R_z . После электроэрозионной обработки поверхности образуется шероховатость, у которой r_b доходит до 400 мкм в зависимости от режима и свойств обрабатываемого материала (см. гл. II). Для

увеличения ρ_v необходимо удалить часть выступов поверхности, полученной после грубого режима, не затрагивая металл ниже линии впадин, чтобы не удалить белый слой. При этом рост ρ_v можно обеспечить как подбором режимов электроэрозионной обработки, так и введением дополнительных операций, выполняемых другими способами.

К методам доводки поверхностей, обработанных электроэрозионным способом, должны предъявляться определенные требования, исходя из особенностей параметров шероховатости поверхностей. Только с учетом этих особенностей, описанных в дальнейшем, возможно получение желаемого эффекта.

ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА ИМПУЛЬСАМИ МАЛОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

В целях сокращения времени доводки поверхности электроэрозионным способом стремятся к бесступенчатому изменению режима обработки, доводя его до уровня, при котором обеспечивается заданная величина R_z . Но в этом случае удаляется слой повышенной твердости, образовавшийся после черновой обработки, и существенно уменьшается ρ_v .

Для того чтобы уменьшить R_z , но при этом резко увеличить ρ_v , необходимо чистовую обработку вести на особо мягких режимах, снимая припуск в пределах высоты неровности профиля, образовавшегося после черновой обработки. Для этого диаметр $d_{л}$ лунок, образующихся на чистовых режимах, не должен превышать размер поперечного сечения выступа на расстоянии глубины единичной лунки $h_{л}$ от вершины выступа (рис. 48). Из треугольника O_1AB следует, что размер сечения BB на расстоянии $h_{л}$ от вершины выступа будет

$$BB = 2 \sqrt{2\rho_{в1} h_{л} - h_{л}^2} \geq d_{л}.$$

Отсюда

$$r_{л} \leq \frac{2\rho_{в1} K_2}{1 + K_2^2} = \frac{\rho_{в1}}{k_{л2}}.$$

(Индексы «2» и «1» относятся соответственно к чистовой и черновой обработке).

Поскольку $\rho_{в1}$ при электроэрозионной обработке с $I_{ср} = 5 \div 100$ А изменяется от 40 до 4000 мкм, то при $K_2 = 4 \div 5$ чистовые режимы будут обеспечивать величину $r_{л}$ от 8 до 100 мкм соответственно. Энергию импульса чистового режима $W_{и чс}$ можно определить, связав вышеприведенное выражение с уравнением [35]

$$2r_{л} = k_{ч} \sqrt[3]{W_{и чс}},$$

где $k_{ч}$ — коэффициент пропорциональности.

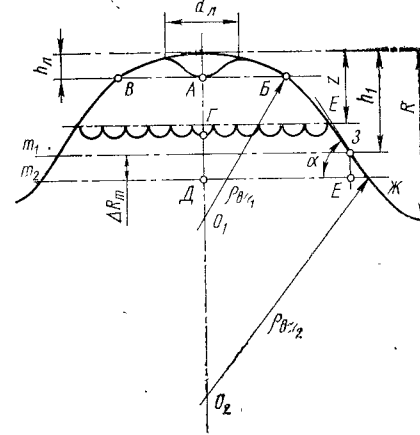
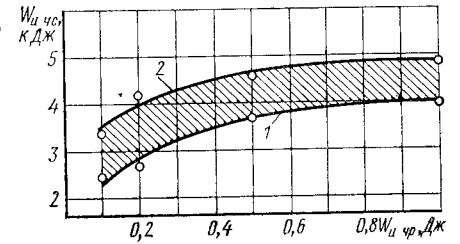


Рис. 48. Схема формирования шероховатости поверхности при обработке на чистовом режиме

Рис. 49. Изменение энергии импульса чистового режима $W_{и чс}$ в зависимости от энергии $W_{и чр}$ и длительности (1 —100 мкс, 2 —1000 мкс) импульса чернового режима



В итоге получим

$$W_{и чс} = \sqrt[3]{\frac{2\rho_{в1}}{k_{л} k_{ч}}}.$$

Отсюда связь между режимами черновой и чистовой обработки можно представить в виде графика на рис. 49. При электроэрозионной обработке стали 4X13 энергия чистовых режимов должна в зависимости от $\rho_{в чр}$ находиться в диапазоне от 1,7 до 6 мкДж.

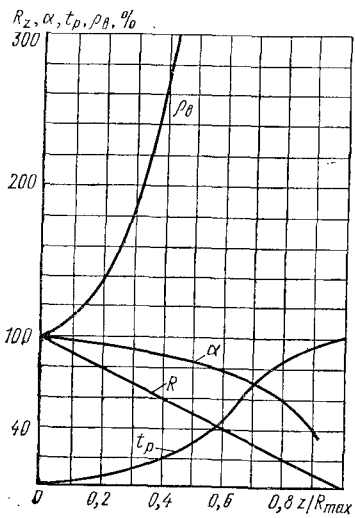
В результате чистовой обработки с выступов профиля будет снят слой толщиной z , средняя линия m_2 нового профиля шероховатости сместится от средней линии исходного профиля m_1 на величину ΔR_m . Таким образом, $\rho_{в2}$ увеличится в сравнении с $\rho_{в}$ в η_p раз:

$$\eta_p = \frac{\rho_{в2}}{\rho_{в1}} = \frac{\left(d_{л} + 2 \frac{\Delta R_m}{\operatorname{tg} \alpha}\right)^2 h_1}{(\Delta R_m + h_1 - z) d_{л}^2},$$

где $\rho_{в1}$ и $\rho_{в2}$ определены по аналогии с $\rho_{вп}$ исходя из выражения (5) с учетом рис. 48.

Для случая, когда толщина снятого слоя $z = h_1$, величина $\rho_{в2}$ может быть определена из следующих соображений. Для профиля шероховатости, образованной в результате электроэрозионной обработки, расстояние от линии выступов до средней линии приблизительно может быть принято $h_1 \approx \frac{2}{3} R$. После сня-

тия припуска $z = h_1$ соотношение площадей профиля, заполненного металлом и пустотами, существенно изменяется, и поэтому можно в первом приближении принять ΔR_m равной половине



•Рис. 50. Относительное изменение параметров шероховатости поверхности R_z , α , t_p , и ρ_v по мере удаления припуска z/R_{max}

оставшейся высоты профиля, т. е. $\Delta R_m = \frac{1}{6} R$. Кроме того, подчеркивая, что $d_1^2 < \left(d_1 + 2 \frac{\Delta R_m}{\operatorname{tg} \alpha} \right)^2$, получим

$$\eta_p < \frac{d_1^2 \cdot 8h_1}{d_1^2 \cdot 8\Delta R_m} = \frac{h_1}{\Delta R_m} = 4,$$

т. е. для рассматриваемого случая $\rho_{в2}$ возрастает более чем в 4 раза в сравнении с $\rho_{в1}$.

Следует отметить, что в результате чистовой обработки на выступах поверхности, полученной после черновой обработки, формируется своя шероховатость, которая первоначально будет определять характер износа рабочих поверхностей инструмента, обработанного на рассматриваемых режимах. Однако уже после получения первых заготовок опорная длина профиля будет определяться выступами, оставшимися после черновой обработки.

В связи с тем, что по мере удаления части выступов профиля радиус округления выступов увеличивается в η_p раз, и энергию импульса чистовой обработки можно несколько увеличить по сравнению с первоначальным значением. При этом ее максимальная величина при обработке поверхности, полученной на грубом режиме ($I_{ср} = 100$ А), не должна превышать 40—50 мкДж. Относительное изменение R , α , ρ_v и t_p по мере удаления припуска, определяемого в долях R_{max} , показано на рис. 50. Использование рассмотренных условий обработки позволяет изменять отмеченные параметры шероховатости, обеспечивая повышение износостойкости поверхности.

ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА В РАЗЛИЧНЫХ РАБОЧИХ ЖИДКОСТЯХ

Состав рабочей жидкости определяет ряд особенностей удаления металла с поверхности обрабатываемой заготовки [24]. Добавление в керосин поверхностно-активных веществ позволяет обеспечить плотность тока на анодном и катодном пятнах более высокую, чем в чистом керосине [26]. Использование в качестве рабочих сред токопроводящих жидкостей позволяет бес-

печить процесс анодного растворения поверхности обрабатываемой заготовки. Все это оказывает влияние на параметры шероховатости обрабатываемой поверхности.

При электроэрозионной обработке стали У8 латунным электрод-инструментом при $U_{x,x} = 160$ В, $I_{к,в} = 0,25$ А, $C = 0,1$ мкФ в керосине без присадок, в керосине с добавкой 4,5% КИНХ-2 (рабочая жидкость № 1) и в керосине с добавкой 10% CCl_4 (рабочая жидкость № 2) получены единичные лунки с широким (1-й тип) и узким (2-й тип) валиками металла, окаймляющего лунки (3-й тип). При обработке в керосине у лунок 1-го типа $d_{л1} = 41,7$ мкм, $h_{л1} = 2,2$ мкм, $K_1 = 9,45$, у 2-го типа соответственно 55 мкм, 2,0 мкм и 13,75, у 3-го типа 59,1 мкм, 0,7 мкм и 40,8. Соответствующие данные при обработке в рабочей жидкости № 1 будут: для лунок 1-го типа 38,1; 3,1; 6,1; для 2-го типа — 52,8; 2,6; 10,1; для 3-го типа — 51,8; 1,4; 18,5; при обработке в рабочей жидкости № 2: для лунок 1-го типа 37,8; 3,0; 6,3; для 2-го типа — 54,2; 2,6; 10,4; для 3-го типа — 56,1; 1,3 и 21,8 [26].

Учитывая эти данные и принимая во внимание определяющее влияние на параметры шероховатости поверхности $r_{л}$, $h_{л}$ и K , можно получить при обработке в указанных жидкостях различные значения R , ρ_v и других параметров.

Использование воды или жидкостей, ее содержащих, позволяет изменять параметры шероховатости за счет процесса анодного растворения. Установлено, что в этом случае R_z уменьшается, а ρ_v и $\rho_{вп}$ увеличиваются в 2—3 раза в сравнении с обработкой на том же режиме в керосине или масле. Изменение шероховатости поверхностей деталей из стали У8, обработанных при $U_{x,x} = 110$ В, $I_{к,в} = 1,2$ А, $I_p = 0,7$ А и $C = 1$ мкФ на станке мод. 4531 приведено в табл. 17. На рис. 51 показаны профило-

Таблица 17

Изменение параметров шероховатости в зависимости от рабочей жидкости

Рабочая жидкость	R_z	s	r_v	ρ_v	$\rho_{вп}$	n_o	m_o
Керосин	30	39,5	2,2	5,7	5,7	43,7	26,2
ПМС-10	19,2	49	7	19,4	19,2	33,1	20,6
Дистиллированная вода	11,3	40,3	10	15,4	18	41,2	26,5

граммы, записанные с поверхностей, обработанных в разных рабочих жидкостях.

Экспериментальные данные показали, что R_z уменьшается с 30 мкм при обработке в керосине до 19,2 мкм при обработке в ПМС-10 и до 11,3 мкм при обработке в дистиллированной

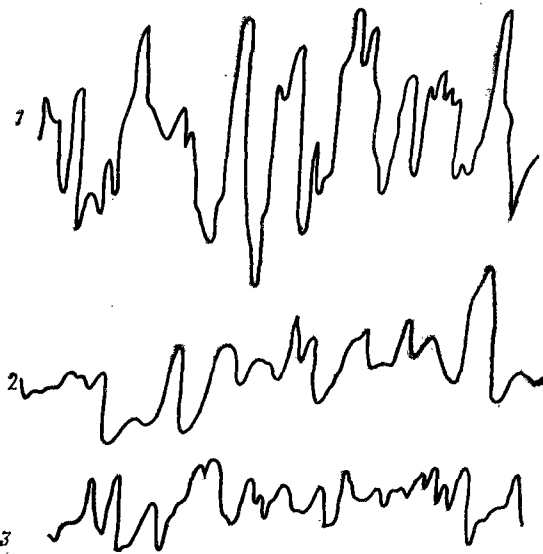


Рис. 51. Профилограммы шероховатостей поверхности образцов из стали У8, обработанных в керосине (1), жидкости ПМС-10 (2) и дистиллированной воде (3). Увеличение В×2000, Г×200

воде. При этом, что очень важно, значения $\rho_{\text{в}}$, $\rho_{\text{вл}}$ и α увеличиваются.

Параметры шероховатости при обработке в воде будут определяться не только режимом обработки, но и временем анодного растворения поверхности обрабатываемой заготовки. Это время применительно к процессу вырезания деталей непрерывно движущейся электрод-проволокой будет определяться линейной скоростью прорезания щели. Следовательно, при обработке в воде параметры шероховатости будут зависеть от толщины

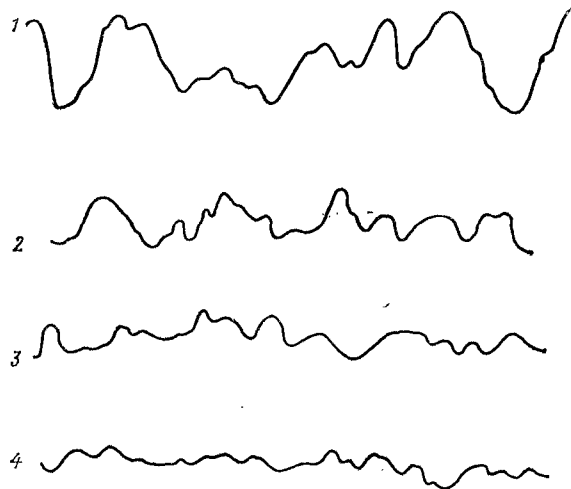


Рис. 52. Профилограммы шероховатости поверхности образцов из стали У8 различной толщины, δ , обработанных в дистиллированной воде на режиме $U_{\text{к.х}}=110$ В, $U_{\text{д}}=60$ В, $I_{\text{к.з}}=2,6$ А, $I_{\text{д}}=1,5$ А, $C=2,5$ мкФ (увеличение 1, 2 — В×400, Г×200; 3, 4 — В×200, Г×100):
1 — $\delta=5$ мм; 2 — $\delta=10$ мм;
3 — $\delta=20$ мм; 4 — $\delta=30$ мм

обрабатываемой заготовки, что и подтверждается экспериментально.

Так, при обработке в дистиллированной воде заготовок из стали У8 на станке мод. 4531 на указанном выше режиме при толщине заготовки 5 мм ($v_3=5$ мм/мин) R_z и $\rho_{\text{в}}$ соответственно равны 35 и 12 мкм, при толщине 20 мм ($v_3=15$ мм/мин) 25 и 28 мкм и при толщине 30 мм ($v_3=1$ мм/мин) 18 и 42 мкм. На рис. 52 показаны профилограммы, записанные с поверхностей деталей разной толщины.

4. ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ НА КАЧЕСТВО ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Поверхность после электроэрозионной обработки формируется в результате наложения лунок, изменение размеров которых позволяет регулировать параметры шероховатости.

Д. Т. Васильев указал на изменение формы и размеров лунки при относительном перемещении электродов: при практически неизменной ширине лунки длина ее в направлении вектора скорости увеличивалась. Последующие исследования [10 и др.] процесса электроэрозионного шлифования показали, что длина $L_{\text{л}}$ лунок, достигнув максимального значения при критической окружности скорости электрод-инструмента $v_{\text{кр}}$, начинает резко уменьшаться, в то время, как глубина лунок $h_{\text{л}}$ непрерывно уменьшается во всем диапазоне скоростей. При этом с ростом скорости v до $v_{\text{кр}}$ интенсивность изменения $L_{\text{л}}$ более значительна, чем при $v > v_{\text{кр}}$ (рис. 53) [10].

Размеры лунки определяются количеством теплоты, выделяемой на единицу поверхности за единицу времени, т. е. величиной теплового потока. Относительное движение электродов приведет к перемещению пятна канала разряда по обрабатываемой поверхности, что уменьшает время теплового воздействия на данную точку поверхности, изменяя тем самым температурное поле и расположение изотерм плавления, определяющих координаты поверхности единичной лунки, а следовательно, ее размеры.

Теплота, выделяемая с ростом относительной скорости электродов, воздействует на большую поверхность обрабатываемой

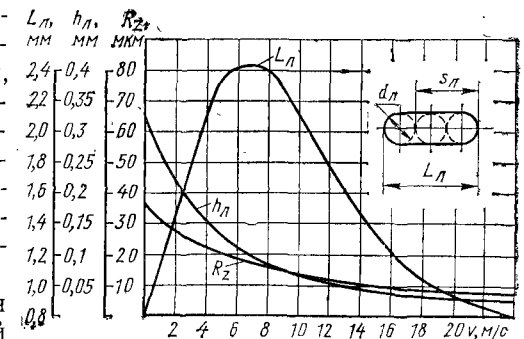


Рис. 53. Влияние относительной скорости электрод-инструмента на R_z , $h_{\text{л}}$, $L_{\text{л}}$ и геометрию лунки

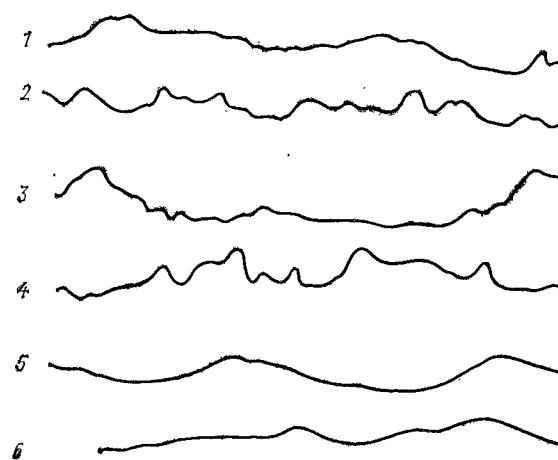
емой заготовки и, следовательно, меньший объем металла достигает температуры кипения, большее количество теплоты будет использоваться для расплавления металла. Это обеспечивает повышение производительности. Для установления зависимости величины R_z и глубины термического влияния от v при различных $t_{и}$ проводилась электроэрозионная обработка торцов дисковых образцов диаметром 16 мм из стали У10, вращавшихся с частотой 30 000 об/мин на модернизированном универсальном шлифовальном станке мод 3110 и образцов диаметром 250 мм, вращавшихся с частотой от 100 до 1500 об/мин на модернизированном универсальном шлифовальном станке мод 312. В обоих случаях обработка велась пластинчатым медным электроинструментом при обильном поливе зоны обработки трансформаторным маслом. В качестве генераторов импульсов использовались ШГИ-125-100 и МГИ-3, позволяющие получать прямоугольную (генераторы ШГИ-40-440 и ШГИ-125-100) и синусоидальную (генератор МГИ-3) формы импульса тока. Основные эксперименты выполнялись при использовании генератора ШГИ-125-100. $I_{ср}$ изменялся от 2 до 20 А, а $t_{и}$ — от 26 до 2200 мкс.

Установлено, что при одних и тех же значениях $I_{ср}$, $t_{и}$ и v формируются лунки разной длины. Так, при $I_{ср}=20$ А, $t_{и}=1000$ мкс и $v=2$ м/с среднеарифметическая длина лунки $L_{л}$, полученной импульсами прямоугольной формы, была 3,1 мм, а синусоидальными импульсами — 2,64 мм. Следует отметить, что обработка заготовок на станке с генератором ШГИ-125-100 формирует лунки, длина которых практически совпадает с $L_{лт}$, полученной расчетом из выражения $L_{лт}=vt_{и}+d_{л}$ [10]. Однако длина лунок, полученных при обработке с генератором МГИ-3, на 10—15% меньше $L_{лт}$.

Очевидно, что разные значения $L_{л}$ обусловлены различной интенсивностью изменения теплового потока в период $t \leq t_{и}$ при различных формах импульса тока, что определяется в первую очередь крутизной переднего и заднего фронтов импульса. Поэтому время существования импульса, в течение которого температура на поверхности обрабатываемой заготовки будет выше температуры плавления металла $t_{и.пл}$, с уменьшением крутизны фронтов уменьшается. В зависимости от формы импульса и крутизны упомянутых фронтов соотношение между $t_{и}$ и $t_{и.пл}$ можно записать в виде $t_{и.пл}=k_t t_{и}$. При этом коэффициент пропорциональности k_t ориентировочно для импульсов тока прямоугольной формы будет 0,95—1,0 и для импульсов синусоидальной формы — 0,85—0,9.

С ростом v значение $L_{л}$ увеличивается. Достигнув максимума $L_{л\max}=k_t vt_{и}+d_{л} \leq (3 \div 4)d_{л}$, при критической скорости $v_{кр}$ лунка начинает делиться на несколько отдельных лунок, взаимное наложение которых будет определять свойства обработанной поверхности. При скорости вращения образца, равной

Рис. 54. Профилограммы шероховатости поверхности, обработанной электроэрозионным шлифованием на различных режимах при $t_{и}=140$ мкс, записанные по направлению вектора скорости (1, 3, 5) и в перпендикулярном направлении (2, 4, 6). Увеличение: 1—4 — $V \times 400$, $\Gamma \times 100$; 5, 6 — $V \times 200$, $\Gamma \times 100$



0,5 $v_{кр}$ величина R_z уменьшается примерно в 1,5, а при $v_{кр}$ — в 2,5—3 раза. При этом поверхность имеет направленную шероховатость.

На рис. 54 в качестве примера приведены профилограммы, записанные с поверхности, обработанной на разных режимах при $v=15$ м/с, по направлению вектора скорости и в перпендикулярном направлении.

На рис. 55 показано влияние относительной скорости движения электродов на величину R_z шероховатости поверхности заготовок, обработанных с различными $t_{и}$. Для лучшего сопоставления полученных данных значение R_z , соответствующее каждому из исследованных режимов при $v=0$, взято за 100%.

Влияние скорости v относительного перемещения электродов на свойства и структуру поверхностного слоя проявляется двояко. Во-первых, как указывалось, с ростом v изменяется тепловое воздействие на обрабатываемую поверхность, во-вторых, вращение образцов обуславливает интенсивное перемешивание рабочей жидкости в зоне обработки, что ускоряет охлаждение поверхности лунки.

С ростом v уменьшается толщина зоны термического влияния и белого слоя. В образце, вращающемся с $v_{кр}$, белый слой исчезает полностью при обработке с $I_{ср}=10$ А и $t_{и}=310$ мкс. В то же время при обработке образца с $v=0$ толщина белого слоя равна десяткам микрометров. В образце, обработанном с $I_{ср}=$

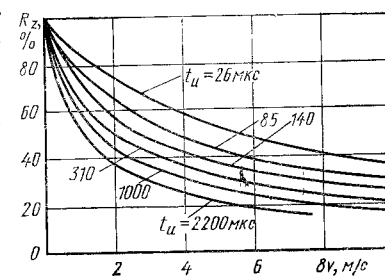


Рис. 55. Относительное изменение R_z в зависимости от v при различных $t_{и}$

$= 10 \div 15$ А, $t_{\text{н}} = 310 \div 500$ мкс и $v \geq v_{\text{кр}}$, белый слой располагается на поверхности отдельными небольшими участками. И только после обработки образца с $I_{\text{ср}} = 20$ А, $t_{\text{н}} = 2200$ мкс и $v \geq v_{\text{кр}}$ белый слой покрывает всю его поверхность; максимальная толщина слоя 30—40 мкм.

Микротвердость поверхности образцов, обработанных при $I_{\text{ср}} \leq 5$ А и $t_{\text{н}} \leq 140$ мкс с $v = v_{\text{кр}}$, практически равна микротвердости основного металла. При последующей обработке образцов на более грубых режимах она несколько повышается и после обработки с $I_{\text{ср}} > 15$ А и $t_{\text{н}} > 1000$ мкс примерно в 2 раза превышает микротвердость основного металла.

Для реализации полученных результатов при электроэрозионной обработке отверстий и полостей перемещение электрод-инструменту относительно заготовки следует придавать в направлении, перпендикулярном оси канала разряда, с необходимой скоростью. Применяя полученные результаты при грубой электроэрозионной обработке ($t_{\text{н}} > 1000$ мкс), можно получить производительность, соответствующую выбранному режиму обработки, а высоту R_z и зону термического влияния — присущие получаемым на более мягких режимах.

ТОЧНОСТЬ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Работы, посвященные вопросам точности электроэрозионной обработки, немногочисленны в связи со сложностью исследований. В большинстве работ рассматриваются величина межэлектродного зазора, поле его рассеяния, колебания размеров обрабатываемых заготовок; небольшая часть работ посвящена рассмотрению отдельных погрешностей, определяющих точность обработки. Возможности успешной эксплуатации технологической оснастки различных типов, рабочие поверхности которой обработаны только электроэрозионным способом, требуют детального рассмотрения вопросов точности.

1. СУММАРНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ

Известно, что на точность обработки влияют систематические и случайные погрешности, причем первые могут быть определены заранее и соответствующим образом компенсированы. Необходимая точность при использовании только электроэрозионной обработки может быть обеспечена тогда, когда суммарная погрешность обработки Δ_{Σ} будет меньше допуска на обрабатываемый размер. Наиболее надежное значение Δ_{Σ} дает вероятностный метод суммирования погрешностей, который в основном и используют при технологических расчетах [34].

Применительно к фасонным поверхностям, где, в частности, линейные размеры определяют точность обработки, Δ_{Σ} можно рассчитать по формуле

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{(k_1 \Delta_{\varepsilon})^2 + (k_2 \Delta_y)^2 + (k_3 \Delta_{\text{н}})^2 + (k_4 \Delta_l)^2 + (k_5 \Delta_{\text{сг}})^2 + (k_6 \Delta_{\text{т}})^2 + (k_7 \Delta_{\text{и}})^2},$$

где k_i — коэффициент относительного рассеяния рассматриваемой элементарной погрешности; Δ_{ε} — погрешность базирования заготовки и электрод-инструмента в приспособлениях; Δ_y — погрешность, вызванная колебанием упругих деформаций системы СПИД; $\Delta_{\text{н}}$ — погрешность настройки станка на заданный размер; $\Delta_{\text{и}}$ — погрешность, определяемая износом электрод-инстру-

мента; $\Delta_{ст}$ — погрешность, обусловленная неточностью станка; Δ_T — погрешность, определяемая колебанием температуры; Δ_l — погрешность размера межэлектродного зазора.

Кроме указанных, на суммарную погрешность обработки Δ_{Σ} могут влиять другие факторы. Методика расчета Δ_{Σ} описана в справочнике технолога-машиностроителя [34], где также приведены данные для определения ряда погрешностей. Ниже рассмотрены некоторые погрешности, специфические для электроэрозионной обработки.

2. БАЗИРОВАНИЕ ЗАГОТОВОК И ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТОВ

Масса заготовки, размеры ее обрабатываемых поверхностей определяют существенно различающиеся требования к приспособлениям для установки заготовок и электрод-инструментов. Представляет интерес система ИМЕА швейцарской фирмы, в которой сопрягаемые детали базируются по двум взаимно перпендикулярным призмам (рис. 56). При этом у одной детали 2, названной положительной зажимной частью, рабочими поверхностями являются наружные поверхности призм, а у другой детали 3, названной отрицательной зажимной частью, — внутренние поверхности призм. Детали соединяются между собой с помощью эксцентрикового зажима, что способствует быстрому выполнению этой операции.

Положительная зажимная часть крепится, как правило, к шпинделю станка, тщательно выверяется и при обработке пар-

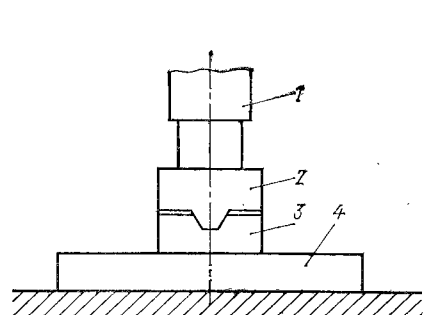
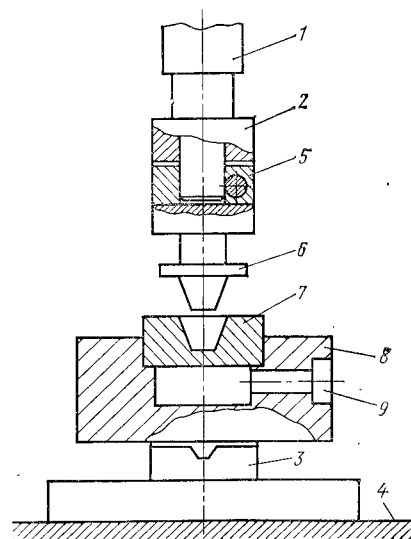


Рис. 56. Установка деталей системы ИМЕА на станке

Рис. 57. Схема обработки электрод-инструментом заготовки при ее базировании с помощью деталей системы ИМЕА



ти заготовок сохраняет неизменное положение. При изготовлении электрод-инструмента его базирование на всех операциях при обработке рабочих поверхностей осуществляется по отрицательной зажимной части, с которой он постоянно связан. Точность выполнения зажимных частей по высоте призм 2—3 мкм, по параллельности рабочих поверхностей призм 3—4 мкм. При использовании системы значительно уменьшается погрешность базирования в сравнении с погрешностью при использовании электрододержателей, а также время закрепления электрод-инструмента и выверка его положения в плоскостях, перпендикулярных плоскости стола.

Эту систему можно применять при базировании заготовки, и выверке ее положения на столе станка относительно электрод-инструмента. Для этого на столе 4 станка устанавливают отрицательную зажимную часть 3, положение которой определяется положительной зажимной частью 2, закрепленной в шпинделе 1 станка. С этой целью шпиндель опускается вниз, положительная зажимная часть входит в отрицательную зажимную часть, которая в итоге занимает точное положение относительно шпинделя.

Такая подготовка базовых деталей гарантирует точное расположение электрододержателя 5 с электрод-инструментом 6 относительно заготовки 7, закрепленной в приспособлении 8, имеющем положительную зажимную часть системы (рис. 57). При необходимости через отверстие 9 приспособления можно нагнетать или отсасывать рабочую жидкость в процессе электроэрозионной обработки.

Учитывая высокую точность призм деталей системы, представляется возможным обрабатывать координатные отверстия в заготовке, точно расположенные относительно друг друга. Для этого заготовка, прикрепленная к положительной зажимной части, может быть повернута относительно отрицательной зажимной части, закрепленной на столе станка, на 90° без потери точности. Благодаря взаимозаменяемости сопрягаемых деталей системы обеспечивается высокая точность при обработке различных заготовок и при замене электрод-инструмента.

Система ИМЕА успешно используется при креплении и базировании заготовок массой до 100 кг. Для обработки более тяжелых заготовок аналогичных систем пока нет, хотя трудности при установке и взаимной выверке обрабатываемых заготовок и электрод-инструментов, имеющих массу в несколько сот и (тем более) тысяч килограммов, особенно ощутимы.

В связи с отсутствием на станках средств для точной взаимной выверки электрод-инструмента и заготовки, полости штампов, как правило, обрабатывают по разметке, что не обеспечивает точного их расположения и сопряжения верхней и нижней половин штампа. После электроэрозионной обработки полости проходят слесарную обработку, с помощью которой лик-

видируются погрешности, вызванные неточной установкой электрод-инструмента. В итоге повышается трудоемкость изготовления крупногабаритных штампов, снижается их стойкость из-за удаления поверхностного слоя, полученного при электроэрозионной обработке, т. е. ликвидируются преимущества, которые обеспечиваются технологическим процессом электроэрозионной обработки полости без последующей слесарной доводки.

Кроме того, в станках с С-образной станиной крепление многогонного электрод-инструмента к торцу рабочей головки весьма затруднительно. Электрод-инструмент, имеющий большую массу, деформирует детали станка, вызывая дополнительные погрешности, а прокачивание рабочей жидкости через межэлектродный промежуток в процессе электроэрозионной обработки крупногабаритной заготовки вызывает вибрации и деформацию системы СПИД.

Фирма АГЕИ (Швейцария) применила иную схему обработки. Заготовка размещалась на направляющих обрабатываемой поверхностью вниз. Между направляющими располагался электрод-инструмент, который в процессе обработки перемещался снизу вверх. В этом случае упрощалась установка электрод-инструмента, но усложнялась выверка его положения относительно заготовки. Процесс обработки протекал неустойчиво в связи с трудностью удаления газа, скапливающегося в зоне обработки. Эта же фирма предложила порталную компоновку станка, у которого верхняя часть поворачивалась относительно одной из стоек портала, что облегчало установку обрабатываемой заготовки и увеличивало размер места для крепления электрод-инструмента. Однако эти и другие попытки не смогли решить поставленной задачи.

В установке типа РКФ 6000 фирмы ЛАМЕТ (Италия) порталная часть с закрепленным электрод-инструментом установлена на направляющих длиной 6 м. Станок имеет рабочую и загрузочную позиции, которые по мере обработки заготовки меняются назначением. После обработки одной заготовки портал перемещается и устанавливается над другой заготовкой, подготовленной для обработки. Такая компоновка станка облегчает базирование заготовок, а высокая жесткость системы СПИД способствует повышению точности обработки.

На предприятии станкостроительной промышленности была предложена схема станка, у которого рабочая головка поворачивалась в вертикальной плоскости. Для закрепления электрод-инструмента рабочая головка поворачивалась торцом вверх, для ведения процесса обработки она вместе с электрод-инструментом возвращалась в исходное положение, располагаясь над заготовкой.

Однако ни одна из схем компоновки станков не решала поставленной задачи в полной мере, не обеспечивала существенного сокращения времени на установку и взаимную выверку

заготовки и электрод-инструмента, повышения точности базирования деталей.

Существенно снизить трудоемкость крепления и повысить точность базирования крупногабаритных электрод-инструментов позволяет станок, имеющий новую схему компоновки (см. рис. 68). Стол станка и верхнюю поверхность электрододержателя при этом необходимо оснастить базовыми деталями и подвижными (например, шаровыми) опорами, на которых при установке располагаются заготовка и электрод-инструмент. Последний закрепляется в корпусе вне станка, и рабочий профиль может быть с высокой точностью расположен относительно базовых поверхностей. Указанное позволяет повысить точность относительного расположения электрод-инструмента и заготовки, а также сократить время их установки.

3. ПОГРЕШНОСТЬ ОТ ИЗНОСА ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТА

Износ электрод-инструмента оказывает существенное влияние на точность изготавливаемой детали. Он обусловлен многими факторами, основными из которых являются режим обработки, материал и размеры электрод-инструмента. При этом случайная погрешность Δ_n определяется не средней экспериментально установленной величиной износа, а его колебаниями при обработке заготовок в равных условиях, обусловленными нестабильностью режима обработки, структуры материала электрод-инструмента и обрабатываемой заготовки и другими причинами. При этом пределы колебания износа растут при переходе к мягким режимам обработки. С целью выявления наиболее стойких материалов были попытки разработать требования к материалу электрод-инструмента, обладающему наиболее высокой эрозионной стойкостью [18, 29].

В зависимости от материала обоих электродов и режима обработки изменяется в значительных пределах относительный износ электрод-инструмента. Последний изготавливают из различных материалов, из которых медь, углеродистые композиции ЭЭГ, МПГ, ЭЭПГ, вольфрамомедная композиция наиболее распространены вследствие их сравнительно малого износа. Так, электрод-инструменты из углеродистых композиций ЭЭПГ при обработке стали 45 на станке с генератором ШГИ-125-100 прямоугольными импульсами с $I_{cp} = 50 \div 120$ А имеют линейный износ 0,12—0,16%, а при обработке импульсами гребенчатой формы с $I_{cp} = 30$ А — износ 0,03%. При обработке твердых сплавов относительный износ медного электрод-инструмента находится в пределах 50—100% в зависимости от режима обработки. Конкретные данные по износу электрод-инструментов для различных условий обработки приведены в работах [18, 28, 44 и др.].

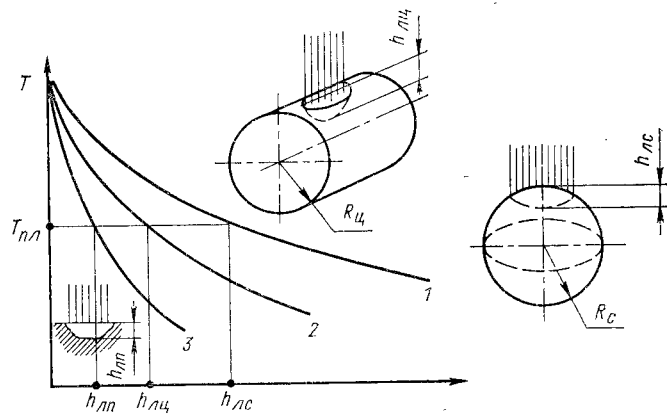


Рис. 58. Качественное распределение температуры T по глубине поверхностного слоя при обработке шара (1), цилиндра (2) и плоскости (3)

Известно, что форма и размеры электрод-инструмента влияют на его износ. Чем меньше поперечное сечение электрода, тем больше его износ при обработке заготовки на заданном режиме. Поперечное сечение электрод-инструмента, при котором наблюдается наиболее интенсивное изнашивание, значительно больше при грубых режимах обработки, чем при мягких. Такая связь определяется тепловым воздействием на поверхность электрод-инструмента, обуславливающим объем расплавленного и испаренного металла и размеры образующейся лунки.

Расположение изотермы, в частности изотермы $T_{пл}$, при прочих равных условиях определяется формой и размерами тела, подвергшегося тепловому воздействию [19]. На рис. 58 показано распределение температур в шаре 1, цилиндре 2, и пластине 3. Слой металла с температурой плавления $T_{пл}$ находится на наибольшей глубине при обработке шарового участка, а на наименьшей глубине — при обработке пластины, т. е. глубина единичной лунки, образовавшейся на сферическом участке $h_{лс}$ электрод-инструмента, будет наибольшая, а на плоском участке $h_{лп}$ — наименьшая: $h_{лс} > h_{лц} > h_{лп}$. Однако такое соотношение имеет место только в определенном диапазоне радиусов сферы R_c и цилиндра $R_{ц}$. При увеличении R_c и $R_{ц}$ разница глубин лунок будет уменьшаться. Следовательно, связь между $h_{лп}$, $h_{лц}$ и $h_{лс}$ зависит от коэффициента B , представляющего собой отношение глубины лунки к радиусам R_c или $R_{ц}$. Коэффициент B будет связан с положением изотермы $T_{пл}$ на сферическом и цилиндрическом участках и плоскости.

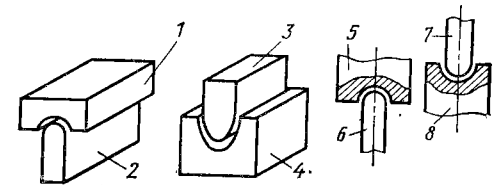
Электрод-инструмент и обрабатываемая им поверхность заготовки имеют плоскости и ребра, образованные в результате пересечения двух сопрягаемых поверхностей, а также углы при

пересечении трех плоскостей. При любом методе обработки электрод-инструмента получить ребра и углы без скругления нельзя, поэтому представим ребра как часть цилиндра, а угол — как часть сферы. Углы электрод-инструмента теряют свои размеры быстрее, чем ребра, что подтверждается многочисленными исследованиями [6]. Кроме того, глубина теплового воздействия будет определяться величиной угла заострения электрод-инструмента. При обработке стальной детали цилиндрическим медным электрод-инструментом с вершиной, заостренной под углом $15-20^\circ$, наблюдался различный износ в зависимости от режима обработки. Так, при $W_{и} = 5 \cdot 10^{-5}$ Дж с электрод-инструмента был удален слой металла толщиной $0,10-0,13$ мм, при $W_{и} = 10^{-3}$ Дж — $0,45-0,50$ мм и при $W_{и} = 0,5$ Дж — $1,4-1,5$ мм. При тех же условиях обработки глубина лунок, образовавшихся на плоской поверхности, была в 2—4 раза меньше.

Установлено, что при электроэрозионной обработке полости в заготовке из стали 5ХНМ интенсивность изнашивания углов медных электрод-инструментов практически стабилизируется при $B_{эс} = 0,005 \div 0,012$, а ребер — при $B_{эс} = 0,012 \div 0,04$, увеличиваясь при малой глубине обрабатываемой полости. Эти значения могут использоваться, если площадь лунки в несколько раз меньше площади изучаемого участка электрод-инструмента. Величина коэффициента B зависит от материала электрод-инструмента, глубины его внедрения в обрабатываемую заготовку и ряда других факторов, изменяющих тепловое воздействие на рассматриваемые участки.

Очевидно, что при различных B_3 с разных участков обрабатываемой заготовки за один электрический разряд будут удаляться разные объемы металла. Отсюда при определенных условиях будут иметь место соотношения $\gamma_{32} < \gamma_{34}$, $\gamma_{36} > \gamma_{38}$ и $\gamma_{31} < \gamma_{33}$, $\gamma_{35} < \gamma_{37}$ (рис. 59). В итоге относительный износ электрод-инструмента, определяемый как $\Delta\gamma_3 = \gamma_3/\gamma_3$, будет зависеть от кривизны рассматриваемых участков как электрод-инструмента, так и обрабатываемой заготовки (γ_3 , γ_3 — скорость съема металла, удаляемого с электрод-инструмента и заготовки соответственно). Приведенные данные позволяют наметить пути расчета режимов электроэрозионной обработки исходя из наименьшего износа электрод-инструмента и получения наиболее точного профиля обрабатываемой заготовки. Это особенно важно при обработке сложнофасонного профиля на чистовых режимах.

Рис. 59. Схемы обработки заготовок (2, 4, 6, 8), обуславливающие различный износ электрод-инструментов (1, 3, 5, 7)



В частности, известно [35], что $h_{лз} = k_3 \sqrt[3]{W_{и}}$ и $h_{нз} = k_3 \sqrt[3]{W_{и}}$, где $k_3 = 0,15$ для медного электрод-инструмента, а $k_3 = 0,5$ для стальной заготовки. Отсюда, с учетом коэффициента B можно определить $W_{и}$ исходя из особенностей геометрии электрод-инструмента и заготовки:

$$W_{и,з} = (BR/k)_{з,з}^3.$$

Для осуществления процесса обработки берется меньшее значение $W_{и}$ из подсчитанных применительно к электрод-инструменту и заготовке.

Конечно, рассмотренное определение чистового режима обработки не устраняет погрешности $\Delta_{и}$. Ее влияние может быть различным. При обработке сквозных отверстий $\Delta_{и}$ обычно компенсируют тем, что после вскрытия отверстие калибруют дополнительным перемещением электрод-инструмента на величину, равную 0,2—0,5 глубины отверстия. При обработке полостей на мягких режимах стремятся снимать на окончательном переходе как можно меньший припуск. Например, при электроэрозионной обработке полости в стальной детали медным электрод-инструментом на режиме $t_{и} = 20$ мкс, $f = 22 \div 28$ кГц износ равен 80—100%, т. е. предел колебания износа составляет 20% [44]. Следовательно, при обработке партии заготовок при удалении припуска в 1 мм максимальная погрешность $\Delta_{и}$ будет 0,2 мм, а при удалении припуска в 0,1 мм — 0,02 мм.

При электроэрозионном вырезании деталей непрерывно движущейся электрод-проволокой износ последней в определенной степени компенсируется непрерывной подачей в зону обработки неизношенных ее участков. Однако эффективность такой компенсации зависит от многих факторов и в полной мере не обеспечивает желаемых результатов, в частности, конусность прорезанного паза сохраняется.

Ширину прорезаемой щели b и угол $\psi_{и}$ наклона боковой поверхности к вертикали (рис. 60) можно автоматически поддерживать независимо от износа электрод-проволоки и от колебания ее диаметра. Суть такого процесса заключается в автоматическом регулировании напряжения, подаваемого на электроды, в зависимости от диаметра d электрод-проволоки и его отклонения от выбранного номинального значения d_0 . Ширина щели, образуемой при обработке непрерывно движущейся электрод-проволокой в нижней части заготовки будет (рис. 60)

$$b = d + 2l = d_0 + 2l + \Delta d,$$

где $\Delta d = d - d_0$ — отклонение диаметра электрод-проволоки от номинального значения.

Изменение размера щели из-за колебания Δd может быть компенсировано за счет управления величиной межэлектродно-

Рис. 60. Схема электроэрозионного разрезания заготовки 1 непрерывно движущейся электрод-проволокой 2

го зазора l на $\Delta l = (-0,5 \div 0,5)d$, что возможно выполнить за счет изменения напряжения U .

Поскольку зависимость U от l можно записать как $U = k_U l^{x_U}$, то для изменения l на электроды необходимо подать напряжение

$$U = U_0 \left(1 - \frac{\Delta d}{2l_0}\right)^{x_U},$$

которое должно отличаться от номинального U_0 , соответствующего значению d_0 , на величину

$$\Delta U = U - U_0 = U_0 \left[\left(1 - \frac{\Delta d}{2l_0}\right)^{x_U} - 1 \right],$$

где l_0 — зазор при U_0 .

Таким образом, если $d = d_0$, то никакого регулирования напряжения не требуется. При $d > d_0$ для поддержания постоянного значения b необходимо уменьшить l за счет снижения напряжения на ΔU . При $d < d_0$, наоборот, требуется увеличить l , повысив напряжение на ΔU .

Рассмотренный процесс может быть осуществлен с применением различных устройств, настраиваемых на тот или иной размер электрод-инструмента. Для получения постоянного угла $\psi_{и}$, который, при прочих равных условиях, зависит от $b_{и}$, необходимо непрерывно измерять диаметр $d_{и}$ электрод-проволоки после ее выхода из заготовки, приняв в качестве номинального размера величину $d_{и0}$, определяющую угол $\psi_{и}$. Такой процесс позволит полностью устранить влияние неравномерности износа электрод-проволоки на величину угла $\psi_{и}$ и ширину щели.

На рис. 61 представлена принципиальная схема станка [А. с. № 505550 (СССР)], позволяющая осуществить описанный процесс обработки. В этом станке электрод-проволока 2 при перематке с катушки 11 на катушку 4 проходит около устройства 5, непрерывно измеряющего диаметр электрод-проволоки. Для стабилизации $\psi_{и}$ и b независимо от износа электрод-проволоки устройство 5 устанавливают так, чтобы измерять сечение электрод-проволоки на участке $a-a$, а при устранении влияния колебания диаметра электрод-проволоки на ширину паза — участке $б-б$. Такое устройство обеспечивает получение на его выходе напряжения U , пропорционального диаметру измеряе-

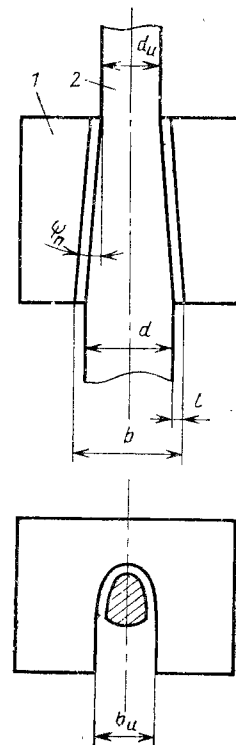
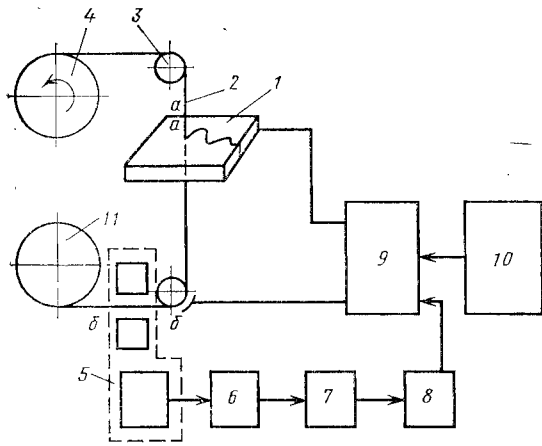


Рис. 61. Принципиальная схема станка, обеспечивающая пререзание точных пазов непрерывно движущейся электрод-проволокой



мой проволоки. Измерительный мост 6 предназначен для сравнения напряжения, выдаваемого устройством 5 и пропорционального фактическому диаметру d , с эталонным значением напряжения, соответствующим номинальному диаметру d_0 .

На выходе измерительного моста включен блок задержки 7, предшествующий усилителю-формирователю 8, подключенному на вход регулируемого генератора импульсов 9, питание на который поступает от выпрямителя 10, выполненного на полупроводниковых приборах. На выходе устройства 5 формируется электрический сигнал, напряжение которого пропорционально диаметру электрод-проволоки. Далее сигнал поступает на измерительный мост 6, где его напряжение сравнивается с эталонным, соответствующим номинальному диаметру электрод-проволоки. Измерительный мост выдает напряжение, равное разности напряжений, соответствующих измеренному и номинальному диаметрам электрод-проволоки.

Учитывая, что диаметр проволоки изменяется плавно, а также, что место измерения диаметра находится на расстоянии L до входа проволоки в обрабатываемую заготовку, изменение напряжения должно происходить с некоторой задержкой времени t , равной L/v_0 , где v_0 — линейная скорость перемотки электрод-проволоки в процессе электроэрозионной обработки. Поэтому сигнал с измерительного моста поступает в блок задержки 7 и далее на усилитель 8, формирующий сигнал управления регулируемым генератором импульсов 9. В итоге на электроды подается такое напряжение, которое изменяет I , компенсируя колебания диаметра электрод-проволоки.

4. ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА ЭЛЕКТРОДОВ НА ОБРАЗОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ

При электроэрозионной обработке выделяется значительное количество теплоты, которое постепенно нагревает рабочую жидкость. Последняя, омывая электрод-инструмент и обрабатываемую заготовку, нагревает их. При обычных условиях ведения процесса температура рабочей жидкости, как правило, не поднимается выше $60-70^\circ\text{C}$, но при обработке в предварительно нагретых жидкостях она может достигать нескольких сот градусов.

В процессе обработки температура рабочей жидкости изменяется по экспоненциальному закону. Закономерность ее изменения по времени можно определить экспериментально; делаются попытки ее теоретического определения [45]. Однако знание температуры рабочей жидкости еще не позволяет точно определить размеры электрод-инструментов и заготовки, неравномерно нагреваемых в процессе обработки. В связи с этим при определении температурной погрешности следует оперировать средневзвешенной избыточной температурой, которую можно определить по выражению

$$T = \frac{T_1 L_1 + T_2 L_2 + \dots + T_n L_n}{L_1 + L_2 + \dots + L_n},$$

где $L_p = L_1 + L_2 + \dots + L_n$ — расчетный размер, состоящий из отдельных участков L_i ; $T = T_k - T_0$ — избыточная температура, определяемая как разность температур соответствующего участка в конце и начале обработки.

Вследствие нагрева электрод-инструмента и обрабатываемой заготовки возникают сравнительно большие температурные систематические и случайные погрешности. Величина систематических погрешностей δ_T в направлении, перпендикулярном перемещению электрод-инструмента, ориентировочно может быть определена из выражения

$$\delta_T = L_p (\alpha_0 T_0 - \alpha_3 T_3),$$

где L_p — расчетный размер полости; α_0 , α_3 — коэффициенты линейного расширения материала электрод-инструмента и заготовки соответственно; T_0 , T_3 — средневзвешенные избыточные температуры электрод-инструмента и заготовки соответственно.

Коэффициенты линейного расширения материала заготовки и электрод-инструмента могут различаться более чем в 2—4 раза. В связи с этим наибольшее значение рассматриваемой погрешности будет при обработке стальных заготовок электрод-инструментами из алюминия и углеграфитовых материалов. В результате обработки поверхности, имеющей размер длиной 200 мм, при нагреве рабочей жидкости до 60°C возмож-

но образование погрешности до 0,1 мм [44], которую следует отнести к систематической погрешности.

Таким образом, проведя тепловой расчет или имея экспериментальные данные по изменению температуры электрод-инструмента и заготовки в процессе обработки на различных режимах, можно учесть указанную температурную погрешность, скорректировав соответствующим образом размеры электрод-инструмента.

Однако в процессе электроэрозионной обработки наряду с систематическими образуются и случайные погрешности, вызванные колебаниями температуры. Температура рабочей среды во время работы станка возрастает плавно по экспоненциальному закону. В зависимости от размеров обрабатываемого профиля, режима обработки, объема рабочей ванны и других факторов время обработки исчисляется от нескольких минут до нескольких часов. После окончания обработки первой заготовки шпиндель станка вместе с электрод-инструментом отводятся от нее, стол станка поднимают вверх с тем, чтобы рабочая ванна с жидкостью не мешала осмотру детали.

Во время снятия обработанной детали и установки следующей заготовки, а также замены электрод-инструмента или его правки непосредственно на станке рабочая жидкость охлаждается. Длительность вспомогательных операций различна даже при обработке партии однотипных деталей; так, правка электрод-инструмента осуществляется не после каждой детали, а его замена — еще реже. Таким образом, температура рабочей жидкости, несмотря на постоянную занятость станка, будет колебаться. При этом температуры T_2 , T_4 не могут быть заранее известны из-за неопределенности времени $\tau_1-\tau_2$ и $\tau_3-\tau_4$ (рис. 62).

С другой стороны, продолжительность обработки ($\tau_0-\tau_1$, $\tau_2-\tau_3$ и т. д.) даже одинаковых заготовок будет различна в связи с изменением показателей режима обработки, степени загрязненности рабочей жидкости, величины снимаемого припуска и по другим причинам. Все это приводит к нагреву рабочей жидкости, а следовательно, обрабатываемой заготовки и электрод-инструмента до различных температур T_1 , T_3 , T_5 в конце обработки.

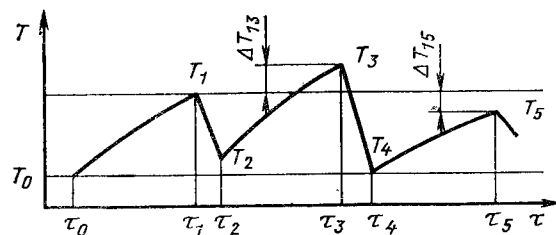


Рис. 62. Изменение температуры при электроэрозионной обработке партии деталей

Таким образом, величину температуры рабочей среды ΔT_{13} , ΔT_{15} и т. д. невозможно определить заранее, в связи с чем она является источником образования случайной элементарной погрешности Δ_T , оказывающей существенное влияние на точность обработки. Например, на длине 200 мм колебания температуры всего лишь на 5°C при обработке стальной заготовки алюминиевым электрод-инструментом влечет погрешность в пределах 12,5 мкм. При выполнении прецизионных работ только одна эта погрешность приведет к браку детали. Поэтому появляется необходимость обеспечить стабилизацию температуры ΔT_{13} , ΔT_{15} и т. д. рабочей жидкости в процессе электроэрозионной обработки.

В целях повышения точности обработки целесообразно оснащать станки системой нагревательных и охлаждающих устройств, управляемых датчиками температур.

5. ПОГРЕШНОСТЬ РАЗМЕРА МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО ЗАЗОРА

Серьезным источником случайных погрешностей является наличие зазора l между электрод-инструментом и обрабатываемой заготовкой. В зависимости от неоднородности их структуры, изменения свойств рабочей жидкости и режима обработки межэлектродный зазор не остается постоянным при обработке партии заготовок даже на одном режиме. Он колеблется в пределах от l_{\max} до l_{\min} при номинальном значении l_0 . Поле рассеяния зазора $\delta = l_{\max} - l_{\min}$. Объем металла, удаленный с электрода, и размеры лунок, образующихся на поверхности электрод-инструмента и обрабатываемой заготовки, зависят от их теплофизических характеристик, свойств рабочей жидкости и условий ведения процесса. Поэтому при обработке заготовки с неоднородной структурой каждый импульс тока будет образовывать на ее поверхности лунки различных размеров.

С другой стороны, от свойств материалов электродов и рабочей жидкости зависит напряжение поддержания дуги U_s , величина которого влияет на энергию импульса $W_{\text{и}}$, что приводит к образованию различных межэлектродных зазоров l_1 и l_2 на разных участках зон обработки (рис. 63), обуславливая появление элементарных случайных погрешностей. Погрешность определяется разностью l_1-l_2 , которая равна

$$l_{\text{эз}} = l_1 + l_2 = (1 + \Delta\gamma_0) l_0 = (1 + \Delta\gamma_0) [(h_{\text{л1}} - R_1) - (h_{\text{л2}} - R_2)].$$

После некоторых преобразований можно записать

$$l_{\text{эз}} = \frac{r_{\text{л1}} K_2 (1 - K_1 A_{R1}) - r_{\text{л2}} K_1 (1 - K_2 A_{R2})}{K_1 K_2} (1 + \Delta\gamma_0),$$

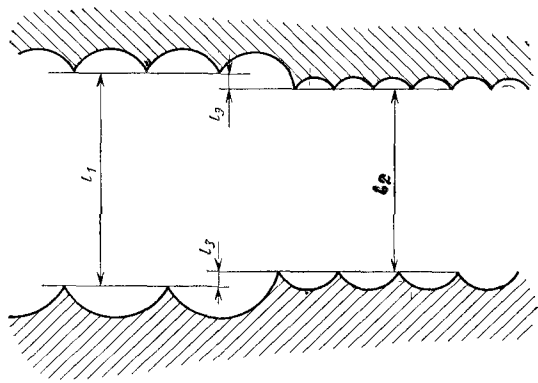


Рис. 63. Образование погрешности, связанной с изменением величины межэлектродного зазора

где $K = r_{л}/h_{л}$, а индексы 1 и 2 указывают принадлежность рассматриваемого показателя к участку 1 и 2 обрабатываемой заготовки.

Полученное выражение позволяет определить влияние многих факторов на элементарные погрешности, вызываемые колебанием межэлектродного зазора и, в частности, на погрешность, связанную с размерами единичных лунок.

В ряде случаев невозможно точно установить режим обработки каждой последующей заготовки из ряда одинаковых. Это приводит к образованию случайной погрешности. В частности, при неточной установке силы тока будет изменяться энергия импульса, что приведет к изменению объема удаляемого металла с обрабатываемой заготовки за один импульс и, в конечном счете, к изменению размера межэлектродного зазора. Кроме того, возможно изменение режима обработки в течение процесса. В частности, при колебании напряжения пробоя $U_{пр}$ будет изменяться межэлектродный зазор. При этом, чем больше $U_{пр}$, тем больший зазор будет пробит, т. е. если $U_{пр1} > U_{пр2}$, то $l_1 > l_2$. Следовательно, на различных участках между электрод-инструментом и обрабатываемой заготовкой будет различный зазор.

При обработке однородного материала погрешность, связанная с колебанием режима обработки, может быть определена по выражению, полученному из вышеприведенного уравнения при $K_2 = K_1$ и $A_{R1} = A_{R2}$:

$$\Delta_p = \frac{(1 + K_1 A_{R1})(r_{л1} - r_{л2})}{K} (1 + \Delta\gamma_3).$$

Погрешность Δ_3 , связанная с неоднородностью материала электрод-инструмента при обработке однородного материала заготовки, будет определяться колебанием $\Delta\gamma_3$ и др. факторами.

Этим, безусловно, не исчерпывается многообразие факторов, оказывающих непосредственное влияние на изменение l . Суммарная погрешность обработки, связанная с колебанием межэлектродного зазора, будет

$$\Delta l = \sqrt{(k_3 \Delta_3)^2 + (k_3 \Delta_3)^2 + (k_p \Delta_p)^2 + (k_{ж} \Delta_{ж})^2 + (k_{пр} \Delta_{пр})^2},$$

где Δ_3 , Δ_3 — погрешности, определяемые неоднородностью материала обрабатываемой заготовки и электрод-инструмента соответственно; Δ_p , $\Delta_{ж}$ — погрешности, связанные с изменением режима обработки и свойств рабочей жидкости соответственно; $\Delta_{пр}$ — прочие погрешности; k_i — коэффициенты относительного рассеяния.

На рис. 64 показано изменение бокового межэлектродного зазора l_6 и размеры δ_6 его колебания (заштриховано) при обработке твердого сплава медным, латунным и чугуном электрод-инструментами. Экспериментальные исследования показали, что при обработке твердого сплава величина l_6 при обработке отверстий чугуном электрод-инструментом больше, чем при обработке медным и латунным электрод-инструментом. Минимальный зазор на одном и том же режиме обработки имеет место при использовании латунных электрод-инструментов. Так, при обработке сплава ВК20 на режиме $W_{н} = 0,1$ Дж величина l_6 в случае использования электрод-инструмента из чугуна СЧ 18—36 равна 0,25 мм (кривая 1), из меди М1—0,20 мм (кривая 2) и из латуни ЛС59—0,18 мм (кривая 3). При этом колебания δ_6 зазора l_6 в случае использования электрод-инструментов из различных материалов также различно и растет с увеличением энергии импульса.

Погрешность электроэрозионного вырезания деталей, при прочих равных условиях, определяется колебанием $\delta_{п}$ зазора $l_{п}$ между боковыми поверхностями вырезаемой детали и электрод-проволоки, колебанием $\delta_{к}$ зазора между боковыми поверхностями копира и электрод-проволоки. Зависимость влияния емкости C на $l_{п}$ и $\delta_{п}$ представлена на рис. 65.

Величина зазора $l_{п}$ и поле его рассеяния $\delta_{п}$ (заштриховано) также зависят от толщины обрабатываемой заготовки и диаметра электрод-проволоки. При вырезании по копиру стальных деталей в дистиллированной воде (напряжение $U_{х.х} = 125$ В, $U_p = 50 \div 60$ В) были получены следующие данные:

Режим обработки:

$I_{к.з}$, А	3,1	3,1	2,6	1,6
I_p , А	1,6	1,6	1,7	0,8
C , мкФ	1,5	1,5	1,25	1,25
Толщина заготовки, мм	20	10	6	6
Диаметр электрод-проволоки, мм	0,185	0,185	0,185	0,100
$l_{п}$, мм	0,030	0,027	0,025	0,023
$\delta_{п}$, мм	0,013	0,011	0,008	0,006

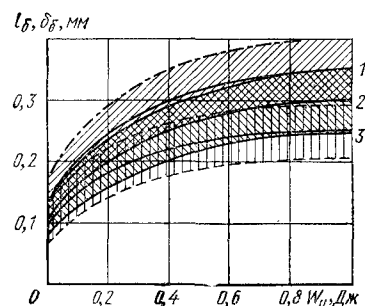


Рис. 64. Изменение бокового межэлектродного зазора l_b и колебание δ_b его размеров в зависимости от энергии импульса при обработке твердого сплава чугунами (1), медными (2) и латунными (3) электрод-инструментами

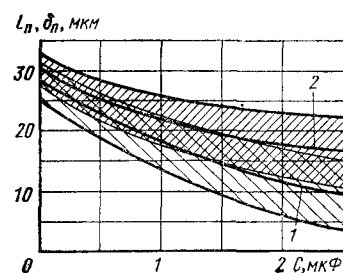


Рис. 65. Изменение l_p и δ_p в зависимости от емкости C при вырезании деталей из латуни ЛС59 (1) и стали Х12М (2)

Как видно, с переходом к более грубым режимам (с ростом C) зазор l_p между боковыми поверхностями электрод-провода и прорезаемой щели несколько уменьшается и немного возрастает с увеличением толщины заготовки. Такое изменение l_p можно объяснить различным количеством дополнительных разрядов между боковыми поверхностями электрод-провода и заготовки, приходящихся на единицу площади поверхности прорезанной щели за равный промежуток времени. Очевидно, что чем больше линейная скорость прорезания щели, тем меньше электрод-проводка находится на одном обрабатываемом участке заготовки, тем меньше в единицу времени имеется дополнительных боковых разрядов, увеличивающих l_p . С ростом толщины обрабатываемой заготовки хотя и увеличивается производительность, скорость прорезания щели уменьшается, в связи с чем на каждом обрабатываемом участке заготовки возникает много дополнительных боковых разрядов, что приводит к некоторому увеличению l_p .

Учитывая, что на контур электрод-провода — копир подается напряжение 2—3 В, зазор l_k между боковыми поверхностями указанных деталей будет находиться в пределах 2—3 мкм. Однако в связи с инерционностью системы регулирования рассматриваемый зазор колеблется от 0 до 6 мкм, т. е. поле рассеяния зазора составляет $\delta_k = 6$ мкм.

Электроэрозионный способ широко применяют для изготовления деталей, различных по форме и размерам. Этому в значительной степени способствовало создание новых станков и источников питания, обеспечивающих повышение производительности и снижение износа электрод-инструмента, разработка оригинальных схем формообразования, а также результаты работ, позволивших повысить качество обработанной поверхности. Фасонные отверстия и полости, внутренние и наружные поверхности тел вращения всевозможных размеров могут быть обработаны на соответствующих станках методами прямого и обратного копирования геометрических форм электрод-инструмента в обрабатываемой заготовке, вырезания непрерывно движущейся электрод-проводкой, шлифования, разрезания, огибания. Описать практическое использование всех методов и технологических схем электроэрозионной обработки, которым посвящено много работ [5, 10, 28, 33, 35, 44 и др.], не представляется возможным, поэтому здесь будут рассмотрены только некоторые примеры электроэрозионного способа при изготовлении деталей технологической оснастки.

1. СТАНКИ

Для оснащения серийно выпускаемых станков мод. 4Г721, 4Е723, 4Е724, 4726, 4Д722А и др. используются транзисторные широкодиапазонные генераторы импульсов типа ШГИ-125-100, ШГИ-40-440В, ШГИ-63-440 и др. для одноконтурной обработки и генераторы типа ШГИ-63-44/2, ШГИ-21-440/3, ШГИ-63-44/3, для многоконтурной обработки. Станок мод. 4Г721 обеспечивает максимальную производительность 250 мм³/мин, наименьшее значение $R_z = 6 \div 10$ мкм и наивысшую точность 0,02—0,05 мм, а станок мод. 4726 — производительность до 10 000 мм³/мин, $R_z = 20 \div 40$ мкм, точность обработки крупногабаритных полостей в пределах 0,5—0,8 мм. Более подробно технические харак-

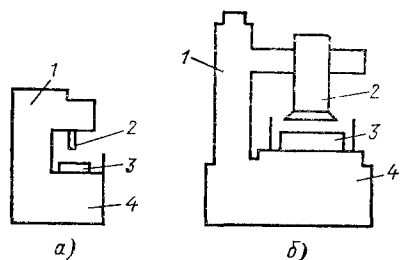


Рис. 66. Принципиальные схемы компоновки серийных станков для электроэрозионной обработки поверхностей до 0,05 м² (а) и до 0,3 м²:

1 — станина станка; 2 — электрододержатель; 3 — обрабатываемая заготовка; 4 — основание станка

характеристики станков приведены в приложении (по данным ЭНИМС).

Все виды отверстий и полостей, за малым исключением, могут быть обработаны на копировально-прошивочных станках с использованием тех или иных приспособлений. Для обработки сравнительно небольших полостей, размером до 0,3 м², используются копировально-прошивочные станки мод. 4Г721М, 4Д722А, 4Е723, 4Е724, 4726, 257, 183 и др., принципиальная компоновка которых показана на рис. 66.

Увеличение размеров обрабатываемых деталей и необходимость обеспечения при этом достаточно высокой точности обработки вызвала пересмотр компоновки электроэрозионных копировально-прошивочных станков с целью резкого повышения их жесткости. Швейцарская фирма АГИЕ разработала гамму из четырех станков с портальной конструкцией станины, в которых расстояние от торца шпинделя до поверхности стола изменяется от 1200 до 2500 мм, ход шпинделя — от 700 до 1500 мм, а размеры стола — от 1300×1800 до 4000×5000 мм (рис. 67). Такая компоновка использована при создании фирмой АГИЕ станка мод. ЕРМ90, (рис. 67, а) народным пред-

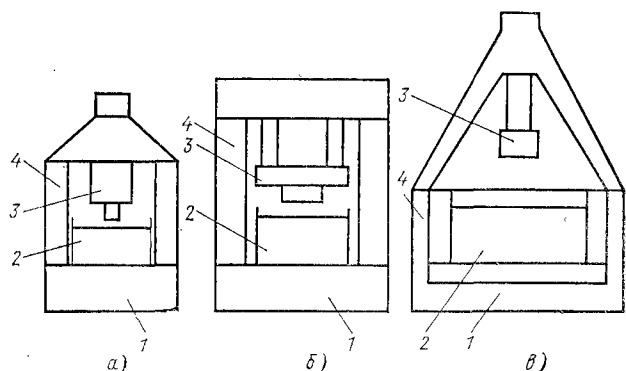


Рис. 67. Принципиальные схемы компоновок станков с портальными станинами фирм АГИЕ (а), «Герман Шлимме» (б) и «Ламет» (в):

1 — основание станка; 2 — обрабатываемая заготовка; 3 — электрододержатель; 4 — станина станка

приятием ГДР Индукал Берлин «Герман Шлимме» (рис. 67, б) и итальянской фирмой «Ламет» станка мод. РКФ 6000 (рис. 67, в).

Особый интерес представляет станок мод. РКФ 6000, предназначенный для обработки крупногабаритных штампов для вытяжки деталей размером до 6 м². Эти станки изготовляют в двух модификациях, которые отличаются размерами и состоят из двух ярусов: верхнего и нижнего. На фундаменте, расположенном в верхнем ярусе, установлены связанные между собой горизонтальные направляющие длиной 6 м, по которым перемещаются с помощью специального привода две мостовые стойки; в стойках размещены рабочие головки с электрододержателями. Столы, на которые устанавливаются обрабатываемые заготовки, расположены на основании рабочей ванны на специальных суппортах, изолированных при помощи керамических прокладок от ванны и друг от друга. Все это позволяет установить заготовку массой до 20 т и электрод-инструмент массой до 8 т и обеспечить правильное их относительное расположение.

В нижнем ярусе станка, расположенном ниже уровня пола, находятся резервуары с рабочей жидкостью, гидростанция для подачи жидкости в зону обработки, система ее очистки и другие устройства. Резервуар вмещает 41 000 л рабочей жидкости, из которых 31 000 л могут быть перекачаны насосами в рабочие ванны за три минуты. Очистка жидкости производится с помощью центробежных фильтров, размеры металлических продуктов эрозии в очищенной жидкости не превышают 5 мкм.

Рассмотренные станки имеют ряд недостатков, связанных с тем, что установку, выверку положения и крепление многотонного электрод-инструмента снизу к торцу шпинделя станка приходится выполнять в крайне ограниченном пространстве между стойками арочной конструкции станины. Схема компоновки станка для электроэрозионной обработки крупногабаритных деталей, приведенная на рис. 68, позволяет сократить габаритные размеры станка, снизить его металлоемкость, упростить операцию установки, выверки и крепления электрод-инструмента и заготовки, а также повысить точность обработки фасонных полостей.

Станок имеет основание 4 на котором смонтирован стол 1 и направляющие втулки 5. Во втулки входят направляющие колонны 6, связанные с электрододержателем 2. В зависимости от размеров обрабатываемой заготовки 3 число направляющих колонн в станке может быть различным. Поверхность колонн закрыта гофрированными чехлами. Электрододержатель 2 имеет в средней части окно с буртиком, на котором по окружности над направляющими колоннами или поблизости от них размещены шарики. Корпус 7, имеющий полость, закрытую крышкой, с электрод-инструментом 8, установлен на шарики и закреплен на электрододержателе 2. Полости А и Б связаны маслопрово-

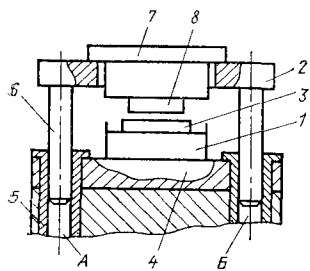


Рис. 68. Принципиальная схема компоновки станка для электроэрозионной обработки крупногабаритных деталей

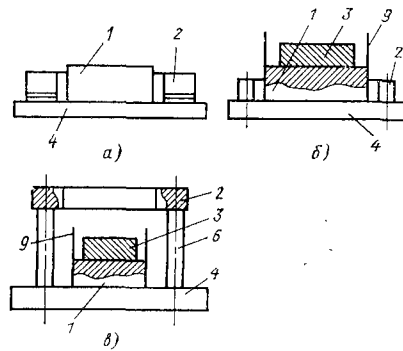


Рис. 69. Последовательность подготовки станка для электроэрозионной обработки крупногабаритных деталей:

а — станок подготовлен для установки заготовки на стол; б — деталь и ванна установлены на столе станка; в — на станке установлен электрододержатель с колоннами

дом через электрогидравлический регулятор подачи с насосной станцией. Станок снабжен устройствами для фильтрации и прокачивания рабочей жидкости через межэлектродный промежуток, источником питания и другим оборудованием, необходимым для его нормальной работы.

Обрабатываемую заготовку 3 устанавливают на стол 1 (рис. 69), расположенный на основании 4 станка. Простота установки и выверки положения заготовки обеспечиваются свободным подходом к ней со всех сторон. Расположенные с боков заготовки направляющие колонны 6 не мешают ее перемещению и при необходимости позволяют установить дополнительные устройства для более точной выверки.

Пространство между основанием 4 и электрододержателем 2 не стесняет процесс установки и выверки положения заготовки, так как в средней части электрододержателя имеется большое окно для размещения электрод-инструмента, который устанавливают позже. Кроме того, в случае необходимости всю верхнюю часть станка (электрододержатель, направляющие колонны) можно опустить до его основания, что освобождает поверхность стола 1 для установки заготовки (рис. 69, а, б).

Перед установкой электрод-инструмента электрододержатель с направляющими колоннами 6 перемещают в верхнее крайнее положение и фиксируют (рис. 69, в). С помощью специальных вспомогательных устройств или вручную электрод-инструмент 8 с корпусом 7 (см. рис. 68) на шариках легко перемещается в горизонтальной плоскости в нужном направлении, что упрощает выверку его положения относительно заго-

товки. После выверки корпус 7 электрод-инструмента закрепляют на электрододержателе 2. Расположение электрод-инструмента сверху электрододержателя непосредственно над обрабатываемой заготовкой 3 в сравнении с креплением его к нижнему торцу шпинделя значительно снижает трудоемкость при наладке станка. После окончания выверки положений электрод-инструмента и заготовки и их закрепления собирают боковые поверхности ванны 9 (рис. 69, в), обеспечивая герметичность стыков.

Остальные операции подготовки станка к работе выполняют так же, как и при использовании известного оборудования. В частности, при работающей насосной станции направляющие колонны 6 с электрододержателем 2 (см. рис. 68) освобождают из верхнего крайнего положения, и электрод-инструмент 8 перемещается к заготовке 3. На некотором расстоянии от поверхности заготовки его фиксируют, а ванну заполняют рабочей жидкостью, которая поступает как непосредственно из магистральной, так и через отверстия в электрод-инструменте. Затем включается источник питания и автоматический регулятор подачи.

2. ОБРАБОТКА ПОЛОСТЕЙ КОВОЧНЫХ ШТАМПОВ

Применение электроэрозионной обработки рабочих полостей ковочных штампов существенно упростило технологию их изготовления, снизило трудоемкость и устранило брак, ранее имевший место при термообработке. Однако до сих пор окончательное формирование поверхности рабочей полости штампа осуществляется, как правило, слесарно-механическим способом.

Создание новых станков (например, в СССР мод. 4Е723М, 4Г724, 4726, в Швейцарии мод. ЕРМ 90, ЕРМ 100, Шармилль — Хаузер, Кастом, в Италии мод. РКФ 6000 и др.) позволило расширить применение электроэрозионной обработки. Стало возможным обрабатывать этим способом полости размером от 0,3 (станок мод. 4726) до 6 м² (станки мод. ЕРМ 100, РКФ 6000). Разработка и внедрение новых источников питания позволили повысить производительность процесса, широко применять многоконтурные схемы обработки. В итоге с каждым годом снижалась трудоемкость изготовления полостей ковочных штампов, однако технологический процесс их обработки остался прежним. Он состоит из следующих основных операций: а) грубое фрезерование полости с целью удаления основного объема металла; б) термическая обработка кубика; в) электроэрозионная обработка полости; г) слесарная полировка поверхности полости штампа до $R_z = 2 \div 10$ мкм в зависимости от его назначения; д) слесарная обработка отдельных участков полости с целью спаривания верхней и нижней полостей штампа.

Несмотря на существенный недостаток этого процесса, связанный с использованием ручного труда для доводки рабочей поверхности, экономическая эффективность от применения электроэрозионной обработки весьма значительна [44]. В табл. 18 приведены данные НИИТАвтопрома об экономии

Таблица 18

Некоторые показатели экономической эффективности слесарно-механической (СМ) и электроэрозионной (ЭЭ) обработки ковочного штампа для штамповки карданного вала

Статьи расхода	Способ обработки	
	СМ	ЭЭ
Обработка ручьев штампа:		
норма времени станочников, ч	12	7,5
разряд работы	5	3
зарплата, руб.	6,6	3,1
норма времени слесарей, ч	6,75	0,75
разряд работы	5	5
зарплата, руб.	3,70	0,41
Другие расходы, руб.:		
на инструмент	2,75	2,83
на электроэнергию	0,14	0,55
на масло	—	0,26
на амортизационный ремонт и обслуживание	1,95	1,8
Остальная обработка штампа:		
норма времени, ч	19,8	20,8
зарплата, руб.	8,97	9,4
Всего на изготовление комплекта штампа:		
норма времени, ч	38,55	29,05
затраты по сопоставляемым элементам, руб.	24,11	11,35

ческой эффективности электроэрозионной обработки ручьев ковочного штампа для штамповки карданного вала автомобиля ЗИЛ-130 в сравнении со слесарно-механической обработкой.

В настоящее время на заводах применяют три варианта технологического процесса обработки полостей ковочных штампов (табл. 19). Первый вариант полностью основывается на слесарно-механической обработке; во втором варианте электроэрозионная обработка применяется для предварительного удаления металла, после чего следует ручная слесарная обработка полости; при третьем варианте полость обрабатывается только электроэрозионным способом, слесарная полировка применяется в исключительном случае, при обработке глубоких полостей ($H \geq 20$ мм), когда угол ϕ наклона боковой поверхности полости к вертикали меньше угла $\alpha_{ср}$ наклона боковой поверхности профиля шероховатости к средней линии.

К слесарной доводке поверхности непосредственно после ее электроэрозионной обработки предъявляются следующие тре-

Таблица 19

Последовательность основных операций при обработке полостей ковочных штампов слесарно-механическим и электроэрозионным способами

Слесарно-механическая обработка	Процессы с применением электроэрозионной обработки (ЭЭО)			
	Глубина полости больше 20 мм		Глубина полости меньше 20 мм	
	Применяемый процесс	Рекомендуемые процессы	Применяемый процесс	Рекомендуемый процесс
1. Фрезерование	1. Фрезерование	1. Фрезерование	1. Термообработка	1. Термообработка
2. Слесарная доводка	2. Термообработка	2. Термообработка	2. ЭЭО	2. ЭЭО ¹
3. Термообработка	3. ЭЭО ¹ до R_z , мкм: а) 80—300; б) 40—160	3. ЭЭО ¹ до R_z , мкм: а) 80—300; б) 40—160	до $R_z=20 \div 40$ мкм	до $R_z=20 \div 40$ мкм
4. Слесарная полировка	4. Слесарная полировка ² до $R_z=0,3 \div 1$ мкм	4. Слесарная полировка ³ до $R_z=3 \div 10$ мкм	4. Слесарная полировка ³ до $R_z=3 \div 10$ мкм	3. Слесарная полировка ³ до $R_z=3 \div 10$ мкм

¹ а — для полости подготовительного ручья, б — для полости окончательного ручья.

² Полируется только поверхности или их участки, которые наклонены к вертикали под углом $\phi > \alpha_{ср}$.

³ Полируются все поверхности полостей подготовительных и окончательных ручьев.

бования. Припуск снимается в пределах высоты неровности поверхности R_{2a} , полученной электроэрозионным способом, и ведется так, чтобы R_{2d} после доводки была во много раз меньше высоты Rz неровностей, образовавшихся в результате электроэрозионной обработки и оставшихся после ручной доводки. В итоге шероховатость поверхности будет определяться высотой R неровностей, оставшихся после электроэрозионной обработки, и своего рода субмикрощероховатостью, образующейся на вершинах выступов после доводки. При постепенном уменьшении R_{2a} средняя линия m_1 смещается в сторону дна впадин неровностей, занимая положение m_2 , что резко изменяет ряд характеристик шероховатости поверхности. Так, в частности, существенно уменьшается угол α , растут ρ_v и $\rho_{вп}$. Изменение таких параметров шероховатости, как R , α , ρ_v и t_p будет аналогичным представленному на рис. 50.

Профилограммы показывают, что независимо от исходного значения высоты выступов R_{max} , образованных в результате электроэрозионной обработки, относительная опорная длина профиля равна 15%, а α уменьшается на 3% при снятии припуска, равного 30% от R_{max} . При снятии припуска, составляющего 50% R_{max} , t_p становится равной 29%, а α уменьшается на 9%, при $z=0,8 R_{max}$ t_p достигает 56%, а α уменьшается на 40% в сравнении с соответствующими показателями при $z=0$.

При слесарно-механической обработке угол α наклона боковой поверхности профиля неровности к средней линии меньше при рассмотрении шероховатости вдоль перемещения инструмента, чем при рассмотрении в поперечном направлении перемещения. Отсюда слесарную доводку ручьев целесообразно выполнять так, чтобы направление шероховатости, образующейся при рассматриваемой операции, совпадало с образующей полости ручья.

Приведенные данные показывают, что при постепенном уменьшении шероховатости, полученной в результате электроэрозионной обработки за счет снятия припуска в пределах исходной шероховатости, α и t_p изменяются в направлении, обеспечивающем повышение износостойкости поверхности. Если при этом сохраняется исходная особенность поверхности — отсутствие направленной шероховатости и наличие замкнутых, не связанных между собой микровпадин, характеризующихся величиной $\rho_{вп}$, то срок службы многих деталей, обработанных рекомендуемым способом, может быть повышен.

Следует отметить, что слесарная полировка при обработке глубоких полостей будет постепенно исключаться из технологического процесса, учитывая выявленные особенности чистовой электроэрозионной обработки полостей со снятием припуска в пределах высоты неровностей поверхности после черновой обработки (см. гл. V).

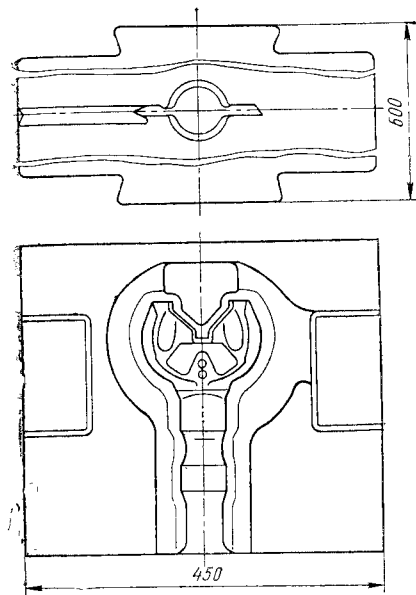


Рис. 70. Ковочный штамп для штамповки полуоси переднего ведущего моста

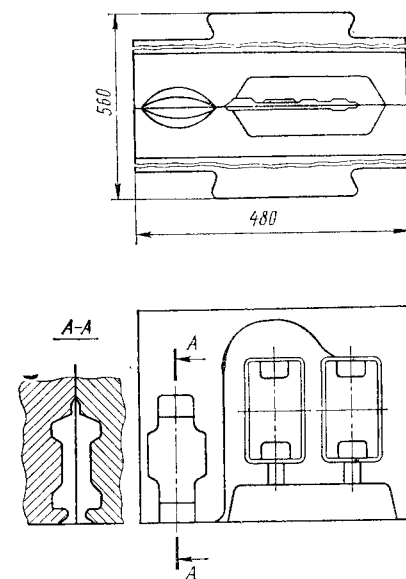


Рис. 71. Ковочный штамп для штамповки подушки задней рессоры

Обработка полостей ковочных штампов для штамповки полуоси переднего ведущего моста (рис. 70) и подушки задней рессоры (рис. 71) велась на станке мод. 4A724 с генератором ШГИ-125-100. При обработке предварительных полостей использовались следующие последовательно изменяющиеся режимы $\frac{f, \text{кГц}}{I_{ср}, \text{А}}$: 1) $\frac{1}{30}$; 2) $\frac{0,4}{70 \div 90}$; 3) $\frac{0,4}{100}$; 4) $\frac{1}{50 \div 70}$; 5) $\frac{1}{30}$.

Обработка окончательных полостей ковочных штампов велась на тех же режимах, что и при обработке предварительных полостей, с окончательной доработкой полости на шестом режиме

$$\frac{8}{7 \div 10}$$

При использовании рекомендуемого процесса трудоемкость только электроэрозионной обработки сокращается на 30—50%. Что касается объема слесарной обработки полости, то необходимо учитывать ее структуру; закругление острых кромок составляет 5—10% всего объема слесарной обработки полости, проверка правильности сопряжения верхней и нижней половины штампа по пластмассовой отливке около 5%, доводка отдельных участков полости по шаблонам с целью обеспечения необходимого сопряжения обеих половин штампа 55—70%, полировка полости 15—20%, окончательная проверка сопряжения и доработки полостей 5—10%. При обработке полости по рекомендо-

ванному процессу облегчается ее доводка по шаблонам при сопряжении обеих половин штампа, что снижает трудоемкость этого перехода до 20—30%, кроме того, устраняется слесарная полировка полости. В итоге время ручных операций при использовании рекомендуемого процесса сокращается на 45—65%.

Стойкость кованых штампов, обработанных по рекомендуемой технологии, повышается.

3. ОБРАБОТКА ВАЛОВ

Рабочие поверхности валов 5 обрабатывались электроэрозионным способом пластинчатыми электрод-инструментами 6 (рис. 72). Обработка тел вращения такими электродами упрощает конструкцию станка в связи с упразднением бабки шлифовального круга, облегчает одновременную обработку ряда поверхностей и существенно повышает производительность процесса. При электроэрозионной обработке заготовок диаметром 55 мм из стали У8, закаленной до твердости HRC 55—60, дисковым электрод-инструментом с поливом зоны обработки трансформаторным маслом при $I_{cp}=20$ А, $t_{и}=1000$ мкс и $f=0,4$ кГц получена производительность $\gamma_3=32$ мм³/мин, а при $I_{cp}=2$ А, $t_{и}=3$ мкс и $f=30$ кГц $\gamma_3=12$ мм³/мин. Применение пластинчатых электрод-инструментов разных конструкций позволило существенно повысить γ_3 при обработке заготовок только с большой $t_{и}$ (рис. 73). В этом случае площадь взаимодействия электрод-инструмента с заготовкой, окружная скорость заготовки (0,7 м/с) и условия удаления продуктов эрозии из зоны обработки более полно соответствовали используемому режиму, чем при обработке заготовок на мягком режиме.

Для определения наиболее подходящих материалов электрод-инструментов были проведены эксперименты по обработке валов на модернизированном универсально-шлифовальном станке на режиме $I_{cp}=100$ А, $f=0,4$ кГц пластинчатыми электрод-инструментами из различных материалов. При использовании электрод-инструмента из меди и углеграфитовой композиции ЭЭГ процесс протекал нестабильно, производительность в первом случае находилась на уровне 280 мм³/мин, во втором — 185 мм³/мин. Применение меднографитовых

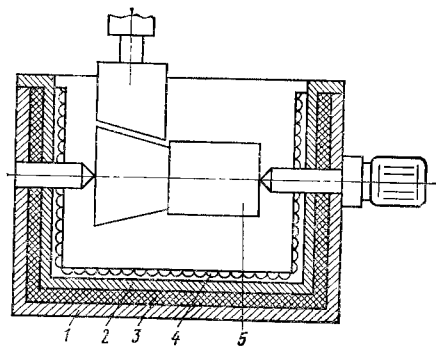
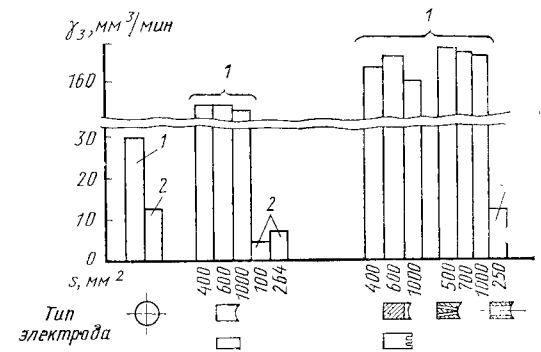


Рис. 72. Обработка раскатного вала пластинчатым электрод-инструментом в приспособлении, позволяющем нагревать рабочую жидкость

Рис. 73. Влияние на производительность обработки геометрии пластинчатого электрод-инструмента, площади его взаимодействия с заготовкой и длительности импульса $t_{и}$:
1 — $t_{и}=1000$ мкс;
2 — $t_{и}=5$ мкс



электрод-инструментов с площадью рабочей поверхности 9 см² повысило производительность до 942 мм³/мин, при площади 18 см² — до 1150 мм³/мин, а при площади 36 см² — до 1350 мм³/мин; процесс обработки протекал стабильно.

На грубых режимах обработки целесообразно применять в качестве рабочей жидкости смесь воды с индустриальным маслом или эмульсии. В частности, при обработке рассматриваемых валов применялась эмульсия Э-2, состоящая из нефтяных смол и масляных щелочных отходов, каустической соды и индустриального масла. Эффективность процесса обработки одного участка заготовки можно повысить, применяя несколько электрод-инструментов, располагаемых с разных сторон обрабатываемой заготовки для увеличения поверхности взаимодействия с ней. Такой прием целесообразно использовать при обработке заготовок сравнительно малого диаметра. Наряду с этим значительный эффект дает применение многоконтурных схем.

При удалении малого припуска с заготовки, когда кривизна рабочей поверхности электрод-инструмента не совпадает точно с кривизной обрабатываемой поверхности, необходимо тщательно выполнять установку электрод-инструмента относительно заготовки. При расположении его под углом к оси заготовки ее поверхность будет обрабатываться в пределах зоны, заштрихованной на рис. 74. При этом более интенсивно съем металла будет проходить на участке 0—0, так как здесь поддерживается межэлектродный зазор в оптимальных пределах. Очевидно, что электрод-инструмент 2 углубится в заготовку 1 на участке 0—0 больше, чем на границах зоны обработки.

Таким образом, поверхность, получаемую в процессе обработки, можно представить в виде однополостного гиперболоида, а профиль его сечения плоскостью $x-O$ — в виде гиперболы $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$, для которой тангенс угла наклона прямой AA равен $\operatorname{tg} \psi = b/a$. Очевидно, что при такой обработке возникает

Рис. 74. Схема для определения погрешности при обработке цилиндра пластинчатым электрод-инструментом

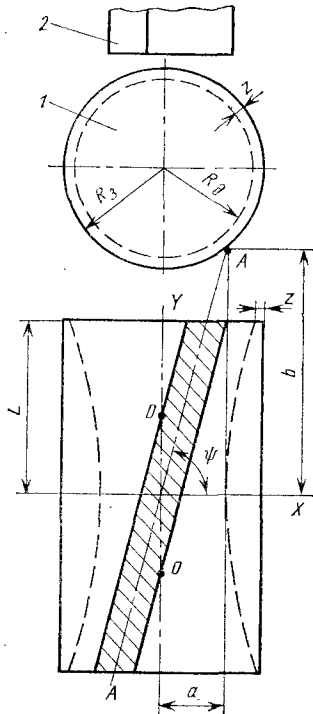
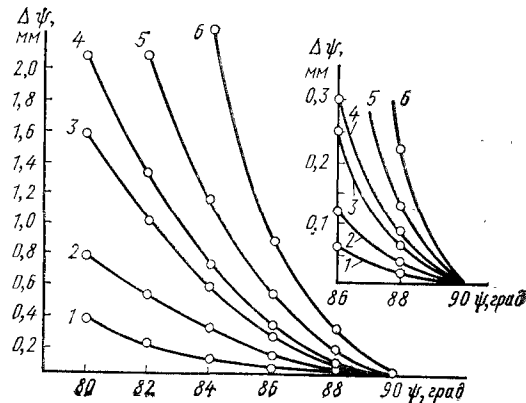


Рис. 75. Изменение погрешности $\Delta\psi$ при обработке цилиндрических деталей пластинчатым электрод-инструментом в зависимости от угла ψ при различных L и R_d :

№ кривой	1	2	3	4	5	6
L , мм	50	50	100	50	100	100
R_d , мм	10	50	100	20	50	20



погрешность $\Delta\psi$, равная $R_3 - a$. При обработке цилиндрической поверхности по всей длине при $y=L$ получим $x=R_3 - z=R_d$, где z — припуск, удаленный с цилиндрической поверхности у торцов цилиндра; R_d — радиус обработанной детали, замеренный у торцов цилиндра.

Исходя из вышеизложенного величину погрешности можно определить по выражению

$$\Delta\psi = R_d - \sqrt{R_d^2 - (L^2/\text{tg}^2\psi)}$$

Расчеты показывают (рис. 75), что с ростом L и уменьшением R_d погрешность Δ при переходе от $\psi=90^\circ$ к $\psi=80^\circ$ существенно увеличивается. Особенно значительно при этом влияет на рост $\Delta\psi$ величина R_d . Так, при обработке вала с $L=50$ мм пластинчатым электрод-инструментом, установленным под углом $\psi=86^\circ$, погрешность $\Delta\psi$ с изменением R_d от 100 до 20 мм соответственно возрастает с 0,0 до 0,33 мм. При весьма грубой установке электрод-инструмента относительно оси обрабатываемой заготовки ($\psi=80 \div 82^\circ$) погрешность больше в 20—30 раз, чем при установке, обеспечивающей $\psi=88^\circ$.

Изложенное следует в первую очередь учитывать при использовании пластинчатых электрод-инструментов небольшой толщины, когда участок $O-O$ меньше длины обрабатываемой поверхности (см. рис. 74).

Раскатные валы для горячей раскатки колец подшипников обрабатывали электроэрозионным способом на станке мод. 4Б722 с генератором ШГИ-125-100 медным пластинчатым электрод-инструментом толщиной 15 мм и длиной 55 мм. Валок устанавливали в приспособлении, позволяющем вращать его в процесс обработки с частотой 5—10 об/мин. Электрод-инструмент, рабочая поверхность которого была предварительно спрофилирована, крепили в шпинделе станка. Валки обрабатывали в масле индустриальном 12 и жидкости ПМС-10 на режимах $I_{ср}=60 \div 80$ А, $t_{и}=2200$ мкс, обеспечивающих глубокую зону термического влияния. В производственных условиях валки имели стойкость до 5000 колец вместо 400 колец у валков, рабочая часть которых обрабатывалась резанием.

Исследования валков, обработанных на указанном режиме, показали, что в их поверхностном слое имеются трещины, которые зачастую зарождаются внутри слоя. В целях уменьшения внутренних напряжений жидкость ПМС-10, в которой обрабатывали валки, предварительно нагревалась до $120-150^\circ\text{C}$. В приспособлении, показанном на рис. 72, 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 при обработке заготовок в нагретой жидкости производительность выше, чем при обработке в жидкости с исходной температурой $20-40^\circ\text{C}$, а трещины в поверхностном слое отсутствуют.

С целью получения наиболее приемлемой величины $\rho_{в}$ окончательную обработку валков целесообразно вести электроконтактным способом на режиме $U_{х.х}=6 \div 8$ В, $I_{к.з}=0,1 \div 0,5$ А. При этом снимаемый припуск не должен превышать половины высоты неровностей профиля, образующихся на предыдущем переходе. Использование указанного мягкого режима не позволяет удалять большую порцию металла за один импульс, но является достаточным для расплавления и удаления микропорции металла с вершин неровностей. В результате последние интенсивно округляются, обуславливая получение большого радиуса $\rho_{в}$.

4. ОБРАБОТКА МАТРИЦ ДЛЯ ПРЕССОВАНИЯ

Особые трудности в изготовлении вызывают матрицы с винтовыми рабочими отверстиями. Для получения последних необходимо соответствующим образом изготовленному электрод-инструменту дать перемещение на один шаг за один оборот. Та-

кое движение осуществляется посредством приспособлений или за счет кинематических звеньев специального оборудования. На практике применяются в основном приспособления, принципиальные схемы которых приведены на рис. 76 и 77. Электрод-инструмент во всех случаях соединяется со шпинделем станка с помощью переходного узла. При обработке винтовых отверстий с малым шагом этот узел обеспечивает принудительное вращение электрод-инструмента, не препятствуя его перемещению вдоль оси (на один шаг за оборот). Величина шага определяется маточной гайкой 2, в которую ввинчивается электрод-инструмент 1 (рис. 76). Такая схема наиболее часто встречается при образовании резьб, в частности, в твердосплавных деталях.

При обработке винтовых отверстий с большим шагом (угол наклона винтовой линии больше угла самоторможения) переходный узел обеспечивает электрод-инструменту, при его принудительном перемещении вдоль оси шпинделя станка, свободное вращение (на один оборот за шаг). Направляющие штифты 1 могут входить в спиральный паз электрод-инструмента 2 (рис. 77, а) или его оправки 3 (рис. 77, б). В первом случае штифты обеспечивают фиксацию положения электрод-инструмента относительно заготовки и его направление при винтовом перемещении (рис. 77, а). Во втором случае направляющая

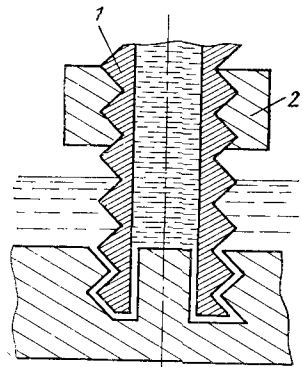


Рис. 76. Образование винтовых отверстий электрод-инструментом, направляемым маточной гайкой

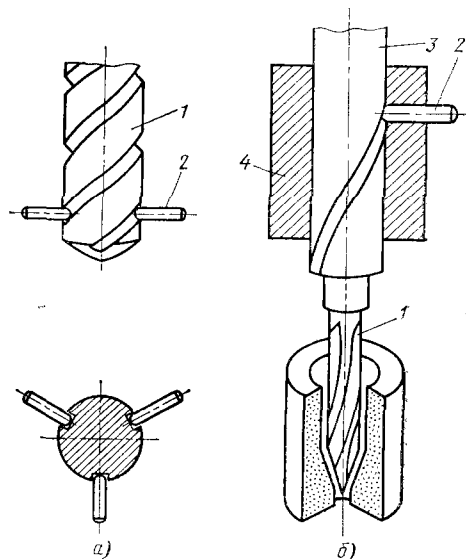


Рис. 77. Образование винтовых отверстий электрод-инструментом, направляемым штифтами

штулка 4 обеспечивает точное расположение электрод-инструмента 2, а штифт 1 — его направление при винтовом перемещении (рис. 77, б).

В рассмотренных схемах обработки используются стержневые электрод-инструменты с рабочими винтовыми поверхностями. Изготовление таких электродов весьма сложно и требует высокой квалификации как при настройке станка, так и при обработке профиля, который получают фрезерованием специальными фрезами.

Для ускорения процесса обработки винтовых отверстий целесообразно вести на нескольких режимах. Для этого электрод-инструмент выполняют ступенчатым, уменьшая диаметр некоторой части рабочего участка электрохимическим травлением. В результате матрицу для прессования сверл диаметром 20 мм обрабатывали за 2,5 ч вначале при $W_{и}=0,1$ Дж, затем при $W_{и}=10^{-2}$ Дж и 10^{-3} Дж.

Волоки, рабочие каналы которых обработаны только электроэрозионным способом, обеспечивают требуемое качество получаемых изделий. Волоки с винтовым рабочим каналом, обработанным на режимах с $R_z=6\div 10$ мкм, для прессования изделий из порошков карбидных материалов показали высокую стойкость и хорошее качество изготавливаемых деталей. После прессования нескольких десятков деталей R_z рабочего канала уменьшилась до 2—3 мкм.

Наибольшие сложности вызывает обработка фасонного торца пуансона пресс-формы для прессования твердосплавных пластин со стружкозавивающими канавками. Эти сложности предопределяются высокой точностью обрабатываемого профиля, имеющего малые размеры, а также значительным износом электрод-инструментов. Последние изготавливались холодным прессованием на гидравлическом прессе усилием 5000 кгс. Для этого был изготовлен массивный чеканочный мастер-штамп, исключаящий деформации в процессе прессования.

Пуансон с припаянной к его торцу твердосплавной пластиной, в которой должен быть получен необходимый профиль, крепится к держателю системы ИМЕА с наружными базовыми поверхностями, являющимися постоянными базами в течение всего процесса обработки пуансона, как механическим, так и электроэрозионным способом.

Для обеспечения точного положения пуансона относительно электрод-инструментов, которые меняют в процессе обработки в связи со значительным износом, в шпинделе станка закрепляется деталь системы ИМЕА с внутренними базовыми поверхностями, а на столе — деталь с наружными базовыми поверхностями.

Окончательное их закрепление осуществляется при совместном сопряжении. Электрод-инструмент устанавливается в специальное приспособление, имеющее базовую систему ИМЕА с

внутренними базовыми поверхностями, где его установка может быть с помощью индикаторов выверена в горизонтальной плоскости путем поворота столика приспособления вокруг двух взаимно перпендикулярных осей, находящихся в горизонтальной плоскости. Кроме того, вращением и соответствующим перемещением электрод-инструмента обеспечивается точное совпадение его оси с осью базовой системы. После выверки электрод-инструмент фиксируется в окончательном положении.

Все операции по установке последующего электрода осуществляют во время обработки пуансона предыдущим электродом. Таким образом, смена электрода непосредственно на станке сводится к замене одного приспособления с зафиксированным в нем электродом другим.

Описанное техническое решение, принятое на Московском комбинате твердых сплавов им. В. П. Соловьева, позволило обеспечить высокую точность базирования электрод-инструментов и существенно повысить коэффициент использования оборудования за счет резкого (в десятки раз) сокращения времени выполнения вспомогательных операций, к которым относится и замена электрод-инструмента.

Для получения точного профиля на торце твердосплавного пуансона используют, как правило, четыре электрод-инструмента, каждым из которых ведут обработку на определенном режиме.

Номер режима	1	2	3	4
$U_{\text{ж.х.}}$, В	100	100	270	270
$U_{\text{р.}}$, В	35	35	30	50
$I_{\text{ср.}}$, А	8	5—6	0,5	0,1
f , кГц	60	105	142	330
$t_{\text{и}}$, мкс	5	2	2	2
Время обработки, мин	20	40	90	120

После обработки пуансона на 1-м режиме образуется шероховатость поверхности с $R_z = 15 \div 20$ мкм, после 2-го режима $R_a = 0,8 \div 1,2$ мкм, после 3-го $R_a = 0,4 \div 0,6$ мкм и после 4-го $R_a = 0,2 \div 0,3$ мкм. Заключительной операцией обработки фасонного торца пуансона является ручная полировка. Необходимость такой тщательной доводки пуансона вызывается тем, что в процессе прессования твердосплавных пластин прессуемая смесь прилипает к шероховатой поверхности торца пуансона, искажая его профиль, и последующие пластины могут иметь отклонения от технических требований.

5. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПРИПУСКА

В общем виде минимальный припуск [34]

$$z_{\min i} = R_{z i-1} + T_{i-1} + (\rho_{i-1} + \varepsilon_i), \quad (11)$$

где T_{i-1} — глубина дефектного поверхностного слоя; $R_{z i-1}$ — высота неровностей профиля по 10 точкам; ρ_{i-1} — векторная

сумма пространственных отклонений для элементарной поверхности обрабатываемой заготовки; ε_i — векторная погрешность базирования заготовки.

Максимальный припуск

$$z_{\max} = z_{\min i} + (\delta_{i-1} - \delta_i),$$

где δ_{i-1} , δ_i — допуски на размер.

В приведенных выражениях индексы $i-1$ и i определяют предшествующую и данную операции, значения ρ и ε для ряда случаев можно взять из справочников [34]. При определении величины T имеются некоторые особенности, связанные с образованием поверхностного слоя, структура, химический состав и микротвердость которого из-за термического воздействия при электроэрозионной обработке существенно отличаются от исходных. Кроме того, на поверхности заготовки появляется белый слой, а при обработке на определенных режимах возникает сетка микротрещин глубиной $h_{\text{тр}}$, которая в ряде случаев может быть больше толщины $H_{\text{т}}$ поверхностного слоя (см. гл. III). Отмеченные особенности определяют глубину дефектного слоя T , которая при $H_{\text{т}} > h_{\text{тр}}$ равна $T = H_{\text{т}}$, а при $H_{\text{т}} < h_{\text{тр}}$ будет $T = h_{\text{тр}}$.

Рассмотрим общий случай определения припусков. Допустим, что припуск с поверхности заготовки, обрабатываемой электроэрозионным способом, будет снят за несколько проходов. При этом обработка будет вестись методом прямого копирования одним электрод-инструментом с последовательным изменением режимов. Окончательно обработанная поверхность должна иметь такую величину $R_{z\text{д}}$, которую можно обеспечить только другим способом обработки, например слесарной доводкой. Отсюда погрешности ε и ρ с переходом на другой режим обработки не устраняются и на каждом последующем режиме не увеличиваются. Поэтому при расчете припусков, снимаемых на каждом переходе электроэрозионной обработки, ρ и ε принимаются равными нулю. Они должны быть учтены при расчете припуска, удаляемого на окончательной операции.

Расчет припусков, удаляемых на каждом переходе, ведут начиная от окончательно обработанной поверхности. На последнем, например третьем, переходе электроэрозионной обработки величина T_3 должна быть минимальна, а $R_{z3} = m_{\text{д}} R_{z\text{д}}$. Коэффициент $m_{\text{д}}$ зависит от $R_{z\text{д}}$, сложности обрабатываемой поверхности и ориентировочно находится в пределах от 2 до 4. Отсюда по величине R_{z3} [15] из $W_{\text{и}} = (R_z/A_R)^2$ можно определить $W_{\text{и3}}$, а потом по $W_{\text{и3}}$ из паспорта генератора импульсов — остальные параметры режима обработки. В итоге для определенного режима по табличным данным можно определить T_3 , а затем и припуск $z_{\text{д}}$, снимаемый слесарной доводкой (рис. 78).

В целях сокращения времени обработки каждый предыдущий режим должен быть грубее последующего. Значение z_3

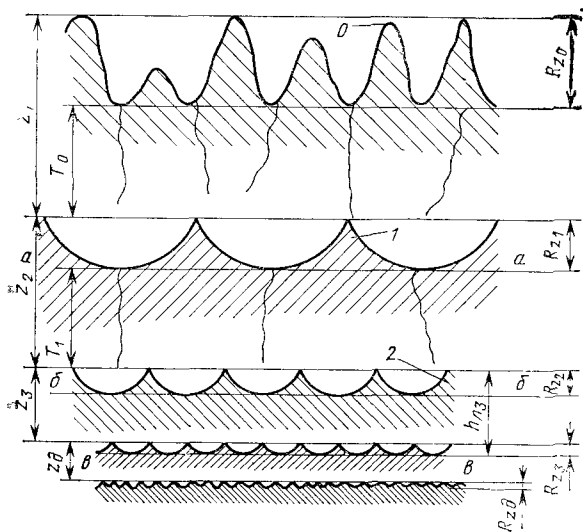


Рис. 78. Расположение припусков, подлежащих удалению на различных режимах обработки

можно определить через R_{z3} , учитывая взаимосвязь между R_z и $h_{л}$:

$$h_{л} = k_h R_z, \quad (11')$$

где k_h — коэффициент пропорциональности.

Поскольку R_{z3} формируется путем наложения лунок глубиной $h_{л3}$, в итоге припуск z_3 может быть (см. рис. 78)

$$z_3 = h_{л3} - R_{z3} = R_{z3}(k_h - 1).$$

Вполне очевидно, что в этом случае припуск будет удален наиболее быстро, так как он равен толщине одного слоя металла, снимаемого на рассматриваемом режиме. Вместе с тем припуск z_3 можно определить из приведенного выражения только тогда, когда $T_2 \leq h_{л3} - R_{z3} - R_{z2}$. Отсюда, анализируя режимы обработки, можно, взяв для каждого режима T_2 и R_{z2} , удовлетворить равенство $T_2 + R_{z2} = h_{л3} - R_{z3}$. Если этого сделать нельзя, то z_3 определяется из выражения (11) при ϵ и ρ равных нулю.

На основе изложенного можно определить припуски z_2 , z_1 . По R_z и T для каждого перехода из паспорта генератора импульсов устанавливается режим обработки.

Определенные таким образом режимы должны быть сопоставлены с режимами, которые возможно использовать при обработке заданного материала (см. гл. III). Режим, рассчитанный для данного перехода, не должен быть грубее режима, приведенного на рис. 23, в противном случае он должен быть изменен, для чего необходимо провести перерасчет величины припуска.

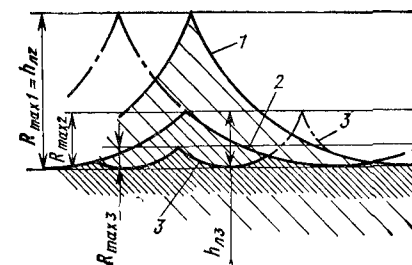


Рис. 79. Схема удаления металла на нескольких режимах обработки при $z_{min} = R_{z\ i-1}$

В процессе электроэрозионной обработки могут быть случаи, существенно влияющие на расчет припусков и определение режимов обработки. Рассмотрим особенности расчета z_{min} для случая, когда на самом грубом из применяемых режимов сетка микротрещин в поверхностном слое отсутствует, а белый слой и зона термического влияния должны быть сохранены, т. е. $T=0$. Кроме того, допустим, что электроэрозионная обработка детали осуществляется методом прямого копирования одним электрод-инструментом на ряде последовательно изменяющихся режимов. При такой схеме обработки и при тщательной установке и базировании заготовки величинами ρ и ϵ во многих случаях можно пренебречь. Отсюда следует, что припуск, снимаемый на каждом переходе, равен соответствующему значению R_z , т. е. $z_{min\ i} = R_{z\ i-1}$.

Учитывая, что при электроэрозионной обработке существует

специфическая связь между R_{max} и $W_{и}$: $R_{max} = A_w \sqrt[3]{W_{и}}$, в рассматриваемом случае расчета z_{min} заменим R_z на R_{max} . Для обеспечения максимальной производительности электроэрозионной обработки необходимо вести процесс на таком режиме, при котором глубина $h_{лi}$ единичной лунки при обработке на данном переходе будет равна наибольшей высоте неровности профиля на предшествующем переходе $R_{max\ i-1}$.

На рис. 79 показана последовательность удаления припуска с заготовки, обрабатываемой по рассматриваемой схеме. После обработки заготовки на предварительном, первом, режиме образуется шероховатость поверхности, высота профиля 1 которой $R = z_{min}$. При обработке на втором режиме удаляется часть металла заготовки в пределах припуска z_{min} . В результате пересечения единичных лунок глубиной $h_{л2} = R_{max1}$ образуется новая поверхность, высота профиля 2 шероховатости которой R_{max2} . Режим третьего перехода выбирают таким, чтобы глубина $h_{л3}$ единичной лунки, образующейся под воздействием электрического разряда, была $h_{л3} = R_{max2}$. После обработки на третьем режиме образуется шероховатость поверхности с высотой профиля 3 R_{max3} . Режимы для последующих переходов подбирают таким же образом, и обработку ведут до тех пор, пока R_{max} не достигнет заданной величины.

Если принять k_h [см. выражение (11')] постоянным для всех режимов, используемых в данном случае для удаления общего припуска z_{min} , то можно записать

$$z_{\min} = R_{\max 1} = h_{л2} = k_h R_{\max 2} = k_h h_{л3} = k_h^2 R_{\max 3} = \dots = k_h^{n-1} R_{\max n}. \quad (12)$$

Отсюда высота неровности на последнем переходе

$$R_{\max n} = z_{\min} / k_h^{n-1}.$$

Зная z_{\min} и $R_{\max n}$, можно определить число переходов n , обеспечивающих съём припуска z_{\min} :

$$n = \frac{\lg z_{\min} - \lg R_{\max n} + \lg k_h}{\lg k_h}.$$

При рассматриваемой схеме обработки энергия импульса на каждом предыдущем переходе будет больше энергии на последующем переходе. Учитывая, что максимальное значение энергии импульса не может выбираться произвольно и зависит от типа обрабатываемого материала, с учетом выражения (12) можно записать

$$z_{\min} = R_{\max 1} = A_w \sqrt[3]{W_{ил}} = k_h^{n-1} A_w \sqrt[3]{W_{ин}}$$

или

$$W_{ил} = k_h^{3(n-1)} W_{ин} \leq W_{и \max}.$$

Эти выражения по $R_{\max n}$ позволяют определить $W_{ин}$ и $W_{ил}$. Отсюда для любого перехода при $W_{ил} < W_{и \max}$

$$W_{ин} = W_{ил} / k_h^{3(n-1)},$$

а при $W_{ил} > W_{и \max}$

$$W_{ин} = W_{и \max} / k_h^{3(n-1)},$$

где $W_{и \max}$ — максимально допустимая энергия импульса при обработке данного материала; n — номер перехода.

Время обработки поверхности полости площадью s_0 на каждом переходе можно определить из следующих соображений. Удаляемый слой (см. рис. 78) состоит из трех характерных участков, на которых на данном режиме обработки удаляется различный объем металла. С участка, расположенного между исходным профилем неровностей O и плоскостью $a-a$, удаляется объем металла

$$\begin{aligned} V_I &= k_{м0} R_{\max 0} s_0 + (z_1 - R_{\max 0}) s_0 + k_{п} R_{\max 1} s_0 = \\ &= s_0 [z_1 - k_{п0} R_{\max 0} + k_{п} R_{\max 1}]. \end{aligned}$$

С участка, находящегося между профилем неровностей 1 и сечением $b-b$, удаляется объем металла

$$V_{II} = s_0 [z_2 - k_{п} (R_{\max 1} - R_{\max 2})].$$

При обработке детали на третьем режиме удаляется слой, расположенный между профилем неровности 2 и сечением $в-в$, объемом

$$V_{III} = s_0 [z_3 - k_{п} (R_{\max 2} - R_{\max 3})].$$

Поскольку время, необходимое для снятия припуска на каждом переходе, $t_i = v_i / \gamma_i$, время удаления общего припуска на последовательно изменяющихся режимах можно найти из выражения

$$t = s_0 \left\{ \frac{z_1 - k_{п0} R_{\max 0} + k_{п} R_{\max 1}}{\gamma_1} + \sum_{i=2}^n \frac{[z_i - k_{п} (R_{\max i-1} - R_{\max i})]}{\gamma_i} \right\}$$

где γ_i — производительность обработки на данном переходе; $R_{\max i-1}$, $R_{\max i}$ — максимальная высота неровностей профиля для переходов $i-1$ и i ; $k_{м0}$, $k_{п0}$ — коэффициенты заполнения профиля соответственно металлом и пустотами при обработке поверхности резанием; $k_{п}$ — коэффициент заполнения профиля пустотами при обработке поверхности электроэрозионным способом.

ОБРАБОТКА СОПРЯГАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Многие типы штампов холодной и горячей штамповки, прессформ, валков, рабочие поверхности которых обработаны электроэрозионным способом без последующей доводки, успешно эксплуатируются, обеспечивая высокое качество изготавливаемых деталей. Расширяется использование электроэрозионной обработки на операциях, окончательно формирующих сопрягаемые поверхности. Раздельная обработка сопрягаемых деталей вызывает появление значительных погрешностей, требующих для своего устранения слесарной доводки рабочих поверхностей. В связи с этим представляют интерес технологические процессы, которые обеспечивают как одновременную обработку сопрягаемых деталей одним электрод-инструментом, так и последовательную их обработку с использованием одного исходного инструмента-копира. Ряд таких процессов разработан и используется на многих машино- и приборостроительных заводах.

1. ОБРАБОТКА ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ВАЛАХ

Сопряжение фасонных ручьев на вальцах, например острильных, используемых для острения концов фасонных прутков перед их протягиванием через волоку, осуществляется по устаревшей технологии. Острильные вальцы 1 и 2 (рис. 80) работают в комплекте. Ручей вальца представляет собой фасонную канавку, соответствующую профилю прутка, но при этом глубина и ширина канавки непостоянны. Пруток 3, предназначенный для волочения, пропускается через большое сечение ручья между валками и продвигается до упора 4 (рис. 80, а). После этого валкам придается вращение, сечение ручья между ними уменьшается, пруток 3 при перемещении в валках деформируется (рис. 80, б), приобретая форму профиля ручья.

Обработка ручьев проводится по одному вальцу на токарных станках в смещенных центрах фасонными резцами с ручной по-

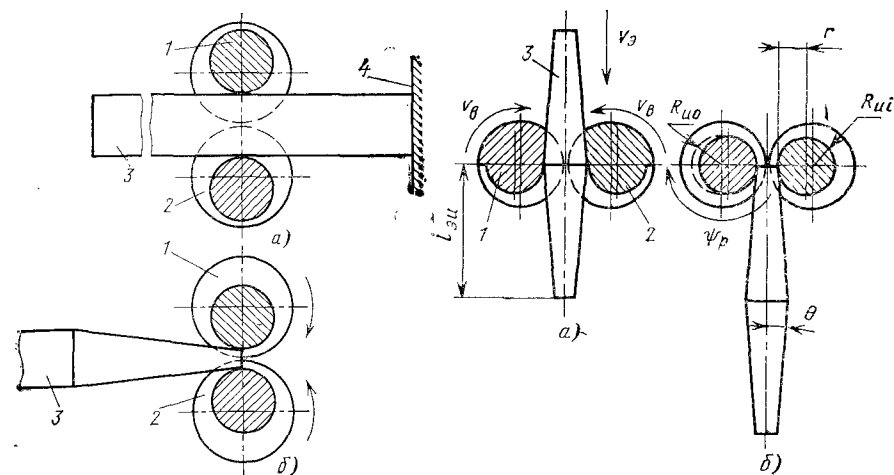


Рис. 80. Положение острильных валцов перед (а) и в конце (б) процесса острения прутка

Рис. 81. Схема одновременной электроэрозионной обработки ручьев острильных валцов фасонным электрод-инструментом

дачей. Такой процесс малопроизводителен и не обеспечивает качественного сопряжения валцов.

На рис. 81 представлена принципиальная схема одновременной электроэрозионной обработки ручьев двух сопрягаемых острильных валцов 1 и 2 (рис. 81, а) фасонным электрод-инструментом 3. Последний имеет симметричную форму относительно плоскости, проходящей через его ось параллельно осям валцов, и располагается между валцами. В процессе обработки валцы вращаются навстречу друг другу с одинаковой окружной скоростью $v_в$, которая может быть равной или большей скорости $v_э$ углубления электрод-инструмента. Для образования ручья вальца электрод имеет коническую часть, высота которой

$$l_{эи} = k_v R_{ис} \psi_p,$$

где $k_v = v_э/v_в$ — коэффициент, определяющий соотношение скорости перемещения электрод-инструмента и окружной скорости валцов; $R_{ис}$ — радиус исходной окружности (соответствующей минимальному размеру заостренного профиля); ψ_p — угол обрабатываемого участка валка (рис. 81, б).

Электрод-инструмент для обработки валцов диаметром 300—400 мм при $k_v=1$ имеет длину свыше 1 м, что усложняет его изготовление и ведение процесса. В связи с этим целесообразно вести обработку валцов при $k_v < 1$, подбирая значение этого коэффициента в зависимости от возможностей электроэрозионного оборудования. Угол наклона боковой поверхности

конуса электрод-инструмента к направлению его перемещения определяется из соотношения $\operatorname{tg} \theta = (R_{\text{ис}} - r) / l_{\text{эл}}$.

Радиус в любой точке обработанной поверхности вальца определяется из выражения $R_{\text{и}} = R_{\text{ис}} (1 - \psi_{\text{р}} \operatorname{tg} \theta)$. Обработка другой половины вальца электрод-инструментом с обратным конусом будет осуществляться по симметричной кривой. Таким образом, обработанная часть вальца в поперечном сечении будет представлять собой фигуру, описанную двумя сопряженными спиралями Архимеда. Обработку валцов целесообразно вести на грубом и мягком режимах. Поскольку межэлектродный зазор на грубых режимах значительно больше, чем на мягких, перед обработкой валцов на мягких режимах электрод-инструмент должен быть смещен в направлении подачи вдоль своей оси относительно рейки на 1—2 мм, что обуславливает образование припуска, равного 0,1—0,2 мм. Описанный процесс можно также использовать и при электроэрозионной обработке ручьев валов для получения периодического проката.

Наряду с описанным, разработан новый процесс обработки фасонного профиля. Обрабатываемые валцы 1 и 2 (рис. 82) устанавливают в приспособление так же, как и при их эксплуатации. В качестве электрод-инструмента 3 применяют пластину, высота профиля которой равна максимальной высоте B обоих профилей валцов, а B_m — ширине профиля в самом малом

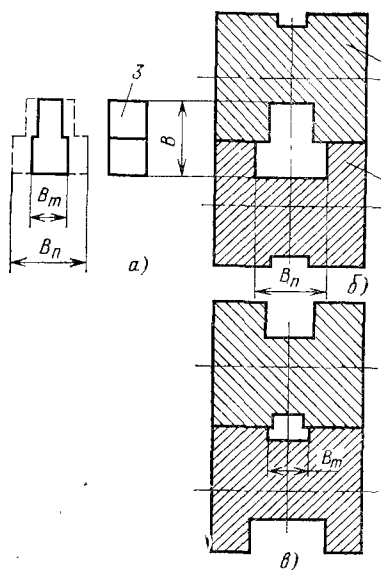


Рис. 82. Соотношение размеров пластинчатого электрод-инструмента и рабочего ручья острильных валцов

сечении (рис. 82, б, в). В начале процесса электрод-инструмент 3 (рис. 83), закрепленный в электрододержателе 4, перемещают в сторону валцов 1 и 2 до тех пор, пока не будет обработан профиль с требуемыми минимальными размерами (рис. 83, а, б). Затем валцы начинают вращать навстречу друг другу с одинаковой скоростью, соответствующей скорости перемещения электрод-инструмента. С этого момента одну часть профиля обрабатывают при перемещении пластинчатого электрод-инструмента из положения $H-H$ в положение $O-O$ (рис. 83, б) и его вибрации в направлении, параллельном оси валцов. Электрод-инструмент проходит путь h_3 , за это время валцы, имеющие равные окружные скорости $v_{\text{в}}$, должны вернуться на угол, при котором дуга по их наружной поверх-

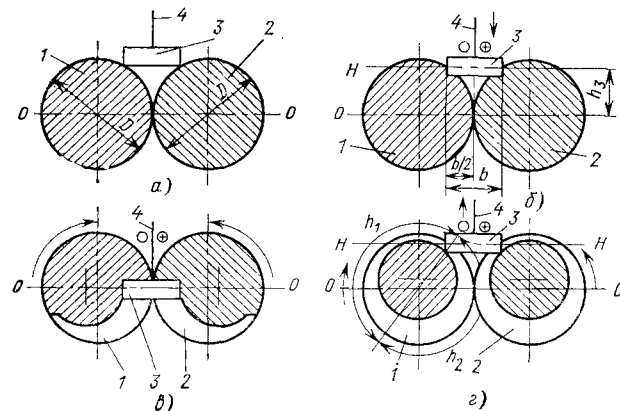


Рис. 83. Схема одновременной электроэрозионной обработки ручьев острильных валцов пластинчатым электрод-инструментом

ности будет соответствовать длине участка профиля h_1 . Отсюда скорость перемещения электрод-инструмента в направлении к оси валка

$$v_{\text{э}} = v_{\text{в}} \frac{h_3}{h_1} = v_{\text{в}} \frac{n_y \sqrt{b(2D - b)}}{2\pi D},$$

где n_y — число повторяющихся участков профиля на валке (в данном случае два).

В то же время амплитуда колебания электрод-инструмента возрастает от нуля пропорционально пройденному пути и достигает в положении $O-O$ максимума, равного 0,5 ($B_n - B_m$) (см. рис. 82, а и 83, б, в). Затем электрод-инструмент 3 из положения $O-O$ (рис. 83, г) со скоростью, связанной с окружной скоростью валцов соотношением $v_{\text{в}} = v_{\text{э}} (h_1/h_3)$, перемещается в положение $H-H$, обрабатывая другую часть профиля валцов. При этом валцы продолжают вращаться в прежнем направлении, а амплитуда колебания инструмента уменьшается от 0,5 ($B_n - B_m$) до нуля в положении $H-H$ пропорционально пройденному пути.

Таким образом, рассмотренный технологический процесс позволяет, используя простой по форме электрод-инструмент, получать на цилиндрической поверхности многие типы фасонных профилей.

2. ОБРАБОТКА СОПРЯГАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ ВЫРУБНЫХ ШТАМПОВ

Одним из важнейших вопросов в технологии изготовления рабочих деталей вырубных штампов является обеспечение сопряжения режущих элементов. Помимо большой трудоемкости

этой операции, она определяет стойкость штампов. Так, при одностороннем зазоре 0,04 мм смещение пуансона относительно матрицы на 0,02 мм снижает стойкость твердосплавного штампа на 80%, а смещение на 0,03 мм — на 92%. При этом, чем сложнее рабочий контур, тем меньше вероятность получения равномерного зазора между матрицей и пуансоном, несмотря на большой объем слесарных работ при подгонке рабочих элементов штампа.

Возможность обработки рабочих элементов вырубных штампов только электроэрозионным способом, без последующей слесарной доводки, позволяет по-иному построить технологический процесс изготовления пуансонов и матриц. Разработанные процессы сопряжения деталей можно разделить на две группы. К первой из них можно отнести процессы, обеспечивающие получение деталей с требуемой геометрией и точностью. При сборке штампа здесь необходимо выполнение высокоточных работ по обеспечению равномерного зазора между пуансоном и матрицей. Такого рода процессы могут обеспечивать либо последовательную обработку сопрягаемых деталей, либо их одновременную обработку.

Ко второй группе можно отнести процессы, обеспечивающие требуемую геометрию и точность сопрягаемых деталей, а также необходимый по величине и равномерно распределенный между сопрягаемыми поверхностями зазор. При сборке штампа не требуется выполнение сложных слесарно-инструментальных работ по обеспечению равномерного зазора между матрицей и пуансоном.

В основе описываемых ниже технологических процессов лежат методы электроэрозионной обработки прямым и обратным копированием геометрических форм электрод-инструмента в заготовках, вырезание деталей непрерывно движущейся электрод-проволокой и шлифование.

ПРОЦЕССЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ЗАДАННУЮ ГЕОМЕТРИЮ И ТОЧНОСТЬ СОПРЯГАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

Последовательная обработка пуансонов и матриц. На рис. 84 представлена схема электроэрозионной обработки сопрягаемых деталей, разработанная Н. Н. Лабузовым. Матрица 1 после обработки методом прямого копирования фасонным электрод-инструментом 2 заливается стирокрилом. В результате зазор l_1 не оказывает влияния на величину зазора между сопрягаемыми деталями. По полученному таким образом кондуктору 3 с зазором l_3 направляется электрод-инструмент 4 при обработке пуансона 5. Для размеров типа M_1 процесс обеспечивает получение зазора между сопрягаемыми деталями $z_{\text{п}} = l_2 - l_3$, а для размеров типа M_2 — зазора $z_{\text{п}} = l_3 - l_2$.

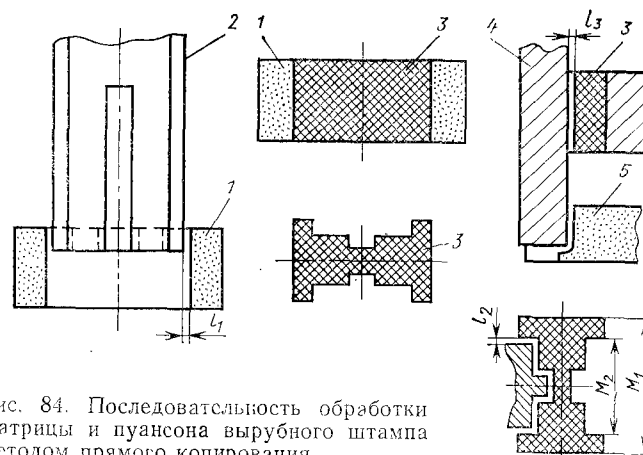


Рис. 84. Последовательность обработки матрицы и пуансона вырубного штампа методом прямого копирования

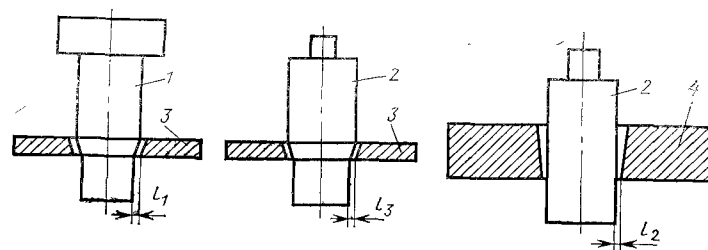


Рис. 85. Схема обработки пуансона и матрицы соответственно методами обратного и прямого копирования

Е. В. Холоднов разработал процесс, в котором пуансон 1 (рис. 85) и промежуточный электрод-инструмент 2 обрабатываются методом обратного копирования с использованием одного блока первичных пластинчатых электродов 3. Затем промежуточным электрод-инструментом 2 методом прямого копирования обрабатывается матрица 4. В итоге между матрицей и пуансоном образуется зазор $z_{\text{п}} = l_2 - l_3 - l_1$.

Несколько измененный процесс по сравнению с предыдущим разработан Ю. В. Комиссаровым. Матрицу 2 (рис. 86) и пластинчатые электрод-инструменты 3 изготавливают методом прямого копирования электрод-инструментом 1. Пластинчатыми электродами 3 обрабатывается пуансон 4 методом обратного копирования. Зазор, получаемый между сопрягаемыми деталями, $z_{\text{п}} = l_1 + l_3 - l_2$.

Разработан процесс, в котором электрод-инструментом 1 (рис. 87), обработанным совместно с пуансоном 2, методом прямого копирования обрабатывается матрица 3. В процессе обработки электрод-инструмент перемещается снизу вверх, начиная

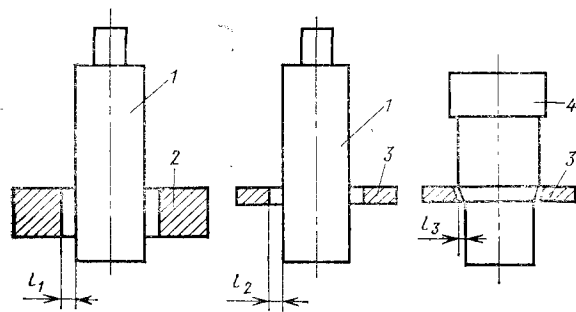


Рис. 86. Схема обработки матрицы и промежуточного электрод-инструмента методом прямого копирования, а пуансона — методом обратного копирования

обработку матрицы с ее опорной поверхностью. Получаемый зазор z_n равен l_1 (по данным А. Е. Папкина).

Ряд технологических процессов объединяет в себе два различных метода электроэрозионной обработки. Так, при обработке сопрягаемых деталей широко используется электроэрозионное вырезание непрерывно движущейся электрод-проволокой. Этот метод применяется в качестве основного при изготовлении пуансонов и матриц вырубных штампов.

Дисковым электрод-инструментом 1 (рис. 88), профиль которого заправляется мастер-резцом 2, путем шлифования обрабатывают матрицу 3 и промежуточный электрод-инструмент 4. Пуансон 5 обрабатывается методом прямого копирования электрод-инструментом 4. Процесс позволяет получить зазор между матрицей и пуансоном $z_n = l_1 + l_3 - l_2$.

В другом случае дисковым электрод-инструментом 1 (рис. 89), профиль которого заправляется мастер-резцом 2, путем шлифования обрабатывают матрицу 3 и копир 4. Пуансон 5 вырезают по копиру 4 непрерывно движущейся электрод-проволокой диаметром d . В итоге зазор между сопрягаемыми поверхностями $z_n = d + l_1 + l_3 - l_2$.

В ряде случаев, предварительно врезав в дисковый электрод-инструмент 1 копир 3 (рис. 90), мастер-резцом 2 заправляют их профили; затем электрод-инструментом обрабатывают матрицу 4. По копиру 3 непрерывно движущейся электрод-проволокой вырезается пуансон 5. Получаемый зазор между пуансоном и матрицей равен $l_1 + l_2$.

В отдельных случаях с использованием окончательно обработанного пуансона 1 (рис. 91) вырубляют заготовку 2, рабочий профиль которой благодаря подчеканке плотно охватывает поверхность пуансона. По полученному таким образом копиру непрерывно движущейся электрод-проволокой вырезают матрицу 3, зазор между которой и пуансоном $z_n = l_2 \pm l_1$. Величина l_1 может быть больше, меньше или равна нулю.

Зачастую для контроля рабочего отверстия матрицы применяют шаблон, изготовляемый с контршаблоном. При обра-

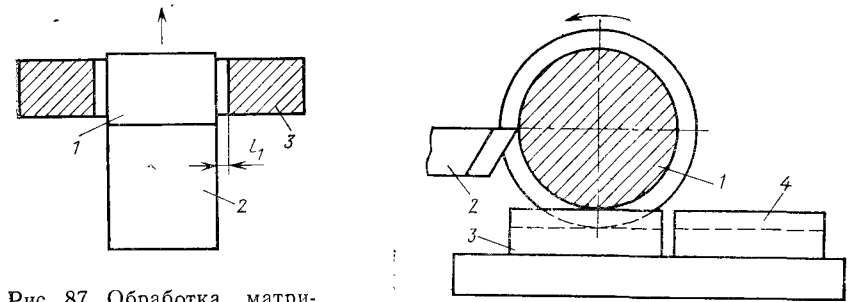


Рис. 87. Обработка матрицы электрод-инструментом, закрепленным на торце пуансона

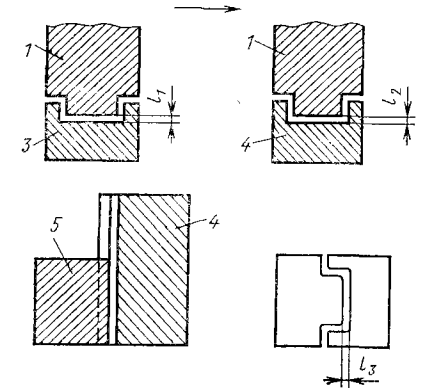


Рис. 88. Схема обработки матрицы и пуансона соответственно шлифованием и методом прямого копирования

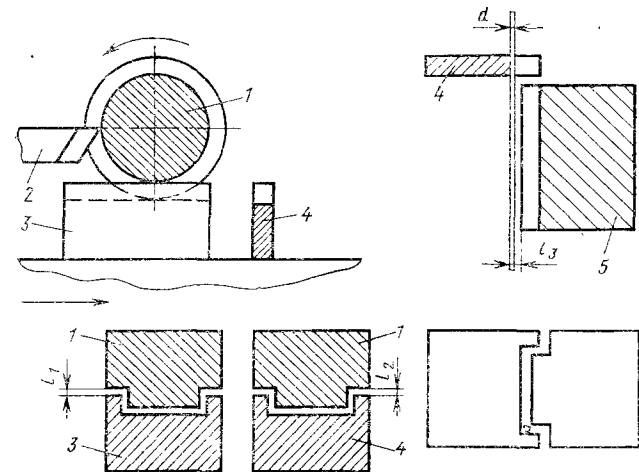


Рис. 89. Последовательность обработки матрицы и пуансона с применением методов шлифования и вырезания непрерывно движущейся электрод-проволокой

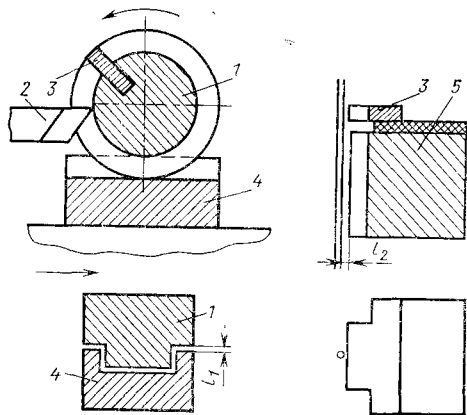


Рис. 90. Схема обработки матрицы шлифованием, а пуансона вырезанием непрерывно движущейся электрод-проволокой

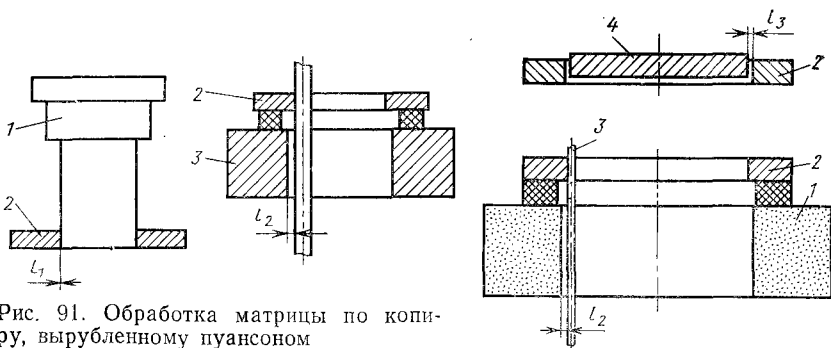


Рис. 91. Обработка матрицы по копиру, вырубленному пуансоном

Рис. 92. Схема обработки матрицы и пуансона по шаблону и контршаблону

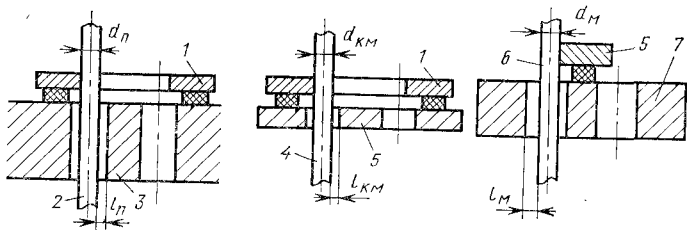


Рис. 93. Последовательность обработки матрицы и пуансона электрод-проволокой разного диаметра

ботке сопрягаемых деталей по контршаблону 2 (рис. 92) непрерывно движущейся электрод-проволокой 3 вырезается матрица 1, а по шаблону 4 — пуансон 5. Зазор между сопрягаемыми деталями — будет $z_n = l_1 + l_2 + l_3$.

Во многих процессах в качестве исходной детали, по которой вырезают пуансон и матрицу, используется копир. Ниже приведены краткие описания таких процессов.

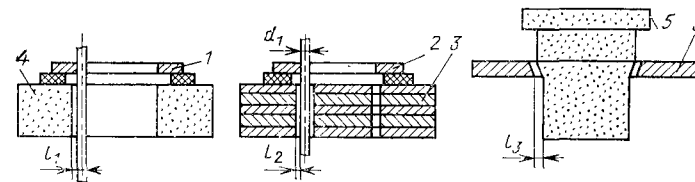


Рис. 94. Последовательность вырезания непрерывно движущейся электрод-проволокой матрицы и электрод-инструментов для обработки пуансона

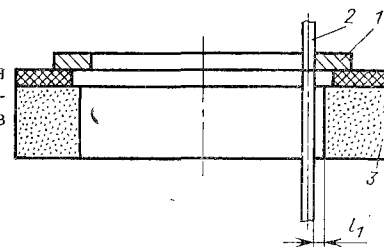


Рис. 95. Последовательность обработки матрицы и пуансона по копиру, вырубленному по матрице

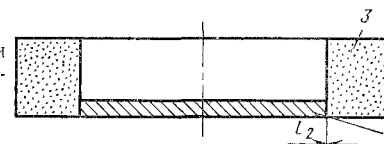
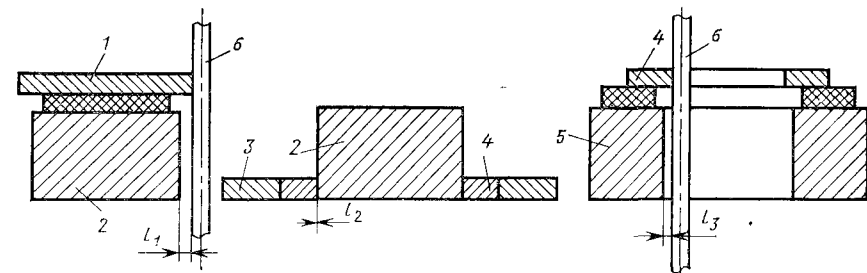
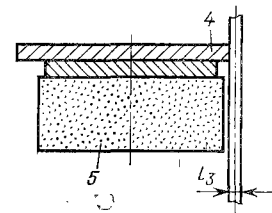


Рис. 96. Последовательность обработки пуансона и матрицы по копиру из легкоплавкого сплава



Пуансон 3 (рис. 93) вырезают по исходному копиру 1 электрод-проволокой 2 диаметром $d_{\text{п}}$. С использованием электрод-проволоки 4 диаметром $d_{\text{км}}$ вырезают вторичный копиер 5, по которому в свою очередь, вырезают матрицу 7 электрод-проволокой 6 диаметром $d_{\text{м}}$. Отсюда зазор $z_{\text{п}}$ между матрицей и пуансоном будет $z_{\text{п}} = d_{\text{м}} + d_{\text{п}} + l_{\text{м}} + l_{\text{п}} - d_{\text{км}} - l_{\text{км}}$.

В другом случае по исходному копиру 1 (рис. 94) непрерывно движущейся электрод-проволокой вырезают матрицу 4 и промежуточный копиер 2, по которому, в свою очередь, вырезают пластинчатые электрод-инструменты 3 для обработки пуансона 5 методом обратного копирования. В итоге можно получить зазор между сопрягаемыми деталями $z_{\text{п}} = l_1 + l_3 - l_2$.

По исходному копиру 1 (рис. 95) непрерывно движущейся электрод-проволокой 2 вырезают матрицу 3, с использованием которой вырубает вторичный копиер 4, а по нему пуансон 5, что позволяет получить зазор $z_{\text{п}} = l_1 + l_3 \pm l_2$. Величина l_2 может быть больше, меньше или равна нулю.

По исходному копиру 1 (рис. 96) электрод-проволокой 6 вырезают пуансон 2. Между боковыми поверхностями пуансона и отверстием в стальной пластине 3 заливают легкоплавкий сплав, из которого после затвердевания изготавливают вторичный копиер 4. По нему вырезают матрицу 5, зазор между которой и пуансоном $z_{\text{п}} = l_2 + l_3$.

По копиру 1 (рис. 97 а — д), изготовленному в сборе с копиером 2, непрерывно движущейся электрод-проволокой вырезают партию пластинчатых электрод-инструментов 3, с помощью которых методом обратного копирования обрабатывают пуансон 4. На рабочую поверхность копира наносят необходимый слой никеля 5 и по полученному таким образом копиру вырезают матрицу 6, что обеспечивает зазор $z_{\text{п}} = l_2 + l_4 - l_1 - l_3$.

Электрод-инструментом 2 (рис. 98), обработанным совместно с пуансоном 1 методом прямого копирования, получают ко-

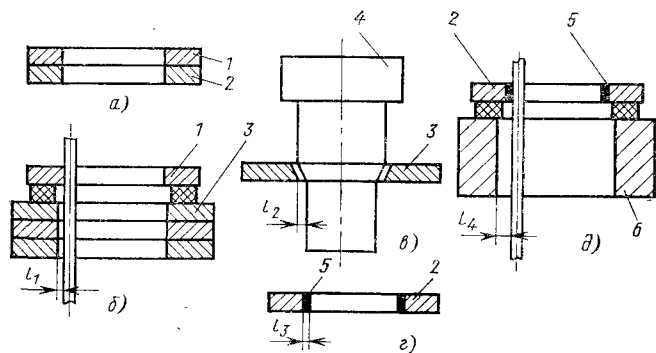


Рис. 97. Последовательность обработки пуансона и матрицы по копиру, на рабочую поверхность которого нанесен слой никеля

Рис. 98. Схема обработки копира и матрицы

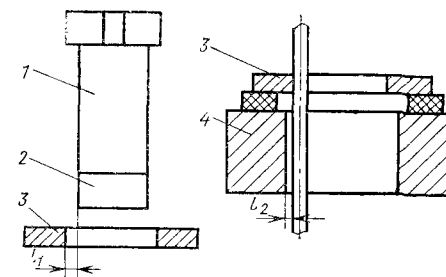
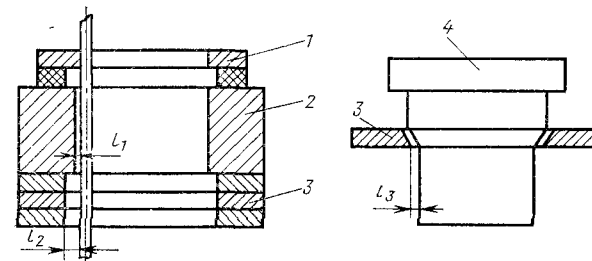


Рис. 99. Схема обработки матрицы и пластинчатых электрод-инструментов для обработки пуансона



пир 3, с помощью которого непрерывно движущейся электрод-проволокой вырезают матрицу 4. Таким образом, зазор $z_{\text{п}}$ становится равным $l_1 + l_2$.

По копиру 1 (рис. 99) непрерывно движущейся электрод-проволокой вырезают матрицу 2 и пластинчатые электрод-инструменты 3, с помощью которых методом обратного копирования обрабатывают пуансон 4, что позволяет получить зазор $z_{\text{п}} = l_1 + l_3 - l_2$.

Д. Л. Ройтман разработал процесс, в котором матрицу 1 и пуансон 2 (рис. 100) вырезают непрерывно движущимися электрод-проволоками 3 и 4 диаметрами d_1 и d_2 соответственно на станке с пантографом по увеличенному в $M_{\text{раз}}$ шаблону 5. По наружной рабочей поверхности шаблона скользит палец с роликом 6 диаметром $d_{\text{м}}$ (при обработке матрицы 1) или с роликом 7 диаметром $d_{\text{п}}$ (при обработке пуансона) пантографа. Поскольку $M = A_{\text{к}}/A_{\text{тм}}$,

$$d_{\text{м}} = (d_1 + 2l_1) M; \quad d_{\text{п}} = d_{\text{м}} + (d_2 + 2l_2 - 2z_{\text{п}}) M.$$

Откуда

$$z_{\text{п}} = \frac{(d_1 + d_2 + 2l_1 + 2l_2) M - d_{\text{п}}}{2M}.$$

В одном из процессов предусмотрено вырезание пуансона непрерывно движущейся электрод-проволокой по увеличенному чертежу, а матрицы — по пуансону.

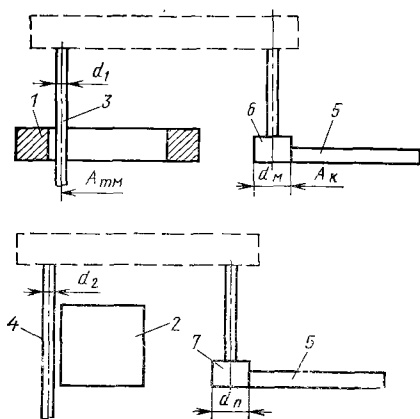


Рис. 100. Последовательность обработки матрицы и пуансона по увеличенному шаблону

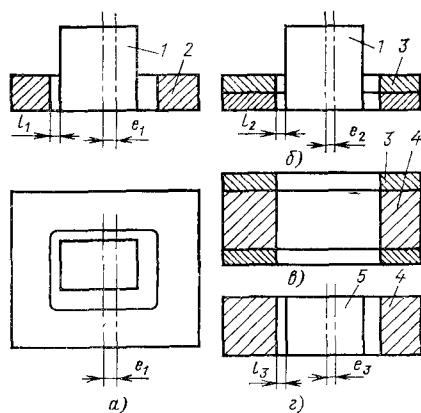


Рис. 101. Последовательность обработки матриц и пуансона электрод-инструментами, совершающими поступательное круговое движение

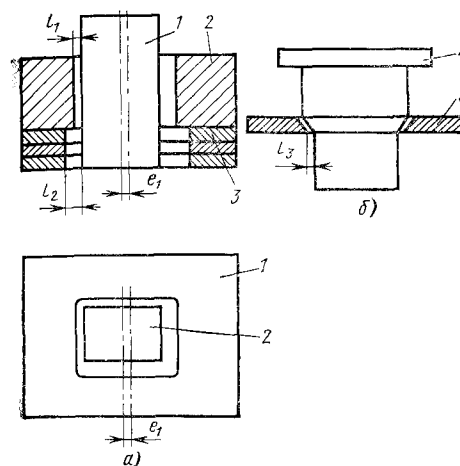


Рис. 102. Последовательность обработки матрицы и электрод-инструментов для обработки пуансона

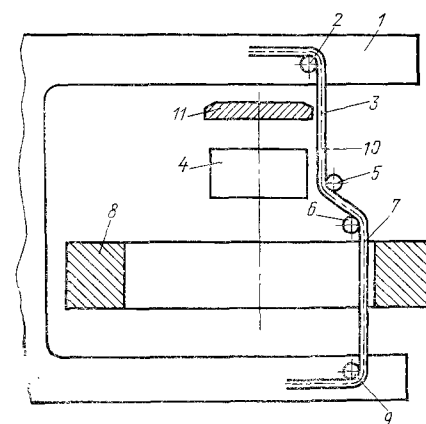


Рис. 103. Одновременная обработка фасонных поверхностей непрерывно движущейся электрод-проволокой

Имеются матрицы, в которых для обработки деталей используется поступательное круговое движение [44] сложнофасонного электрод-инструмента. Так, электрод-инструментом 1 (рис. 101, а—г) методом прямого копирования поступательным круговым движением с эксцентриситетом e_1 обрабатывают матрицу 2, а с эксцентриситетом e_2 — два шаблона 3. По шаблонам слесарно-механическим способом обрабатывают пластинчатые электрод-инструменты 4, которыми также поступательным круговым движением с эксцентриситетом e_3 обрабатывают пуансон 5 (по данным П. Е. Корочкина). В итоге между пуансоном и матрицей образуется зазор $z_{\text{п}} = e_1 + e_3 + l_1 + l_3 - e_2 - l_2$.

В другом процессе электрод-инструментом 1 (рис. 102, а, б) методом прямого копирования поступательным круговым движением с эксцентриситетом e_1 обрабатывают матрицу 2 и пластинчатые электрод-инструменты 3, которыми методом обратного копирования обрабатывают пуансон 4. В результате зазор между сопрягаемыми поверхностями $z_{\text{п}} = l_1 + l_3 - l_2$.

Одновременная обработка сопрягаемых деталей. В рассмотренных ниже процессах пуансоны и матрицы обрабатывают одновременно, что, безусловно, позволяет получить эквидистантные контуры деталей с более высокой точностью, чем при использовании описанных ранее процессов.

Электроэрозионный способ широко применяется для вырезания фасонных деталей штампов непрерывно движущейся электрод-проволокой. Использование нескольких рабочих участков электрод-проволоки, проходящей через несколько пар направляющих роликов, позволяет обрабатывать фасонные заго-

товки конических и призматических деталей. На рис. 103 представлено относительное расположение рабочих участков 3, 7 электрод-проволоки 10, имеющей направляющие ролики 2, 5, 6, 9, и заготовок 4, 8 при одновременной обработке различных поверхностей. Рабочие участки 3 и 7 электрод-проволоки между опорами 2, 5 и 6, 9 располагаются в одной плоскости. Заготовки 4, 8 устанавливаются в приспособлении и поворачиваются во время обработки от соответствующей системы автоматического регулирования. Скоба 1 с электрод-проволокой при вырезании сложнофасонных деталей перемещается в направлении к оси заготовок 4, 8 и обратно, обходя копир 11.

Использование рассмотренной схемы позволяет обрабатывать наружные (рис. 104, а) и внутренние (рис. 104, б) поверхности одной и нескольких заготовок; наружные поверхности, сопрягаемые с внутренними (рис. 104, в), а также внутреннюю и наружную поверхности одной заготовки (рис. 104, г).

Разработан процесс, при котором заготовки пуансонодержателя 1, матрицы 2 и съёмника 3 (рис. 105) располагают сверху вниз по мере увеличения рабочих размеров. Затем непрерывно движущейся электрод-проволокой 4, перематывающейся снизу вверх, вырезают в собранном пакете необходимый контур. Изменение размеров вырезанных деталей определяется величиной износа электрода (по данным ИСМ АН УССР).

В заготовке 1 (рис. 106) под углом $\alpha_{\text{н}}$ к вертикали сверлят отверстие, в которое вводят электрод-проволоку 2. Путём поворота вокруг точки 0 ее выводят на рабочие профили 3, 4 будущих матриц и пуансона, располагая под углом $\alpha_{\text{к}}$ к верти-

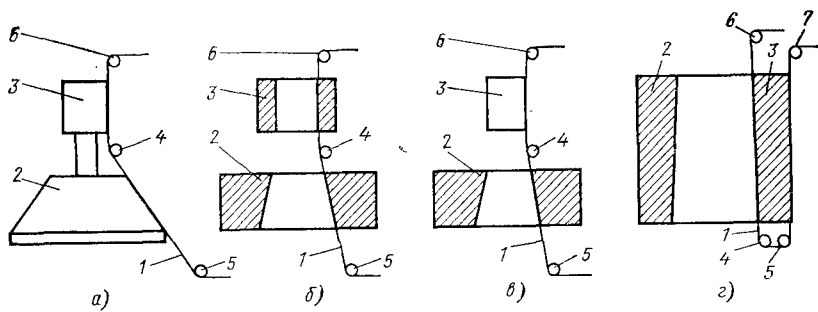


Рис. 104. Профили сопрягаемых деталей, вырезаемых непрерывно движущейся электрод-проволокой по схеме, показанной на рис. 103:

1 — электрод-проволока; 2, 3 — обрабатываемые детали; 4—7 — направляющие ролики

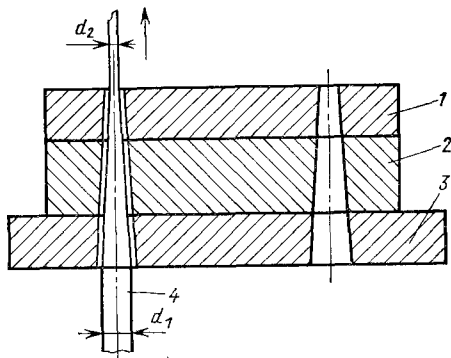


Рис. 105. Схема обработки пуансонодержателя, матрицы и съемника вырубного штампа

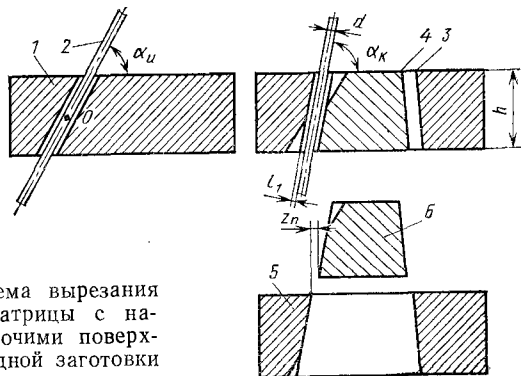


Рис. 106. Схема вырезания пуансона и матрицы с наклонными рабочими поверхностями из одной заготовки

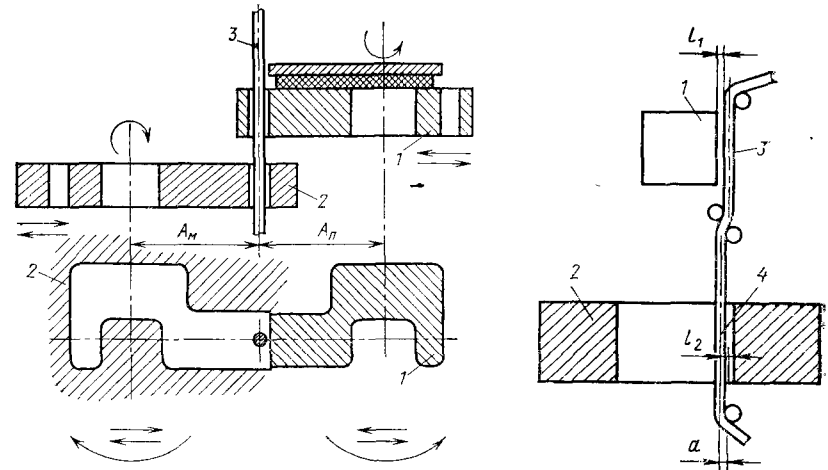


Рис. 107. Схема одновременной обработки пуансона и матрицы, совершающих вращательное и поступательное перемещения

Рис. 108. Одновременное вырезание пуансона и матрицы различными рабочими ветвями электрод-проволоки

кали. После этого непрерывно движущейся электрод-проволокой в заготовке вырезают нужный контур матрицы 5 и пуансона 6, что обуславливает получение зазора $z_n = \frac{d + 2l_1 - h \sin \alpha_k}{\cos \alpha_k}$.

Заготовки пуансона 1 и матрицы 2 (рис. 107) располагают по обе стороны электрод-проволоки 3 на столах, синхронно вращающихся в разные стороны и имеющих движение подачи либо на электрод-проволоку, навстречу друг другу, либо в противоположном направлении. Зазор определяется разностью размеров A_m и A_n .

В другом процессе пуансон 1 (рис. 108) и матрица 2 обрабатывают ветвями 3, 4 электрод-проволоки, смещенными относительно друг друга на величину a , что обеспечивает зазор $z_n = l_1 + l_2 \pm a$.

В. К. Попов разработал процесс [А. с. № 162410 (СССР)], при котором в наклонное отверстие 2 заготовки 1 (рис. 109, а—в) вводится электрод-проволока 3 диаметром d . Затем в процессе электроэрозионной обработки электрод-проволоку поворачивают вокруг точки O , пока она не займет вертикальное положение. После этого производят вырезание контура непрерывно движущейся электрод-проволокой с получением матрицы 5 и пуансона 4, на нерабочих сторонах которых имеется часть просверленного ранее отверстия. При этом $z_n = d + 2l_1$.

Рассмотренные схемы не позволяют одновременно обрабатывать заготовки ступенчатых сопрягаемых деталей, поскольку на одном станке они обрабатываются одним инструментом, а

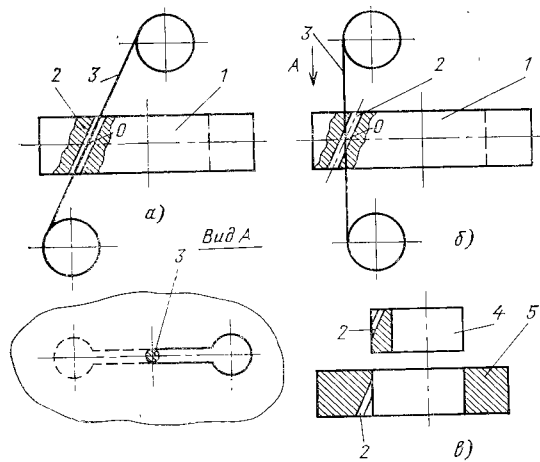


Рис. 109. Последовательность одновре­ менно­ го вырезания пуансона и матрицы с вертикаль­ ными рабочими поверх­ ностями

на разных станках — различными инструментами. Инструменты и обрабатываемые заготовки не имеют кинематической связи, что вызывает образование погрешностей.

Для обеспечения одновременной обработки заготовок ступенчатых сопрягаемых деталей каждая из них должна обрабатываться своим инструментом. Заготовки и инструменты кинематически связываются между собой с помощью механизмов, позволяющих регулировать межэлектродные зазоры между инструментами и заготовками и обеспечивать их перемещения, повторяющие перемещение одного ведущего инструмента. С использованием этого положения предложен ряд устройств и технологических схем обработки заготовок сопрягаемых деталей. Пуансон 1, к торцу которого прикреплен копир 2, вращается от привода автоматической подачи (рис. 110, а). Копир связан регулятором 3 подачи с инструментом 4, которым обрабатывают пуансон. При электроэрозионной обработке заготовок сопрягаемых деталей инструмент с пуансоном подключен к источнику питания через устройство 5 для регулирования режимов обработки. Матрица 7 обрабатывается инструментом 8, который также подключен к источнику питания через устройство 6, обеспечивающее регулирование режимов обработки. Инструменты 4 и 8 связаны механическим или электрическим устройством 9.

Обработку пуансона 1 и матрицы 7 ведут следующим образом. Инструменты 4 и 8 располагают так, чтобы их образующие, которыми они ведут обработку, были параллельны. Пуансон с копиром 2 и матрицу вращают вокруг своих осей с одной и той же окружной скоростью (рис. 110, б, в), обеспечивающей стабильное протекание процесса. Инструмент 4 связан с копиром посредством регулятора 3 автоматической подачи, который

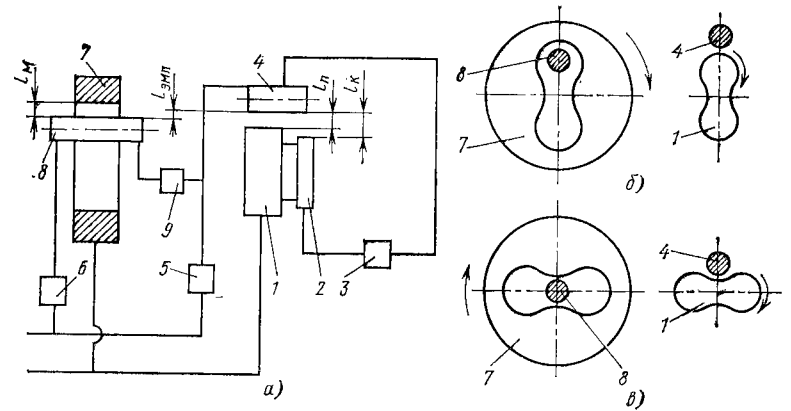


Рис. 110. Принципиальная схема одновременной обработки двух сопрягаемых деталей различными инструментами (а) и их расположение относительно обрабатываемых деталей (б, в)

поддерживает определенный зазор l_k между инструментом и копиром. Инструменты 8 и 4 также связаны специальным устройством 9, обеспечивающим между ними определенный зазор $l_{\text{эмп}}$.

Таким образом, при повороте фасонного копира 2 с пуансоном 1 в процессе обработки инструменты 4 и 8 имеют постоянное возвратно-поступательное перемещение в радиальном направлении, обеспечивающее поддержание зазоров l_k , l_m и $l_{\text{эмп}}$. Источник питания подключают к деталям 1, 7 и инструментом 4, 8 через соответствующие устройства 5, 6, регулирующие режимы обработки, которые определяют величину межэлектродных зазоров $l_{\text{п}}$ и $l_{\text{м}}$. В результате зазор между матрицей 7 и пуансоном $z_{\text{п}} = l_{\text{м}} + l_{\text{п}} - l_{\text{эмп}}$.

Изменяя соотношения между величинами межэлектродных промежутков, можно при использовании одного способа обработки получать различные величины зазора $z_{\text{п}}$.

Рассмотренная схема позволяет использовать для обработки каждой детали свой способ, например абразивный, алмазный, электроабразивный, электроалмазный, электроэрозионный. При этом можно получить различные соотношения между $l_{\text{м}}$, $l_{\text{п}}$, $l_{\text{эмп}}$ и, следовательно, изменять зазор между матрицей и пуансоном в широких пределах. Так, при абразивном, алмазном, электроабразивном, электроалмазном шлифовании процесс протекает нормально при непосредственном контакте между инструментом и обрабатываемой заготовкой. Следовательно, при этом $l_{\text{п}}$ и $l_{\text{м}}$ равны нулю. Обеспечив за счет устройства 9 $l_{\text{эмп}}$ также равным нулю, можно получить беззазорное сопряжение деталей. Если же при $l_{\text{п}} = 0$ и $l_{\text{м}} = 0$ иметь $l_{\text{эмп}}$ больше нуля, то будет обеспечен натяг или зазор между сопрягаемыми деталями.

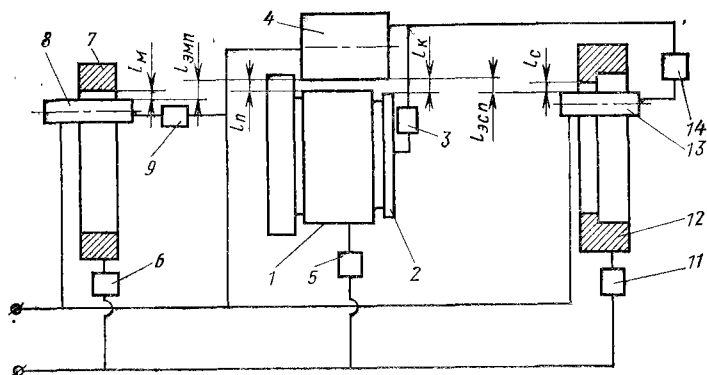


Рис. 111. Принципиальная схема одновременной обработки трех сопрягаемых деталей различными инструментами (обозначения те же, что на рис. 110)

Аналогичная схема может быть использована для одновременной обработки трех сопрягаемых деталей (рис. 111): пуансона 1, к торцу которого прикреплен копир 2, матрицы 7 и съемника 12. Инструменты 8 и 4 связаны между собой через устройство 9, а инструменты 13 и 4 — через устройство 14; устройства позволяют регулировать зазоры $l_{\text{эмп}}$ и $l_{\text{эсп}}$. Зазоры l_M , l_n и l_c также можно изменять с помощью устройств 6, 5 и 11, обеспечивающих регулирование режимов обработки. Благодаря изменению указанных зазоров и возможности использования различных способов обработки между сопрягаемыми деталями можно получить любые, необходимые по величине зазоры.

Рассмотренная схема обработки деталей аналогична представленной на рис. 110.

ПРОЦЕССЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ НЕОБХОДИМЫЙ ЗАЗОР МЕЖДУ СОПРЯГАЕМЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ В СОБРАННОМ ШТАМПЕ

Рассмотренные выше процессы предназначены только для обработки пуансона и матрицы вырубного штампа и в большинстве своем не гарантируют получение без ручных подгоночных работ равномерных зазоров между основными деталями штампа: матрицей и пуансоном, матрицей и выталкивателем, пуансоном и съемником. Обеспечение точности сопрягаемых деталей и равномерного зазора между ними в собранном штампе — это принципиально различные задачи, поскольку точность изготовления деталей еще не решает вопроса равномерного распределения зазора между ними в собранном штампе, а обеспечение такого зазора не предопределяет необходимую точность изготовления деталей.

Ниже описан ряд процессов вырезания рабочих контуров одновременно в пуансоне, матрице, съемнике, выталкивателе,

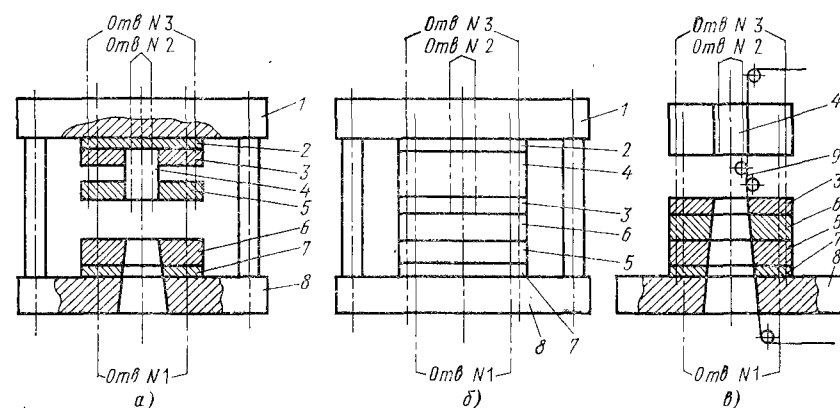


Рис. 112. Вырубной штамп простого действия (а), сборка заготовок его основных деталей (б) и схема их обработки (в)

пуансонодержателе, подматричной пластине, нижней плите любых типов вырубных штампов с обеспечением равномерного зазора между ними при сборке. Перемещение электрод-провода по контуру вырезаемого профиля может при этом осуществляться по копиру, чертежу, программе или с применением любых других устройств.

Одновременное вырезание рабочих контуров у пуансонодержателя, пуансона, съемника, матрицы, подматричной пластины и нижней плиты в вырубных штампах, у которых вырубленная деталь проваливается через окно матрицы (рис. 112, а), ведут следующим образом. Берут блок штампа, состоящий из верхней 1 и нижней 8 плит, связанных между собой направляющими колонками. Обработанные по базовым поверхностям заготовки собирают в следующей последовательности: верхняя плита 1, заготовки подпуансонной пластины 2, пуансона 4, пуансонодержателя 3, матрицы 6, съемника 5, подматричной пластины 7, нижняя плита 8 (рис. 112, б). На периферии указанных заготовок сверлят два отверстия (№ 1) через весь собранный пакет и устанавливают штифты. Затем сверлят еще два отверстия (№ 2) через верхнюю плиту 1 и заготовки подпуансонной пластины 2 и пуансона 4 таким образом, чтобы они проходили через тело будущего пуансона. Последующие два отверстия (№ 3) сверлят через верхнюю плиту 1, заготовки подпуансонной пластины 2, пуансона 4 и съемника 5 в месте, где при сборке штампа будут установлены направляющие колонки для съемника. Так же сверлят ряд отверстий в рассматриваемом пакете, нарезают, где требуется, резьбы, с помощью которых при сборке штампа будут крепиться обработанные детали.

После тщательной обработки всех шести отверстий снимают верхнюю плиту 1 с направляющими колонками штампа и подпуансонную пластину 2. Затем в заготовках пуансонодержателя 3, матрицы 6, съемника 5, подматричной пластины 7, в нижней плите 8 и отдельно в заготовке пуансона 4 сверлят по одному отверстию (№ 4). Они проходят в непосредственной близости от будущих рабочих контуров: у заготовки пуансона 4 с наружной стороны будущего рабочего контура, во всех остальных заготовках — с внутренней.

Затем пакет заготовок разбирают, заготовки термически обрабатывают и шлифуют их опорные поверхности. После этого заготовки указанных деталей (без подпуансонной пластины 2 и верхней плиты 1) и нижнюю плиту 8 вновь собирают пакетом в прежней последовательности, устанавливают штифты в отверстия № 1 и закрепляют пакет в приспособлении. При этом между заготовками пуансона 4 и пуансонодержателя 3 устанавливают зазор, достаточный для размещения опоры с направляющими элементами электрод-проволоки 9.

При вырезании рабочих контуров по копиру над заготовкой пуансона 4 устанавливают копир, приспособление монтируют на станке и вводят в отверстие № 4 электрод-проволоку 9. Затем один ее участок врезают в тело пуансона 4, подводя к копиру, другой участок, которым обрабатывают остальные детали, врезают в тело заготовок на необходимую величину, выводя электрод-проволоку на линию будущих рабочих контуров (рис. 112, в). При этом оба участка электрод-проволоки располагают в вертикальной плоскости: ось участка, которым обрабатывают пуансоны, располагают вертикально, а ось участка, которым обрабатывают остальные детали, смещают по отношению к оси первого участка и наклоняют под углом, необходимым для обеспечения требуемого зазора между пуансоном 4 и матрицей 6 и другими вырезаемыми деталями. Затем производят электроэрозионное вырезание рабочих контуров одновременно во всех деталях, собранных в пакет.

После этого детали собирают в штампе, используя ранее обработанные отверстия для крепления и фиксации их взаимного расположения: по отверстиям № 1 фиксируют матрицу 6, подматричную пластину 7 с нижней плитой 8, а пуансонодержатель 3 и подпуансонную пластину 2 — с верхней плитой 1; по отверстиям № 2 — пуансон 4 с верхней плитой 1; по отверстиям № 3 устанавливают направляющие съемника 5. В результате после сборки штампа получают необходимые по величине равномерно распределенные зазоры между обработанными деталями, и, кроме того, достаточный натяг между пуансонодержателем 3 и пуансоном 4.

Процесс одновременного вырезания рабочих контуров у матрицы, съемника, выталкивателя и пуансона вырубных штампов, у которых вырубленная деталь выбрасывается на рабочую по-

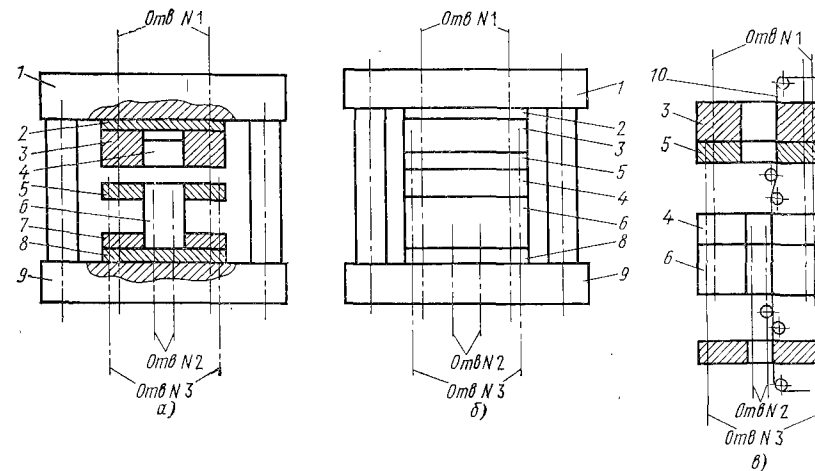


Рис. 113. Вырубной штамп (а), сборка заготовок его основных деталей (б) и схема их обработки (в)

верхность съемника (рис. 113, а), следующий. Блок штампа, состоящий из верхней 1 и нижней 9 плит, соединяется направляющими колонками. Заготовки, обработанные по базовым плоскостям, собирают в пакет в следующей последовательности (сверху вниз): верхняя плита 1; заготовки подматричной пластины 2, матрицы 3, съемника 5, выталкивателя 4, пуансона 6, пуансонодержателя 7 и подпуансонной пластины 8; нижняя плита 9 (рис. 113, б). На периферии указанных заготовок через весь собранный пакет сверлят два отверстия (№ 1) и устанавливают штифты. Затем сверлят еще два отверстия (№ 2) через нижнюю плиту 9, заготовки подпуансонной пластины 8, пуансонодержателя 7, пуансона 6, выталкивателя 4, съемника 5 в месте, где при сборке штампа будут установлены направляющие колонки для съемника. Так же сверлят ряд отверстий (№ 3) в рассматриваемом пакете заготовок, нарезают, где требуются, в них резьбы, с помощью которых при сборке штампа будут крепиться обработанные детали.

После тщательной обработки всех отверстий снимают верхнюю 1 и нижнюю 9 плиты. В заготовке пуансонодержателя 7 и в остальных заготовках, связанных попарно штифтами (заготовки матрицы и съемника, выталкивателя и пуансона), установленных в отверстиях № 1, сверлят еще по одному отверстию (№ 4). Они проходят в непосредственной близости от будущих рабочих контуров: у матрицы 3, съемника 5, пуансонодержателя 7 с внутренней стороны будущего рабочего контура, у выталкивателя 4 и пуансона 6 — с наружной.

Затем пакет разбирают, проводят необходимую термообработку заготовок и шлифуют их опорные поверхности. После это-

го заготовки вновь собирают пакетом, устанавливают штифты в отверстия № 1 и закрепляют пакет в приспособлении. При этом между заготовками съемника 5 и выталкивателя 4, а также между заготовками пуансона 6 и пуансонодержателя 7 устанавливают зазоры, достаточные для размещения опор с направляющими элементами электрод-проволоки 10.

При вырезании рабочих контуров в деталях по копиру его устанавливают над заготовкой матрицы. Приспособление монтируют на станке, вводят в отверстия № 4 электрод-проволоку 10 и рабочий участок ее, расположенный в зоне заготовок пуансонодержателя, матрицы и съемника, подводят к копиру. Другой рабочий участок электрод-проволоки, которым будут вырезать рабочий контур выталкивателя и пуансона, врезают в эти заготовки на необходимую величину, выводя электрод-проволоку на линию будущего рабочего контура. При этом участок электрод-проволоки, которым обрабатывают матрицу 3 и съемник 5, параллелен участку, обрабатываемому выталкивателем 4 и пуансоном 6, но смещен на величину, необходимую для обеспечения требуемого зазора между матрицей, пуансоном и другими вырезаемыми деталями.

Затем осуществляется одновременное электроэрозионное вырезание рабочих контуров в матрице, съемнике, выталкивателе и пуансоне (рис. 113, в). После этого детали собирают в штамп, используя ранее обработанные отверстия для крепления и фиксации их взаимного расположения: по отверстиям № 1 фиксируют матрицу с верхней плитой, по отверстиям № 2 — пуансон с нижней плитой, по отверстиям № 3 устанавливают направляющие элементы съемника. В результате сборки штампа получают необходимые по величине равномерно расположенные зазоры между обработанными деталями.

Одновременное вырезание рабочих контуров у пуансона (рис. 114, а), выталкивателя, пуансонодержателя, матрицы, съемника, пуансона-матрицы, подпуансонной пластины, нижней плиты вырубного штампа совмещенного действия осуществляется в такой последовательности. В блоке штампа собраны пакетом I: верхняя плита 1, заготовки подпуансонной пластины 2, пуансонодержателя 3, пуансона 4, выталкивателя 6, матрицы 5, съемника 7, пуансона-матрицы 8 и подматричной пластины 9, нижняя плита 10 (рис. 114, б).

На периферии указанных заготовок сверлят два отверстия (№ 1) через весь пакет и устанавливают штифты. Затем сверлят еще два отверстия (№ 2) через верхнюю плиту и заготовки подпуансонной пластины и пуансона таким образом, чтобы они проходили через тело будущего пуансона 4. Последующие два отверстия (№ 3) сверлят через нижнюю плиту и заготовки подматричной пластины, пуансона-матрицы таким образом, чтобы они проходили через тело будущей пуансона-матрицы 8. Еще два отверстия (№ 4) сверлят через нижнюю плиту 10 и

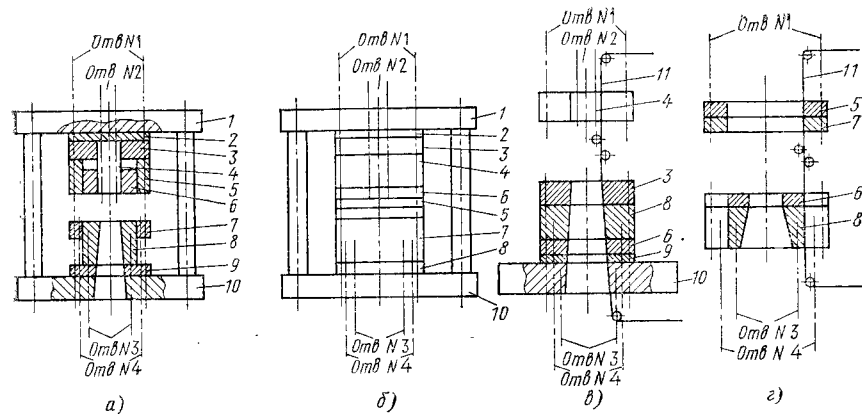


Рис. 114. Вырубной штамп совмещенного действия (а), сборка заготовок его основных деталей (б) и схемы их обработки (в, г)

заготовки подматричной пластины 9, пуансона-матрицы 8 и съемника 7 в месте, где при сборке штампа будут установлены направляющие колонки для съемника. Так же сверлят еще ряд отверстий в рассматриваемом пакете деталей, нарезают, где требуется, резьбы, с помощью которых при сборке штампа будут крепиться обрабатываемые детали.

После обработки всех восьми отверстий пакет I разбирают и затем собирают в такой последовательности (пакет II): заготовки пуансона 4, пуансонодержателя 3, пуансона-матрицы 8, выталкивателя 6 и подматричной пластины 9, нижняя плита 10. Штифтуют указанные детали без заготовки пуансона по отверстиям № 1 и сверлят еще одно отверстие (№ 5) в непосредственной близости от будущих рабочих контуров деталей: у пуансонодержателя, пуансона-матрицы и выталкивателя с внутренней стороны контуров, в заготовке пуансона — с внешней стороны.

После этого пакет II разбирают и собирают пакетом III в такой последовательности: заготовки матрицы 5, съемника 7, выталкивателя 6 и пуансона-матрицы 8. Указанные заготовки штифтуют по отверстиям № 1 и сверлят в них еще одно отверстие (№ 6) в непосредственной близости от будущих рабочих контуров: у заготовки матрицы и съемника с внутренней стороны контуров, у заготовки выталкивателя и пуансона-матрицы — с наружной стороны. Затем пакет III разбирают, все заготовки термически обрабатывают и шлифуют их опорные отверстия, после чего заготовки пуансона 4, пуансонодержателя 3, пуансона-матрицы 8, выталкивателя 6, подматричной пластины 9 и нижнюю плиту 10 собирают пакетом II и выполняют все операции по подготовке к вырезанию рабочих контуров по

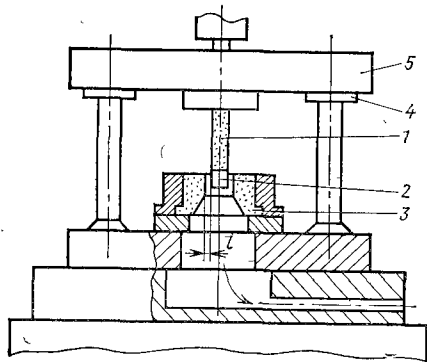


Рис. 115. Использование блока штампа для обработки матрицы электрод-инструментом, прикрепленным к торцу пуансона, методом прямого копирования

схеме, представленной на рис. 113, в. Электрод-проволоку 11 для обеспечения процесса вырезания вводят в отверстие № 5.

После вырезания деталей в пакете II его разбирают и собирают заготовки матрицы, съемника, выталкивателя и пуансона-матрицы пакетом III. Затем выполняют все операции по подготовке и вырезанию рабочих контуров так же, как при рассмотрении схемы на рис. 113, г. Электрод-проволоку 11 для обеспечения процесса вырезания вводят в отверстие № 6.

После электроэрозионного вырезания рабочих контуров детали собирают в штампе, используя ранее обработанные отверстия для крепления и фиксации взаимного расположения: по

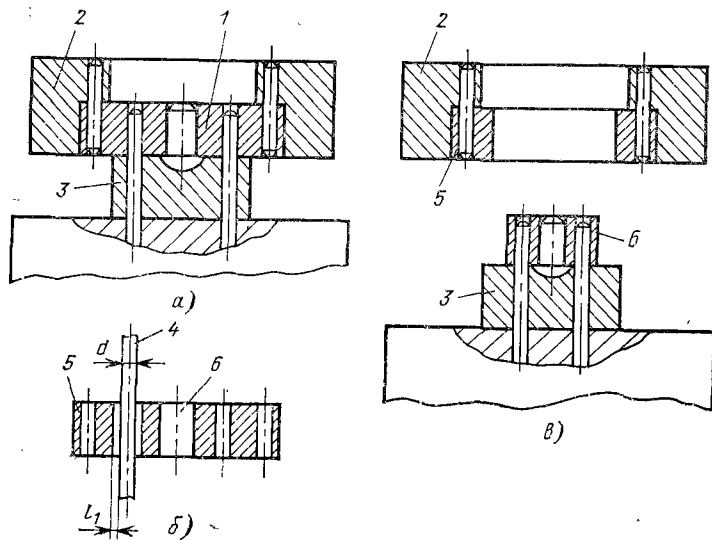


Рис. 116. Последовательность обработки матрицы и пуансона, предварительно собранных в блоке штампа

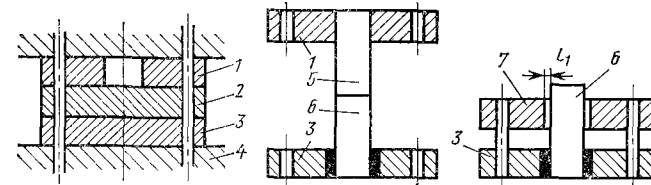


Рис. 117. Последовательность обработки матрицы с обеспечением зазора $z_{\text{п}}=l_1$

отверстиям № 1 фиксируют подматричную пластину 2, пуансонодержатель 3 и матрицу 5 с верхней плитой 1; по отверстиям № 2 — подматричную пластину 2 и пуансон 4 с верхней плитой 1; по отверстиям № 3 — пуансон-матрицу 8 с подматричной пластиной 9 и нижней плитой 10; по отверстиям № 4 устанавливают направляющие для съемника 7.

Кроме рассмотренных используются следующие процессы. Пуансон 1 (рис. 115) вместе с прикрепленной к его торцу пластиной 2, служащей электрод-инструментом для изготовления отверстия в матрице, обрабатывают до окончательных размеров. Рабочее окно матрицы 3 обрабатывают предварительно с оставлением припуска до 0,1 мм. Штамп собирают, направляющие втулки 4 изолируют от плиты 5. Электрод-инструментом 2 калибруют рабочее окно матрицы, что обеспечивает получение зазора l между пуансоном и матрицей.

По другому процессу в предварительно шлифованной заготовке 1 (рис. 116, а—в) просверлены отверстия, с помощью которых она крепится к матрице и пуансонодержателю 2, 3 в полностью собранном штампе. После разборки штампа заготовка 1 разрезается по контуру непрерывно движущейся электрод-проволокой 4 диаметром d с получением матрицы 5 и пуансона 6, которые при сборке штампа крепятся к соответствующим держателям с помощью ранее просверленных отверстий. Отсюда зазор между пуансоном и матрицей $z_{\text{п}}=d+2l_1$.

В ЭНИМСе разработан процесс, по которому (рис. 117) в пуансонодержателе 1, заготовке матрицы 2 и электрододержателе 3, смонтированными в штампе 4, сверлят отверстия для крепления и фиксации указанных деталей. Затем штамп разбирают. Пуансон 5 с прикрепленным к нему электрод-инструментом 6 обрабатывают и крепят в пуансонодержателе 1 и заливают в электрододержателе легкоплавким сплавом. После этого электрод-инструментом 6, отсоединенным от пуансона 5, обрабатывают матрицу со стороны, противоположной пуансону. При этом блок электрод-инструмента 6 направляется по отверстиям в матрице 7. В итоге зазор между сопрягаемыми поверхностями $z_{\text{п}}=l_1$.

Величины бокового (l_6) и торцового (l_T) зазоров при обработке твердосплавных и стальных заготовок

Материал заготовки	Режим обработки	Электрод-инструмент	Зазоры, мм	
			l_6	l_T
Твердый сплав	Мягкий ($W_H = 0,0002$ Дж)	Латунный	0,028	—
		Медный	0,03	—
	Чугунный (СЧ 18—36)	0,04	—	
	Грубый ($W_H = 0,2$ Дж)	Латунный	0,16	—
		Медный	0,18	—
Чугунный	0,21	—		
Сталь [44]	Средняя сила тока 60 А	Алюминиевый (АЛ5)	—	0,42
		Медный	0,47	0,25
		Из сплава ЭЭГ	0,49	0,07

РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТОВ

1. ИСХОДНЫЕ СВЕДЕНИЯ

При внедрении электрод-инструмента в обрабатываемую заготовку между торцовыми и боковыми поверхностями электрод-инструмента и формируемой полости образуются соответственно торцовый l_T и боковой l_6 зазоры. Величина зазоров зависит от угла наклона боковых поверхностей электрод-инструмента и обрабатываемой полости, режима обработки, материала электродов, глубины их внедрения в заготовку и от других факторов.

При горизонтальном расположении межэлектродного промежутка продукты эрозии будут концентрироваться у поверхности обрабатываемой заготовки, а при вертикальном его расположении — распределяться в межэлектродном зазоре. Следовательно, в обоих случаях фактическая величина межэлектродного зазора $l_{пр}$, которая может быть пробита электрическим разрядом, будет меньше l_6 на сумму размеров продуктов эрозии $\sum d_i$, расположенных в данном сечении, т. е. $l_{пр} = l_6 - \sum d_i$. При этом с ростом угла наклона боковых поверхностей в данном сечении увеличивается объем продуктов эрозии, что может привести к возникновению дополнительных разрядов. В этом случае с обрабатываемой поверхности будет снят большой слой металла. Отсюда следует, что $l_6 > l_\alpha > l_T > l_{пр}$. Колебание зазоров l_6 и l_T определяется соответственно значениями δ_6 и δ_T .

На рис. 64 приведена зависимость l_6 и δ_6 от энергии импульса при обработке твердого сплава; зависимость l_T и δ_T от W_H носит аналогичный характер. На мягких режимах обработки l_6 находится в пределах нескольких сотых миллиметра (табл. 20), на грубых режимах обработки боковой зазор выше. При обработке стальных заготовок зазор l_T между горизонтальными и наклонными поверхностями и зазор l_6 между вертикальными поверхностями увеличивается.

С увеличением глубины H обработки зазор l_6 растет и достигает, например, в случае обработки на определенном режиме 0,05 мм при $H=5$ мм и 0,13 мм при $H=20$ мм; с дальнейшим

ростом H боковой зазор не изменяется. На величину l_6 , а следовательно, и на конусность отверстия оказывают влияние условия выполнения операции, в частности, наличие прокачивания рабочей жидкости в зону обработки. При обработке отверстий без прокачивания жидкости зазор l_6 больше, чем при обработке прокачиванием, в результате чего в первом случае конусность отверстия больше. До значения $H/d=5 \div 6$ боковой зазор растет, а с дальнейшим увеличением отношения глубины отверстия к диаметру d остается неизменным. В литературе [39, 44 и др.] приведены обширные сведения по размерам l_6 и l_T в зависимости от многих факторов.

Размеры электрод-инструмента определяются не только зазорами l_6 и l_T , но и абсолютной величиной его износа $h_э$, которая при постоянном относительном линейном износе $\Delta \gamma_э$ зависит от толщины z слоя металла, удаленного в процессе обработки, т. е. $h_э = z \Delta \gamma_э$. Вполне очевидно, что самая малая толщина слоя металла, удаляемого с заготовки, не должна быть меньше минимальной величины снимаемого припуска z_{min} .

Однако наличие межэлектродного зазора, а также прохождение электрического разряда по кратчайшему расстоянию между электродами вносит некоторые особенности в расчет размеров электрод-инструмента. На рис. 118, а представлен электрод-инструмент Э, перемещающийся по направлению, указанному стрелкой, в сторону обрабатываемой заготовки З. Принято, что электрод-инструмент в процессе электроэрозионной обработки не изнашивается, а между боковыми поверхностями нет дополнительных электрических разрядов. Такая идеализованная схема обработки позволяет более четко выявить особенности определения толщины слоя металла, снимаемого с разных поверхностей заготовки.

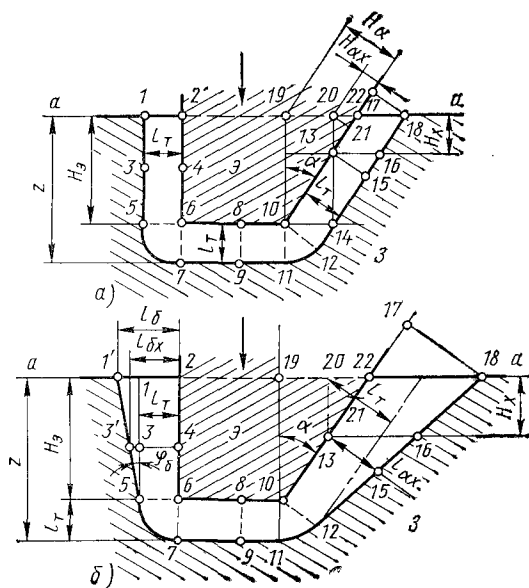


Рис. 118. Схемы к расчету толщины слоя металла, удаляемого в процессе обработки неизнашивающимся электрод-инструментом без (а) и при наличии (б) дополнительных разрядов между боковыми поверхностями электрод-инструмента и обрабатываемой полости

В данном случае все поверхности электрод-инструмента параллельны обрабатываемым поверхностям заготовки, а межэлектродный зазор во всех нормальных сечениях равен l_T . Участки 6, 8, 10 торцевой поверхности электрод-инструмента «удалили» с заготовки слой металла толщиной z . В точках 6 и 10 электрические разряды проходили не только в направлениях 6—7 и 10—11, но и между всеми точками заготовки, находящимися на поверхностях 5—7, 11—12 и точками 6 и 10 соответственно. В итоге в направлении перемещения электрод-инструмента, совпадающем с направлением 6—7, 10—11, будет снят слой $z = H_9 + l_T$, а в направлении 6—5 — слой, равный l_T .

Таким образом, между точками 4 и 3, 2 и 1 вообще не будет проходить каких-либо разрядов, так как зазор l_T уже образован в результате обработки точкой 6, и на этих участках с заготовки не будет удаляться металл (снимаемый слой равен нулю). Съем металла на наклонной поверхности заготовки любым участком электрод-инструмента происходит благодаря прохождению электрических разрядов в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности. Отсюда ясно, что электрические разряды будут проходить по направлениям 13—15 и 17—18, а не по 13—14, 17—16, совпадающим с направлением перемещения электрод-инструмента. Таким образом, точкой 10 в направлении 10—12 и точкой 13 в направлении 13—15 «удалены» слои металла толщиной соответственно: $z_{10} = H_\alpha + l_T$ и $z_{13} = H_{\alpha x} + l_T$.

Значения H_α и $H_{\alpha x}$ отсчитывают от точек 19 и 20, являющихся точками пересечения плоскости a — a , проходящей через верхнюю поверхность заготовки, с линиями, проходящими через рассматриваемые точки электрод-инструмента (в данном случае точки 10 и 13) в направлении, параллельном его перемещению. Размеры H_α и $H_{\alpha x}$ равны величине отрезка, отсчитываемого по нормали, опущенной соответственно из точек 19 и 20 на боковую поверхность электрод-инструмента. Отсюда следует, что в случае обработки без износа электрод-инструмента и без дополнительных разрядов между боковыми поверхностями электрода и заготовки толщина слоя, удаляемого на любом участке любой поверхности, может быть определена по уравнению

$$z_x = H_x \sin \alpha + l_T, \quad (13)$$

где H_x — расстояние от рассматриваемой точки на поверхности электрод-инструмента до плоскости a — a ; α — угол наклона рассматриваемой поверхности электрод-инструмента к направлению его перемещения в процессе обработки.

Рассмотрим схему электроэрозионной обработки без износа электрод-инструмента, но с наличием дополнительных разрядов между боковыми поверхностями электрода и заготовки (рис. 118, б). Каждый участок вертикальной боковой поверхности 2—6 электрод-инструмента «снял» с заготовки слой толщиной $z_6 = l_6 - l_T$. Вполне очевидно, что точка 2 только вступила в процесс обработки, и этот участок электрод-инструмента еще не смог «удалить» с заготовки ощутимый по размеру слой. Очевидно, что удаление $z_{6 \max} = l_6 - l_T$ определялось дополнительными разрядами в точке 6 по направлению 5—6, и что именно этот участок электрод-инструмента «удалил» с заготовки слой $z_{6 \max}$.

Для удобства последующих расчетов допустим, что участок 1—5 боковой поверхности заготовки является прямолинейным, угол между боковой поверхностью и направлением перемещения электрод-инструмента равен φ_6 и может быть определен из выражения $\operatorname{tg} \varphi_6 = (l_6 - l_T) H^{-1}$. Отсюда следует, что слой, удаляемый с любой точки вертикальной боковой поверхности заготовки, будет

$$z_{6x} = (H_x/H)(l_6 - l_T). \quad (14)$$

При этом расстояние H_x отсчитывается от плоскости a — a , проходящей через верхнюю поверхность заготовки. Исходя из данного выражения, точка 2 электрод-инструмента «удалила» припуск $z_{62} = 0$ (так как $H_x = 0$), а точка 6 в направлении 6—5 — припуск $z_{66} = l_6 - l_T$ (так как $H_x = H$).

Аналогично рассуждая, можно прийти к выводу о том, что точкой 10 электрод-инструмента в направлении 10—12 «удален» максимальный по толщине слой, а точкой 17 — слой, рав-

$$\gamma_{\text{вб}} = z_{\text{бх}} \Delta \gamma_{\text{в}} = \Delta \gamma_{\text{в}} (l_{\text{б}} - l_{\text{т}}) (H_{\text{х}}/H).$$

Таким образом диаметральный размер большей ступени электрод-инструмента (рис. 119) будет

$$D_{\text{в}} = D_{\text{о}} + (\Delta_{\text{од}}/2) - 2(1 - \Delta \gamma_{\text{в}})(l_{\text{б}} - l_{\text{т}}) - 2l_{\text{т}}, \quad (15)$$

где $D_{\text{о}}$ — номинальный диаметр отверстия; $\Delta_{\text{од}}$ — допуск на диаметр отверстия.

3. ОБРАБОТКА ПРОСТЫХ ПОЛОСТЕЙ

ОБРАБОТКА ПОЛОСТИ НА ОДНОМ РЕЖИМЕ

Полость с вертикальными боковыми поверхностями (рис. 120, а) не имеет острых углов. Она будет обрабатываться одним электрод-инструментом на одном режиме с интенсивной прокачкой рабочей жидкости через зону обработки.

Расчет размеров электрод-инструмента без учета его износа. Вертикальные размеры рабочей части электрод-инструмента

$$H_{\text{в}}^0 = z_{\text{н}} - l_{\text{т}} = H_{\text{п}} + (\Delta_{\text{пн}}/2) - l_{\text{т}}, \quad (16)$$

горизонтальные размеры

$$L_{\text{в}}^0 = L_{\text{п}} + (\Delta_{\text{пл}}/2) - 2l_{\text{б}}.$$

Расчет размеров электрод-инструмента с учетом его износа. Вертикальные размеры можно определить из выражения

$$H_{\text{в}} = (1 + \Delta \gamma_{\text{в}}) z_{\text{н}} - l_{\text{т}} = (1 + \Delta \gamma_{\text{в}}) [H_{\text{п}} + (\Delta_{\text{пн}}/2)] - l_{\text{т}}. \quad (17)$$

Горизонтальные размеры электрод-инструмента в этом случае могут быть определены так же, как и диаметральные [см. рис. 118, б, 120, б и выражение (15)], т. е.

$$L_{\text{в}} = L_{\text{п}} + (\Delta_{\text{пл}}/2) - 2(1 - \Delta \gamma_{\text{в}})(l_{\text{б}} - l_{\text{т}}) - 2l_{\text{т}}.$$

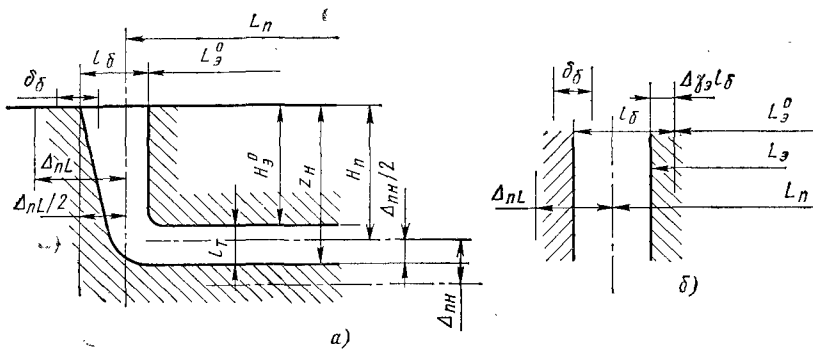


Рис. 120. Схема к расчету размера электрод-инструмента для обработки простой полости на одном режиме

На рис. 120 и в формулах использованы следующие обозначения: $H_{\text{п}}$ — вертикальный размер обрабатываемой полости; $L_{\text{п}}$ — горизонтальный размер обрабатываемой полости; $z_{\text{н}}$ — слой металла, снимаемый с горизонтальной поверхности полости.

ОБРАБОТКА ПОЛОСТИ НА ТРЕХ РЕЖИМАХ

Обрабатываемая полость (рис. 121) с вертикальными боковыми поверхностями не имеет острых углов, размеры радиусов округления углов не лимитированы. Полость будет обрабатываться методом прямого копирования тремя электрод-инструментами 1, 2 и 3 соответственно на черновом (индекс «чр»), среднем («ср») и чистовом («чс») режимах. С использованием каждого электрод-инструмента обработка будет вестись на одном режиме. Полости 4, 5 и 6 после электроэрозионной обработки соответственно электрод-инструментами 1, 2 и 3 другими способами не обрабатываются.

Расчет размеров электрод-инструмента без учета его износа. Вертикальные размеры

$$H_{\text{в}}^0_{\text{чр}} = z_{\text{н чр}} - l_{\text{т чр}}; \quad H_{\text{в}}^0_{\text{ср}} = z_{\text{н ср}} - l_{\text{т ср}}; \quad H_{\text{в}}^0_{\text{чс}} = H_{\text{п}} + (\Delta_{\text{пн}}/2) - l_{\text{т чс}}.$$

Горизонтальные размеры

$$L_{\text{в}}^0_{\text{чр}} = L_{\text{п}} + \frac{\Delta_{\text{пл}}}{2} - z_{\text{н чс}} - z_{\text{н ср}} - 2l_{\text{б чр}}; \quad L_{\text{в}}^0_{\text{ср}} = L_{\text{п}} + \frac{\Delta_{\text{пл}}}{2} - z_{\text{н чс}} - 2l_{\text{б ср}}; \quad L_{\text{в}}^0_{\text{чс}} = L_{\text{п}} + \frac{\Delta_{\text{пл}}}{2} - 2l_{\text{б чс}}.$$

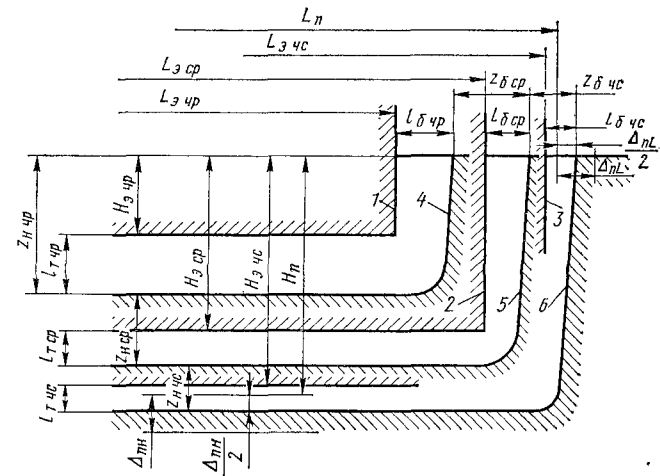


Рис. 121. Схема к расчету размера электрод-инструмента для обработки простой полости на трех режимах

где $z_{б чр}$ — слой металла на боковой поверхности, снимаемый на черновом режиме; $e_{чр}$, $e_{чс}$ — эксцентриситеты электрод-инструмента с поступательным круговым движением при обработке на черновом и чистовом режимах соответственно.

Расчет размеров электрод-инструмента с учетом его износа. Вертикальные размеры

$$H_э = (1 + \Delta\gamma_{э чр}) z_{н чр} + (1 + \Delta\gamma_{э ср}) z_{н ср} + (1 + \Delta\gamma_{э чс}) z_{н чс} - l_{т чс}.$$

Горизонтальные размеры могут быть определены из следующих соображений. Слой металла с боковых поверхностей полости будет удаляться в результате электрических разрядов между боковыми поверхностями электрод-инструмента и полости. Отсюда, с учетом выражения (15)

$$L_э = L_{п} + (\Delta_{пL}/2) - 2[(1 - \Delta\gamma_{э чс}) z_{б чс} + (1 - \Delta\gamma_{э ср}) z_{б ср} + (1 - \Delta\gamma_{э чр}) z_{б чр}],$$

или, так как $z_{б чр} = e_{чр} + l_{б чр}$ и $e_{чс} = z_{б чс} + z_{б ср} + z_{б чр} - l_{б чс}$,

$$L_э = L_{п} + (\Delta_{пL}/2) - 2(e_{чс} + l_{б чс} - \Delta\gamma_{э чс} z_{б чс} - \Delta\gamma_{э ср} z_{б ср} - \Delta\gamma_{э чр} z_{б чр}).$$

5. ОБРАБОТКА ФАСОННЫХ ПОЛОСТЕЙ С БОКОВЫМИ НАКЛОННЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

ОБРАБОТКА ПОЛОСТИ НА ОДНОМ РЕЖИМЕ

Фасонная полость с боковыми наклонными поверхностями не имеет острых углов. Полость будет обрабатываться на одном режиме одним электрод-инструментом с интенсивной прокачкой рабочей жидкости через зону обработки.

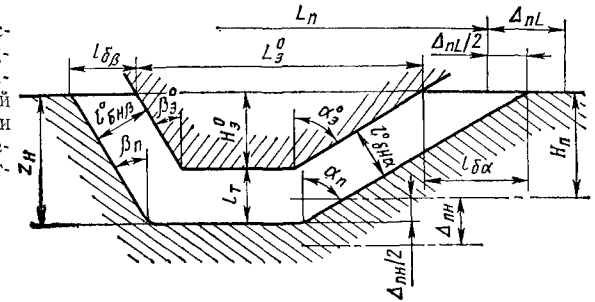
Расчет размеров электрод-инструмента без учета его износа. Рассмотрим два случая расчета: при отсутствии и при наличии дополнительных электрических разрядов между боковыми поверхностями электрод-инструментов и обрабатываемой полости. Вертикальные размеры электрод-инструмента в обоих случаях могут быть определены из выражения (16).

При отсутствии дополнительных разрядов между боковыми поверхностями обрабатываемой полости и электрод-инструмента будет иметь место $\alpha_э^0 = \alpha_{п}$, $\beta_э^0 = \beta_{п}$, $l_{б н\alpha}^0 = l_{б н\beta}^0 = l_{т}$ (рис. 123). В связи с этим горизонтальные размеры электрод-инструмента можно рассчитать по формуле

$$L_э^0 = L_{п} + \frac{\Delta_{пL}}{2} - l_{т} \left(\frac{\cos \alpha_{п} + \cos \beta_{п}}{\cos \alpha_{п} \cos \beta_{п}} \right).$$

При наличии дополнительных разрядов между боковыми поверхностями электрод-инструмента и обрабатываемой полости будет иметь место $\alpha_{п} > \alpha_э^0$; $\beta_{п} > \beta_э^0$; $l_{б н\alpha}^0 \neq l_{б н\beta}^0 \neq l_{т}$.

Рис. 123. Схема к расчету размера электрод-инструмента для обработки фасонных полостей с боковыми наклонными поверхностями без учета износа электрод-инструмента



Отсюда горизонтальные размеры электрод-инструмента можно определить из выражения

$$L_э^0 = L_{п} + (\Delta_{пL}/2) - l_{б\alpha} - l_{б\beta}.$$

Расчет размеров электрод-инструмента с учетом его износа. Рассмотрим два случая расчета: с наличием и без наличия дополнительных электрических разрядов между боковыми поверхностями электрод-инструмента и обрабатываемой полости. Каждая точка на рабочем участке боковой поверхности электрод-инструмента, наклоненной под углом $\alpha_э$, начинает подвергаться эрозии с приближением его к обрабатываемой поверхности на расстояние AK (рис. 124), при котором в направлении OA , перпендикулярном к поверхности электрод-инструмента, может быть пробит межэлектродный промежуток с находящимися в нем продуктами эрозии. Аналогичные явления имеют место и на другой боковой поверхности электрод-инструмента, наклоненной под углом $\beta_э$ к вертикали. Расстояния OA и $O'A'$ являются кратчайшими между боковыми поверхностями обрабатываемой полости и соответственно точками A и A' на наклонных поверхностях электрод-инструмента,

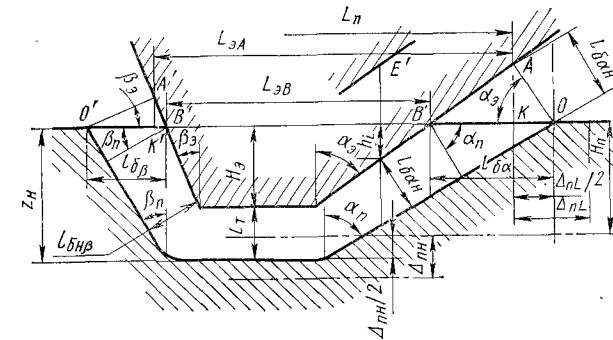


Рис. 124. Схема к расчету размера электрод-инструмента для обработки фасонных полостей с боковыми наклонными поверхностями с учетом износа электрод-инструмента

вступившим в процесс обработки. Точка A находится от горизонтальной плоскости OB обрабатываемой заготовки на расстоянии $AK = l_{\beta\alpha} \cos \alpha_0 \sin \beta_0$, а точка A' — на расстоянии $A'K' = l_{\beta\beta} \cos \beta_0 \sin \beta_0$.

При наличии дополнительных разрядов между электродами горизонтальные размеры электрод-инструмента могут быть определены из следующих выражений.

Горизонтальный размер электрод-инструмента между вертикалями, проходящими через точки A и A' ,

$$L_{\beta A} = L_{\pi} + \frac{\Delta_{\pi L}}{2} - OK - O'K' = L_{\pi} + \frac{\Delta_{\pi L}}{2} - l_{\beta\alpha} \cos^2 \alpha_0 - l_{\beta\beta} \cos^2 \beta_0.$$

Размер между вертикалями, проходящими через точки B и B' ,

$$L_{\beta B} = L_{\pi} + \frac{\Delta_{\pi L}}{2} - l_{\beta\alpha} (1 - \Delta\gamma_0 \cos \alpha_{\pi}) - l_{\beta\beta} (1 - \Delta\gamma_0 \cos \beta_{\pi}).$$

При отсутствии дополнительных разрядов между электродами $l_{\beta\pi\alpha} = l_{\beta\pi\beta} = l_{\pi}$, угол α_0 в конце обработки равен α_{π} . Отсюда

$$L_{\beta A} = L_{\pi} + \frac{\Delta_{\pi L}}{2} - l_{\pi} (\cos \alpha_{\pi} + \cos \beta_{\pi}).$$

Размер $L_{\beta B}$ можно определить из выражения

$$L_{\beta B} = L_{\pi} + \frac{\Delta_{\pi L}}{2} - l_{\pi} \left(2\Delta\gamma_0 + \frac{\cos \alpha_{\pi} + \cos \beta_{\pi}}{\cos \alpha_{\pi} \cos \beta_{\pi}} \right).$$

Вертикальные размеры электрод-инструмента в обоих случаях могут быть определены по формуле (17).

ОБРАБОТКА ПОЛОСТИ НА ОДНОМ РЕЖИМЕ С ПОСТУПАТЕЛЬНЫМ КРУГОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТА

Фасонная полость с боковыми наклонными поверхностями не имеет острых углов. Полость будет обрабатываться одним электрод-инструментом с поступательным круговым движением в горизонтальной плоскости на одном режиме (рис. 125). При такой схеме продукты эрозии легко удаляются из зоны обработки, не вызывая за счет дополнительных разрядов боковых поверхностей значительного искажения профиля обрабатываемой полости и электрод-инструмента.

Исходя из условия $\alpha > \beta$, $l_{\beta\alpha} > l_{\beta\beta}$.

Расчет размеров электрод-инструмента без учета его износа. Вертикальные размеры электрод-инструмента можно определить по формуле (16), а горизонтальные размеры — из выражения

$$L_0^0 = L_{\pi} + (\Delta_{\pi L}/2) - 2e - l_{\beta\alpha} - l_{\beta\beta}.$$

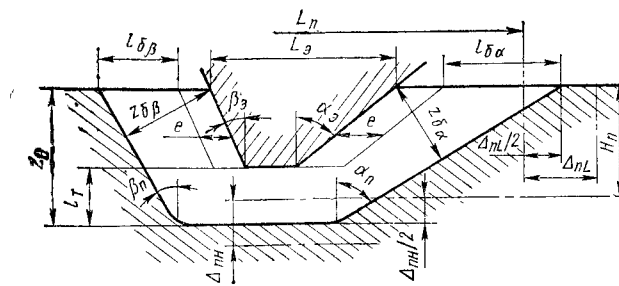


Рис. 125. Схема к расчету размера электрод-инструмента для обработки фасонных полостей с поступательным круговым движением электрод-инструмента на одном режиме

Расчет размеров электрод-инструмента с учетом его износа. Вертикальные размеры рабочей части электрод-инструмента можно определить по формуле (17), а горизонтальные размеры — из выражения

$$L_0 = L_{\pi} + \frac{\Delta_{\pi L}}{2} - (1 - \Delta\gamma_0) (2e + l_{\beta\alpha} + l_{\beta\beta}).$$

ОБРАБОТКА ПОЛОСТИ НА ТРЕХ РЕЖИМАХ С ПОСТУПАТЕЛЬНЫМ КРУГОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТА

Фасонная плоскость с боковыми наклонными поверхностями не имеет острых углов. Схема обработки и расположение электрод-инструмента $l_{\text{чр}}$, $l_{\text{ср}}$, $l_{\text{чс}}$ относительно полости $z_{\text{чр}}$, $z_{\text{ср}}$, $z_{\text{чс}}$, обработанной соответственно на черновом, среднем и чистовом режимах, показаны на рис. 126.

Расчет размеров электрод-инструмента без учета его износа. Вертикальные размеры рабочей части электрод-инструмента можно рассчитать по формуле (18). Поскольку в данном случае $\alpha_0 = \alpha_0$, а $\beta_0 = \beta_0$, то горизонтальные размеры

$$L_0^0 = L_{\pi} + \frac{\Delta_{\pi L}}{2} - 2e_{\text{чр}} + l_{\beta\alpha \text{чр}} - l_{\beta\beta \text{чр}} - (z_{\beta \text{ср}} + z_{\beta \text{чс}}) \left(\frac{\cos \alpha_{\pi} + \cos \beta_{\pi}}{\cos \alpha_{\pi} \cos \beta_{\pi}} \right).$$

Расчет размеров электрод-инструмента с учетом его износа.

Искажение углов α_0 и β_0 в процессе обработки не оказывает влияния на размер L_0 . Поэтому при расчете можно использовать вместо α_0 и β_0 углы α_{π} и β_{π} .

Вертикальные размеры рабочей части электрод-инструмента

$$H_0 = (1 + \Delta\gamma_0 \text{чр}) z_{\text{чр}} + (1 + \Delta\gamma_0 \text{ср}) z_{\text{ср}} + (1 + \Delta\gamma_0 \text{чс}) z_{\text{чс}} - l_{\pi \text{чс}}.$$

Отсюда

$$L_0 = L_{\pi} + \frac{\Delta_{\pi L}}{2} - (1 + \Delta\gamma_0 \text{чс}) z_{\beta \text{чс}} \left(\frac{\cos \alpha_{\pi} + \cos \beta_{\pi}}{\cos \alpha_{\pi} \cos \beta_{\pi}} \right) -$$

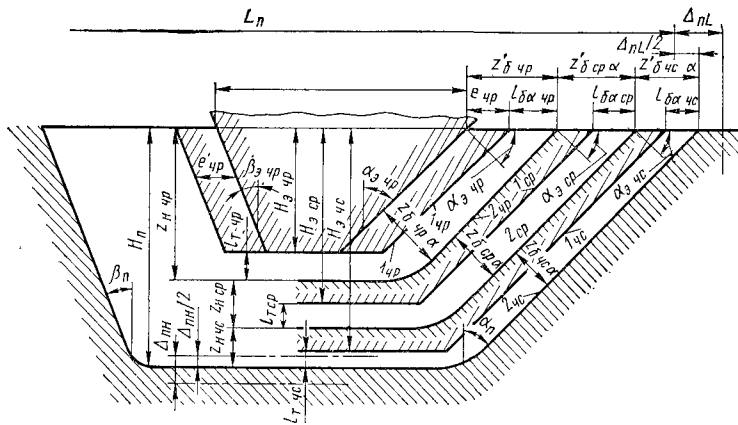


Рис. 126. Схема к расчету размера электрод-инструмента для обработки фасонных полостей с поступательным круговым движением электрод-инструмента на трех режимах

$$-(1 - \Delta\gamma_{\alpha \text{ ср}}) z_{\beta \text{ ср}} \left(\frac{\cos \alpha_{\text{п}} + \cos \beta_{\text{п}}}{\cos \alpha_{\text{п}} \cos \beta_{\text{п}}} \right) - (1 - \Delta\gamma_{\alpha \text{ чр}}) (e_{\text{чр}} + l_{\beta \alpha \text{ чр}}) - (1 - \Delta\gamma_{\alpha \text{ чр}}) (e_{\text{чр}} - l_{\beta \beta \text{ чр}}).$$

Для определения горизонтальных размеров в любом сечении рабочего участка электрод-инструмента необходимо рассчитать углы α_{α} и β_{α} в зависимости от $\alpha_{\text{п}}$ и $\beta_{\text{п}}$ (см. след. параграф).

6. РАСЧЕТ УГЛА НАКЛОНА БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТА

Электроэрозионным способом обрабатываются разнообразными фасонные конические отверстия и полости с различными углами наклона боковых поверхностей электрод-инструмента к направлению его перемещения. Точных методов расчета этих углов при обработке полостей методом прямого копирования не существует в связи с большим количеством факторов, влияющих на процесс удаления металла с заготовки и на износ электрод-инструмента. Поэтому, принимая многие факторы постоянными, приведем методы расчета наклона боковых поверхностей электрод-инструмента для ряда реальных случаев электроэрозионной обработки. При выполнении расчета принято, что боковые поверхности электрод-инструмента охватываются соответствующими поверхностями обрабатываемого отверстия, а рассчитываемые углы находятся между вертикалью и боковыми поверхностями отверстия ($\alpha_{\text{п}}$) и электрод-инструмента (α_{α}). Износ электрод-инструмента прямо пропорционален толщине снимаемого слоя при обработке на данном режиме.

Определим угол α_{α} в зависимости от угла $\alpha_{\text{п}}$ для ряда частных случаев. Очевидно, если электрод-инструмент не изнашивается в процессе обработки и между боковыми поверхностями обрабатываемого отверстия и электрод-инструмента нет дополнительных разрядов, вызываемых наличием продуктов эрозии, то $\alpha_{\alpha} = \alpha_{\text{п}}$. Однако на практике, как правило, имеют место указанные дополнительные разряды. Допуская, что электрод-инструмент в процессе обработки не изнашивается, для данного случая расчетная схема с расположением электрод-инструмента 1 и заготовки 2 после окончания обработки будет иметь вид, представленный на рис. 127.

В процессе обработки с заготовки удаляется слой $z_{\text{н}}$. Между торцовыми поверхностями заготовки и электрод-инструмента имеется зазор $l_{\text{т}}$, а между боковыми поверхностями в сечении AO — зазор l_{β} . Из построений следует, что $KM = z_{\text{н}} - l_{\text{т}}$. Из прямоугольных треугольников OBG , AOD , KZD и $KЖГ$ можно определить

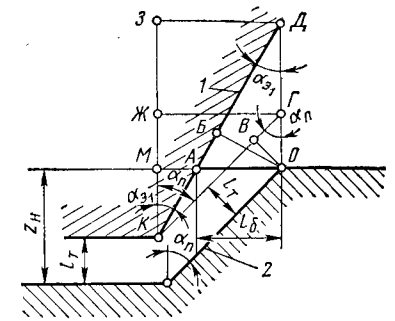


Рис. 127. Расчетная схема для определения угла $\alpha_{\alpha 1}$ без учета износа электрод-инструмента и при наличии дополнительных разрядов между его боковыми поверхностями и обрабатываемой полостью

$$OG = MЖ = l_{\text{т}} (\sin \alpha_{\text{п}})^{-1}; \quad DO = l_{\beta} (\text{tg } \alpha_{\alpha 1})^{-1};$$

$$ЗД = \left(z_{\text{н}} - l_{\text{т}} + \frac{l_{\beta}}{\text{tg } \alpha_{\alpha 1}} \right) \text{tg } \alpha_{\alpha 1}; \quad ЖГ = \left(z_{\text{н}} - l_{\text{т}} + \frac{l_{\text{т}}}{\sin \alpha_{\text{п}}} \right) \text{tg } \alpha_{\text{п}}.$$

Так как $ЖГ = ЗД$, то

$$\text{tg } \alpha_{\alpha 1} = \frac{\left[z_{\text{н}} - l_{\text{т}} \left(1 - \frac{1}{\sin \alpha_{\text{п}}} \right) \right] \text{tg } \alpha_{\text{п}} - l_{\beta}}{z_{\text{н}} - l_{\text{т}}}. \quad (19)$$

Учитывая, что по мере углубления электрод-инструмента в обрабатываемую заготовку, величина l_{β} стабилизируется, при некотором значении припуска $z_{\text{н}}$ можно допустить, что

$$\frac{l_{\beta}}{l_{\text{т}}} = k_l = \text{const} \quad \text{и} \quad \frac{z_{\text{н}}}{l_{\text{т}}} = k_z.$$

С учетом изложенного, выражение (19) после ряда преобразований можно записать в виде

$$\text{tg } \alpha_{\alpha 1} = \frac{(k_z - 1) \sin \alpha_{\text{п}} + 1 - k_l \cos \alpha_{\text{п}}}{(k_z - 1) \cos \alpha_{\text{п}}}. \quad (20)$$

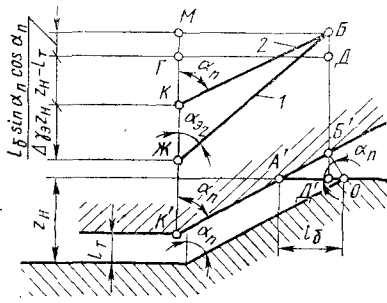


Рис. 128. Расчетная схема для определения α_{n2} с учетом износа электрод-инструмента и без дополнительных разрядов между его боковыми поверхностями и обрабатываемой полостью

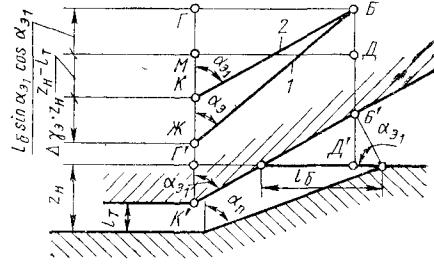


Рис. 129. Расчетная схема для определения α_n с учетом износа электрод-инструмента и с дополнительными разрядами между его боковыми поверхностями и обрабатываемой полостью

Прежде чем перейти к рассмотрению общего случая, необходимо определить угол α_{n2} между вертикалью и боковой поверхностью электрод-инструмента, изнашивающегося в процессе обработки. При этом допустим, что дополнительных разрядов между боковыми поверхностями обрабатываемой полости и электрод-инструмента, вызываемых наличием продуктов эрозии, нет (рис. 128).

Если одинаковые отверстия обрабатывать электрод-инструментами, имеющими различный износ, то при правильном расчете электродов они независимо от величины износа в конце обработки будут занимать по отношению к обрабатываемому отверстию одно и то же положение, т. е. боковые поверхности электрод-инструментов будут проходить через линию $K'B'$. При этом точка B' является границей раздела, ниже которой (по линии $K'B'$) боковая поверхность электрод-инструмента участвовала в процессе обработки, а выше — не участвовала. Таким образом через точку B' должны проходить боковые поверхности изнашиваемых ($ЖБ$) и не изнашиваемых ($КБ$) электрод-инструментов. Учитывая, что $KЖ = \Delta\gamma_n z_n$, $KГ = z_n - l_T$, $MГ = B'D'$ и $A'O = l_6$, из прямоугольных треугольников $A'B'O$ и $OD'B'$ определим значение $MГ = l_6 \cos \alpha_n \sin \alpha_n$, а из треугольников $ЖМБ$ и $КМБ$ — величину $МБ$:

$$\begin{aligned} MB &= [(1 + \Delta\gamma_n) z_n - l_T + l_6 \cos \alpha_n \sin \alpha_n] \operatorname{tg} \alpha_{n2} = \\ &= (z_n - l_T + l_6 \cos \alpha_n \sin \alpha_n) \operatorname{tg} \alpha_n. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\operatorname{tg} \alpha_{n2} = \frac{(z_n - l_T + l_6 \cos \alpha_n \sin \alpha_n) \operatorname{tg} \alpha_n}{(1 + \Delta\gamma_n) z_n - l_T + l_6 \cos \alpha_n \sin \alpha_n}.$$

Учтя, что $k_l = l_6/l_T$ и $k_z = z_n/l_T$, можно записать

$$\operatorname{tg} \alpha_{n2} = \frac{(k_z - 1 + k_l \sin \alpha_n \cos \alpha_n) \operatorname{tg} \alpha_n}{(1 + \Delta\gamma_n) k_z + k_l \sin \alpha_n \cos \alpha_n}.$$

При наличии износа электрод-инструмента и дополнительных разрядов между боковыми поверхностями обрабатываемого отверстия и электрода, как и в рассмотренном выше случае, при получении отверстия заданного размера, рабочие участки боковых поверхностей электрод-инструментов независимо от величины их износа должны занимать в конце обработки одно и то же положение относительно обрабатываемых поверхностей заготовки и проходить, в частности, по линии $K'B'$ (рис. 129). При этом, учитывая, что OB' является кратчайшим расстоянием от точки O , которая обрабатывается в последний момент времени, точка B' является границей раздела боковой поверхности электрод-инструмента на участвующую (по линии $K'B'$ ниже точки B') и не участвующую в процессе обработки (по линии $K'B'$ выше точки B'). Таким образом, через точку B' должны проходить боковые поверхности как изнашиваемых (линия 1), так и неизнашиваемых (линия 2) электрод-инструментов.

Учитывая, что $ЖК = \Delta\gamma_n z_n$, $ГМ = БД = B'D'$ и $КГ = КМ + МГ = z_n - l_T + l_6 \sin \alpha_{n1} \cos \alpha_{n1}$, определим $ГБ$ из треугольников $КГБ$ и $ЖГБ$:

$$\begin{aligned} GB &= (z_n - l_T + l_6 \sin \alpha_{n1} \cos \alpha_{n1}) \operatorname{tg} \alpha_{n1} = \\ &= [(1 + \Delta\gamma_n) z_n - l_T + l_6 \sin \alpha_{n1} \cos \alpha_{n1}] \operatorname{tg} \alpha_{n1}. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{(z_n - l_T + l_6 \sin \alpha_{n1} \cos \alpha_{n1}) \operatorname{tg} \alpha_{n1}}{(1 + \Delta\gamma_n) z_n - l_T + l_6 \sin \alpha_{n1} \cos \alpha_{n1}}.$$

Учтя, что $k_z = z_n/l_T$ и $k_l = l_6/l_T$, имеем

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{(k_z - 1 + k_l \sin \alpha_{n1} \cos \alpha_{n1}) \operatorname{tg} \alpha_{n1}}{(1 + \Delta\gamma_n) k_z - 1 + k_l \sin \alpha_{n1} \cos \alpha_{n1}}.$$

При этом α_{n1} определяется из выражения (20).

Приложение
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫЕ КОПИРОВАЛЬНО-ПРОШИВОЧНЫЕ СТАНКИ

Модель, завод-изготовитель	Назначение	Краткая технологическая характеристика					Примечание
		Размеры стола, мм	Наибольшая высота заготовки, мм	Производительность обработки, мм ³ /мин	Шероховатость поверхности обработанной на чистовых режимах, Rz, мкм	Точность обработки, мм: сквозных отверстий/фасонных поверхностей	
4Г721, универсальный Троицкий станкостроительный	Обработка сложнопровфильных отверстий типа щелей, фильер и матриц, вырубных штампов, в том числе твердосплавных	200×360	100	250	4—10	0,02/0,05	
4Д721А, координатный высокой точности. Каунасский станкостроительный им. Дзержинского	Обработка сложнопровфильных полостей и отверстий в деталях из труднообрабатываемых токопроводящих материалов	200×360	120	350	2—3	0,01÷0,02/0,05	Встроенный привод вращения электрод-инструмента
4Д722А, универсальный особо высокой точности. Каунасский станкостроительный им. Дзержинского	Обработка фасонных полостей сложнопровфильных отверстий пресс-форм и кокилей, фасонных деталей из труднообрабатываемых сплавов, твердосплавных штампов и фильер	400×630	200	500	4—10	0,01÷0,02/0,07	—

Продолжение

Модель, завод-изготовитель	Назначение	Краткая технологическая характеристика					Примечание
		Размеры стола, мм	Наибольшая высота заготовки, мм	Производительность обработки, мм ³ /мин	Шероховатость поверхности обработанной на чистовых режимах, Rz, мкм	Точность обработки, мм: сквозных отверстий/фасонных поверхностей	
4Д722АФВ, координатный особо высокой точности с адаптивным и программным управлением, Каунасский станкостроительный им. Дзержинского	Обработка сложнопровфильных полостей и отверстий в деталях из труднообрабатываемых токопроводящих материалов	400×630	200	500	4—10	0,01÷0,02/0,07	Автоматическая оптимизация режимов обработки
4Д722АФТ, координатный особо высокой точности с цифровой индикацией. Каунасский станкостроительный им. Дзержинского	То же	400×630	200	500	4—10	0,01÷0,02/0,7	Цифровая индикация отсчета глубины обработки, точная очистка рабочей среды
4Д722В, универсальный повышенной точности. Каунасский станкостроительный им. Дзержинского	Обработка сложнопровфильных отверстий пресс-форм, кокилей, фасонных деталей из труднообрабатываемых сплавов, твердосплавных штампов и фильер	400×630	200	500	4—10	0,15÷0,02/0,07	—

Модель, завод-изготовитель	Назначение	Краткая технологическая характеристика					Примечание
		Размеры стола, мм	Наибольшая высота изделия, мм	Производительность обработки, мм ³ /мин	Переховатость поверхности обработанной на чистовых режимах, Rz, мкм	Точность обработки, мм скважных отверстий/фасонных поверхностей	
4E723, универсальный, Троицкий станкостроительный завод	Обработка ковочных штампов и пресс-форм, кокилей, фасонных деталей из труднообрабатываемых сплавов, про-резка фасонных отверстий, профилирование твердосплавных инструментов и фильер	400×630	380	4000	7—20	0,02 ÷ ÷0,03/0,07 ÷ ÷0,10	Оснащен двумя генераторами: 250 А, 3 кГц и 63 А, 440 кГц
Модификации на базе станка 4E723, Троицкий станкостроительный завод	1. Станок с двухконтурным генератором ШГИ-63-44/2 на ток силой до 125 А и частотой до 44 кГц 2. Станок с адаптивным управлением	400×630	380	1100	20	0,02 ÷ ÷0,03/0,07 ÷ ÷0,10	— Повышена степень автоматизации управления

Продолжение

Модель, завод-изготовитель	Назначение	Краткая технологическая характеристика					Примечание
		Размеры стола, мм	Наибольшая высота изделия, мм	Производительность обработки, мм ³ /мин	Переховатость поверхности обработанной на чистовых режимах, Rz, мкм	Точность обработки скважных отверстий/фасонных поверхностей	
4E724, универсальный, Троицкий станкостроительный завод	Обработка ковочных штампов, фасонных деталей из труднообрабатываемых сплавов, прорезка фасонных отверстий	800×1200	800*	7000	7—20	—/0,15 ÷ 0,20	—
4726, универсальный, электромпульсный, Одесский радиально-сверлильный станок	Обработка крупных деталей с фасонными поверхностями. Форм для литья на резину, пластмассу, ковочных штампов, лопаток турбин и др.	1250×2000	700	10 000	10—40	—/0,5 ÷ 0,8	—

* Высота от торца шпинделя до стола.

Электроэрозионные станки для профильной вырезки
(Кировоканского завода прецизионных станков)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Модель	Краткая технологическая характеристика			
	Наибольший размер детали, мм	Размер обрабатываемого контура, мм	Производительность обработки, мм ² /мин**	Точность обработки, мм
4531	160×120×30	120×85	10	0,01—0,015
4531П, с ПУ	160×120×30	120×85	10	0,01—0,015
4531ФЗ, с ПУ	120×75×40	100×60	18/11	0,01
4532, с ПУ	320×20×60	200×125	10	0,02—0,03
4532ФЗ, с СПКУ	250×160×75	200×125	35/18	0,02—0,03
4А532ФЗ, с СПКУ	75***	200×125	35/18	0,02—0,03

Примечание. Назначение станков — вырезка электрод-проволокой деталей, вырубных штампов, матриц, шаблонов и т. д. Шероховатость обработанной поверхности $Rz = 4 \div 10$ мкм. На станке мод. 4А532ФЗ вырезка производится проволокой диаметром 0,05—0,3 мм, обеспечивается коррекция эквидистанты, масштабирование и т. д.

* ПУ — программное управление, СПКУ — система программного копировального управления.

** В числителе — для стали, в знаменателе — для твердого сплава.

*** Высота заготовки.

Троицкий станкостроительный завод выпускает универсальные переносные электроэрозионные станки мод. 4Б611, предназначенные для извлечения остатков сломанного инструмента из крупногабаритных изделий (основное назначение), прошивки отверстий в крупногабаритных изделиях из труднообрабатываемых материалов (например, из закаленных сталей). Размер стола станка 400×630 мм, диаметр прошиваемых отверстий 2—25 мм, производительность (скорость углубления) — до 2—3 мм/мин, шероховатость обработанной поверхности $Rz = 80 \div 320$ мкм.

1. Авраменко В. Е. Фазовый анализ поверхностного слоя инструментальных сталей, образованного электроискровой обработкой непрофилированным электродом. В кн.: Физико-механические и эксплуатационные свойства инструментальных и конструкционных материалов. Вып. 3. Красноярск, 1974.

2. Александров В. П. Исследование технологических характеристик электроэрозионной обработки жаропрочных материалов. М.: Наука, 1964.

3. Арменский Е. В., Золотых Б. Н., Фотеев Н. К. Основные направления развития электрических методов обработки за рубежом. — Электронная обработка материалов, 1975, № 4.

4. Бельский Е. И. Стойкость кузнечных штампов. Минск: Наука и техника, 1975.

5. Володин Е. А. Технология электроискровой обработки штампов. — В кн.: Электрические методы обработки металлов/Под ред. Е. Я. Улицкого. М.: Машгиз, 1951.

6. Геворкян Г. Г. Закономерности искажения переходных участков электрод-инструмента при электроимпульсной обработке. — В кн.: Электрофизические и электрохимические методы обработки. Вып. 5. М.: НИИМАШ, 1968.

7. Геллер Ю. А. Инструментальные стали. М.: Metallurgy, 1975.

8. Головин Г. Ф. Остаточные напряжения, прочность и деформации при поверхностной закалке токами высокой частоты. Л.: Машиностроение, 1973.

9. Демкин Н. Б. Контактное шлифование шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970.

10. Думпе В. Э. Электроэрозионная обработка деталей. Киев: Техника, 1975.

11. Зингерман А. С., Каллан Д. А. Зависимость электрической эрозии катода от длины разрядного канала. — ЖТФ, т. XXIX, 1959, № 7.

12. Золотых Б. Н. Возможности использования ЭВМ для автоматизации технологических процессов изготовления сложнопольных деталей на электроэрозионных станках. — Электронная обработка материалов, 1978, № 2.

13. Золотых Б. Н. Влияние длительности импульса на электрическую эрозию металлов. — Электричество, 1950, № 8.

14. Золотых Б. Н. О физической природе электроискровой обработки металлов. — В кн.: Электроискровая обработка металлов. Вып. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1957.

15. Золотых Б. Н. Связь чистоты поверхности после электроэрозионной обработки с параметрами единичных лунок. — Вестник машиностроения, 1959, № 10.

16. Золотых Б. Н. О расчете технологических характеристик процесса размерной электроискровой обработки токопроводящих материалов. — В кн.: Проблемы электрической обработки материалов. М.: Изд-во АН СССР, 1960.

17. Золотых Б. Н., Коробова И. П. Выбор оптимальных режимов электроискровой обработки металлокерамических твердых сплавов. — В кн.: Электроискровая обработка металлов. Вып. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1960.

18. Золотых Б. Н. Основные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде. Автореф. диссер. на соискание ученой степени д-ра техн. наук. М.: МИЭМ, 1968.

19. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.: Энергия, 1975.

20. Комбалов В. С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. М.: Наука, 1974.

21. Красюк Б. А. Выявление строения протравливаемых поверхностных слоев на образцах железных сплавов. — Заводская лаборатория, Т. 22. 1956, № 5.

22. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977.
23. Ляндон Ю. Н. Функциональная взаимозаменяемость в машиностроении. М.: Машиностроение, 1967.
24. Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И. Физика искрового способа обработки металлов. М.: ЦБТИ Министерство электропромышленности СССР, 1946.
25. Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И. Изыскание новых применений электричества. — Электронная обработка материалов, 1977, № 5.
26. Май Л. В., Мещеряков Г. Н. Влияние поверхностно-активных межэлектродных сред на эффективность электроэрозионного разрушения при единичных разрядах. — Электронная обработка материалов, 1979, № 1.
27. Могилевский И. З., Чаповая С. А. Металлографические исследования поверхности стали после электроискровой обработки. — В кн.: Электроискровая обработка металлов. Вып. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1957.
28. Новые технологические процессы электрофизико-химической обработки. Руководящие материалы. М.: ЭНИМС, НИИМАШ, 1973.
29. Палатник Л. С. Неравновесные и квазиравновесные состояния в сплавах. Автореф. диссер. на соискание ученой степени д-ра техн. наук. Харьковский государственный университет, 1952.
30. Петраш Л. В. Закалочные среды. М.: Машиностроение, 1959.
31. Полоцкий В. Е. Парообразование в рабочей зоне и его роль в процессе электроэрозионной обработки. — Электрофизические и электрохимические методы обработки, 1968, № 5.
32. Писаревский М. М. Влияние электроэрозионного процесса на свойства обрабатываемых материалов. — Котлотурбиностроение, 1950, № 5.
33. Смоленцев В. П. Изготовление инструмента непрофилированным электродом. М.: Машиностроение, 1967.
34. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 1. М.: Машиностроение, 1973.
35. Ставицкий Б. И. Электроискровое изготовление прецизионных деталей электровакуумных приборов. — В кн.: Электроискровая обработка металлов. Вып. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
36. Толстая М. А. и др. Влияние электроэрозионной обработки на щелевую коррозию инструментальных сталей. — Защита металлов, Т. XIV, 1978, № 5.
37. Тананко И. А., Бобух Ж. С., Михайлуца Э. Б. Прогрессивная технология обработки металлов. Вестник Харьковского политехнического института, 1974, № 89.
38. Фотеев Н. К. Геометрия шероховатости поверхности, обработанной электроэрозионным способом. — Электронная обработка материалов, 1975, № 5.
39. Фотеев Н. К. Влияние состояния межэлектродной среды на производительность электроискрового процесса, износ обрабатываемого электрода и чистоту получаемой поверхности при изготовлении отверстий. — В кн.: Проблемы электрической обработки материалов. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
40. Фотеев Н. К. Высококачественные штампы. М.: Машиностроение, 1965.
41. Характеристики микрогеометрии, определяющие контактное взаимодействие шероховатых поверхностей (методика определения). М.: НИИМАШ, 1973.
42. Четвериков С. С., Фотеев Н. К. Электроискровая обработка режущих элементов твердосплавных вырубных штампов. — В кн.: Электроискровая обработка металлов. Вып. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
43. Шнейдер Ю. Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства. Л.: Машиностроение, 1972.
44. Электроимпульсная обработка металлов/А. Л. Лившиц, А. Т. Кравец, И. С. Рогачев, А. Б. Сосенко. М.: Машиностроение, 1967.
45. Якобсон Г. М., Горский В. А. Расчет теплового баланса в электроэрозионных станках. — В кн.: Электрофизические и электрохимические методы обработки. Вып. 2. М.: НИИМАШ, 1969.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава I. <i>Некоторые особенности формирования поверхности в процессе электроэрозионной обработки</i>	5
1. Сведения о единичной лунке	5
2. Систематическая и случайная составляющие профиля шероховатости	10
3. Стадии нагрева и охлаждения поверхности	12
Глава II. <i>Параметры шероховатости поверхности</i>	15
1. Схема образования шероховатости	16
2. Расчет основных параметров шероховатости	19
3. Экспериментальное исследование параметров шероховатости	29
Глава III. <i>Структура и свойства поверхностного слоя</i>	35
1. Краткая характеристика зон поверхностного слоя	35
2. Микротвердость поверхностного слоя	45
3. Внутренние напряжения в поверхностном слое	48
Глава IV. <i>Обоснования требований к качеству рабочих поверхностей детали</i>	52
1. Ковочные штампы	53
2. Раскатные валки	60
3. Вырубные штампы	63
4. Пресс-формы для прессования твердосплавных пластин	69
5. Общие выводы	71
Глава V. <i>Особенности технологических процессов электроэрозионной обработки</i>	74
1. Влияние температуры электродов и рабочей жидкости на величину остаточных внутренних напряжений	75
2. Производительность электроэрозионной обработки	78
3. Увеличение радиуса скругления выступа профиля шероховатости	85
4. Влияние скорости перемещения электродов на качество обрабатываемой поверхности	91
Глава VI. <i>Точность электроэрозионной обработки</i>	95
1. Суммарная погрешность	95
2. Базирование заготовок и электрод-инструментов	96
3. Погрешность от износа электрод-инструмента	99
4. Влияние нагрева электродов на образование погрешностей	105
5. Погрешность размера межэлектродного зазора	107
Глава VII. <i>Изготовление типовых деталей</i>	111
1. Станки	111
2. Обработка полостей ковочных штампов	115

3. Обработка валов	120
4. Обработка матриц для прессования	123
5. Некоторые особенности расчета припуска	126
Глава VIII. Обработка сопрягаемых поверхностей	132
1. Обработка фасонных поверхностей на валах	132
2. Обработка сопрягаемых деталей вырубных штампов	135
Глава IX. Расчет размеров электрод-инструментов	158
1. Исходные сведения	158
2. Обработка отверстий методом прямого копирования	162
3. Обработка простых полостей	164
4. Обработка полостей с поступательным круговым движением электрод-инструмента	167
5. Обработка фасонных полостей с боковыми наклонными поверхностями	168
6. Расчет угла наклона боковой поверхности электрод-инструмента	172
Приложение	176
Список литературы	181

ИБ № 1892

Николай Константинович Фотеев

ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Редактор *С. И. Булатов*

Художественный редактор *И. К. Капралова*

Технический редактор *Н. В. Балашова*

Корректор *А. П. Озерова*

Сдано в набор 02.06.80. Подписано в печать 26.08.80. Т-13338.
 Формат 60×90^{1/16}. Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная.
 Печать высокая. Усл. печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. 11,95. Тираж 8000 экз.
 Заказ 1541. Цена 60 к.

Издательство «Машиностроение», 107076, Москва, Стромьинский пер., 4.

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома

при Государственном комитете СССР

по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.

109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.