

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. А.Н. ТУПОЛЕВА-КАИ»

И.И. ХАФИЗОВ, А.Р. ЗАКИРОВА,  
З.Б. САДЫКОВ

МАЛООТХОДНОЕ ЧИСТОВОЕ  
РАЗДЕЛЕНИЕ ДЕФИЦИТНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ КОМБИНИРОВАННЫМ  
МЕТОДОМ

*Монография*

Казань 2014

УДК 621.9.02.001.2

Ха 12

*Рецензенты:*

доктор технических наук, профессор В.А. Смирнов  
(Татарский региональный центр по сертификации  
и научно-технической экспертизе);

доктор технических наук, профессор А.А. Балоев  
(Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева-КАИ);

доктор технических наук, профессор Н.Ф. Кашапов  
(Казанский (Приволжский) федеральный университет)

**Хафизов И.И.**

Ха 12 Малоотходное чистовое разделение дефицитных материалов комбинированным методом: монография / И.И. Хафизов, А.Р. Закирова, З.Б. Садыков. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. – 136 с.

ISBN 987-5-7579-1945-4

Изложены теоретические и прикладные основы разработки и применения малоотходного чистового разделения дефицитных материалов электроалмазным методом. Описаны методы и средства управления процессом электроалмазного разделения тонким нежестким дисковым инструментом. Приведены технологические режимы обработки и описания оригинального оборудования. Монография адресована работникам НИИ и КБ специализированных заводов, преподавателям, аспирантам, проектировщикам и изготовителям, использующим электроалмазное разделение заготовок и будет способствовать повышению квалификации инженерно-технических работников, качеству технологической подготовки студентов.

УДК 621.9.02.001.2

© Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014

© И.И. Хафизов, А.Р. Закирова,

З.Б. Садыков, 2014

ISBN 987-5-7579-1945-4

## **ВВЕДЕНИЕ**

Заготовительные операции по разделению всех видов материалов включают ручное и машинное разрезание на оборудовании различного назначения. Для этого используются как традиционные способы (прессы, металлорежущее оборудование с металлическим и абразивным инструментом и др.) так и новые виды обработки (лазерная и плазменная резка, электроэрозионное разделение, ультразвуковые процессы). В машиностроении имеется достоверная информация об освоенных методах, их предельных возможностях и недостатках. С увеличением доли затрат на материалы возникла проблема изыскания новых видов разделения материалов, особенно это коснулось дефицитных и дорогих сплавов типа драгоценных металлов, вольфрама, магнитных сплавов, хрупких полупроводников, где выход годных деталей после обработки становился менее половины исходной массы, а дефекты, вносимые в поверхностный слой при разрезке, сохранялись в изделии и снижали его характеристики.

Авторы выбрали в качестве объекта исследований две группы токопроводящих материалов: вязкие (нержавеющие стали и сплавы титана), хрупкие (вольфрам, магнитные сплавы и другие), которые имеют высокую стоимость и весьма дефицитны. В мировой практике разделение таких материалов в основном выполняют армированными кругами, электроэрозией, ультразвуковым методом, лазером, плазмой. Однако, такие методы не позволяют обеспечить требуемые достаточно высокие требования по точности,

качеству поверхностного слоя, производительности, снижение потерь материала и особенно по достижению точности по физическим параметрам. Кроме того большинство применяемых методов вызывает загрязнение окружающей среды (пыль при использовании абразива и др.)

Совмещение различных воздействий на объект обработки позволяет спроектировать комбинированные методы, в частности электроабразивный (электроалмазный). Особенности электроплазменной резки являются высокая производительность при минимальной ширине, менее одного миллиметра и глубины измененного слоя обработанной поверхности. Эти методы применяются для резки при получении заготовок с последующей обработкой, которая в ряде случаев (изготовление деталей приборов, радиотехники, средств управления) нежелательна, так как приводит к неоправданным потерям материала, вторичным погрешностям и дефектам, резко повышает стоимость изделий. Установление однозначных связей между свойствами обрабатываемых материалов, сочетанием воздействий комбинированного процесса позволяет создать современное автоматизированное оборудование с управлением механической, химической, эрозионной составляющей в едином процессе, обеспечивающим получение после разделения материалов готовых деталей с погрешностью не выше 30 мкм и с шероховатостью не выше 0,32 мкм. При этом устраняются негативные воздействия на окружающую среду и до 2 раз ускоряется цикл изготовления деталей.

Использование подобных процессов ускоряет создание новых конкурентоспособных изделий, расширяет технологические возможности производства, способствует снижению дефицита и затрат на материалы. Это актуально для современного машиностроения и отвечает мировым требованиям к новой продукции.

Однако, используемый в данном процессе тонкий (толщиной 0,3 – 0,4 мм) нежесткий дисковый инструмент создает проблемы,

связанные с нестабильностью сохранения своей формы и положения относительно разрезаемой заготовки.

В данной монографии рассматриваются ряд средств и методов управления, обеспечивающих стабильность положения и формы нежесткого дискового режущего инструмента до вхождения его в тело заготовки и в процессе электроалмазного резания.

Разработанные и запатентованные средства и методы управления стабильностью формы и положения нежесткого дискового инструмента использованы при создании оригинальных станков модульной конструкции для электроалмазной обработки модели СЭР-902 и СЭР-902МП.

Технологические процессы и оборудования внедрены на промышленных предприятиях России, в том числе на заводах Казани, Перми, Воронежа и других.

# Глава 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ С НАЛОЖЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ МАЛОУТХОДНОМ РАЗДЕЛЕНИИ МАТЕРИАЛОВ

## 1.1. Способы малоотходного разделения материалов

### 1.1.1. Основные схемы

Существует несколько схем разделения материалов с наложением электрического поля.

1. Электрохимическая обработка с неподвижными электродами. По этой схеме (рис. 1.1) разделяют тонкие листовые материалы, наносят информацию (порядковые номера, шифры изделий и др.), удаляют заусенцы, скругляют острые кромки. Требуемая форма углубления или прорезы получаются при нанесении на электроды слоя диэлектрика 3, на необрабатываемые поверхности заготовки.

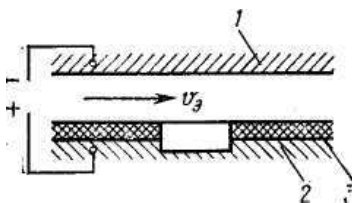


Рис. 1.1. Разделение листовых материалов при электротермической обработке с неподвижными электродами

Электрод-инструмент 1 не перемещается к обрабатываемой поверхности – межэлектродный зазор по мере съема металла с за-

готовки 2 возрастает, а скорость  $v_a$  прокатки электролита снижается. Процесс будет неустановившимся с нестационарным по времени режимом обработки. Это резко усложняет расчеты технологических параметров, регулирование и управление процессом.

Таким методом производят разрезание не только по прямолинейному, но и по сложному криволинейному контуру реза, как на рис. 1.2.

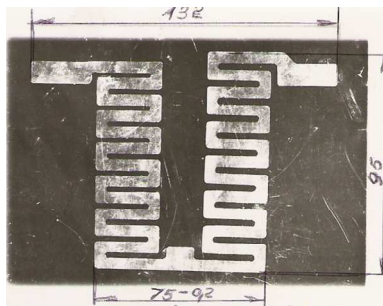


Рис. 1.2. Нагревательный элемент из стали 12x18 Н9Т толщиной 0,1 мм

Продолжительность электрохимической обработки зависит от толщины разрезаемой заготовки, например при разрезании любого сложного контура реза заготовок из стали 12x18H9Т толщиной 0,1 мм. Составляет около 100 секунд, при следующих режимах электрохимической обработки: напряжение на электродах – 12В, плотность тока 10 – 12 А/см<sup>2</sup>, давление электролита на входе в зону вырезания 0,5 – 0,8 кгс/см<sup>2</sup>.

Данный способ разрезания заготовок экономически эффективен при изготовлении деталей толщиной до 0,1 мм, независимо от объема выпуска изделий, а деталей толщиной 0,3 – 0,5 мм в условиях единичного и мелкосерийного производства.

Кроме того, процесс разделения не позволяет разрезать детали толщиной более 0,5 мм (при односторонней резке). При этом погрешности обработки возрастают с увеличением толщины заготовки и делают разрезание этим методом круглых заготовок не перспективным.

2. Известен способ разделения материалов *струйным методом*. Электрод-инструмент состоит из токоподвода *1* (рис. 1.3), омываемого потоком электролита.

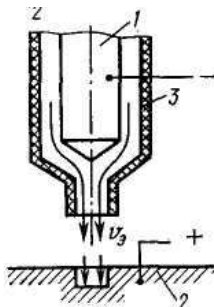


Рис. 1.3. Схема струйного метода разделения материалов

Токоподвод находится внутри корпуса *3* из изоляционного материала. Электролит создает токопроводящий канал между токоподводом *1* и заготовкой *2*. В месте контакта жидкости с обрабатываемой поверхностью материал заготовки растворяется и образуется углубление. По мере увеличения глубины отверстия корпус *3* сближают с заготовкой *2*. Процесс идет достаточно быстро только при высоких напряжениях (до нескольких сотен вольт). Так вырезают контуры деталей сложной формы. При вырезании заготовки из сплава ЖС-6У с рабочим напряжением на электродах 800 В, давление электролита 20 %  $H_2SO_4$ ,  $P_{эл} = 10$  кгс/мм<sup>2</sup>, диаметрами токоподводящего стержня  $d_{эл} = 0,3$  мм и  $d_{кап} = 0,5$  мм, расстоянием между концом электрода и капилляром  $l_{11} = 5$  мм, получили ширину прореза на заготовке в пределах 0,7 мм с точность  $A = 0,1$  мм. Этот метод не пригоден для разделения материалов толщиной более 0,3 мм и далее нами не рассматривается.

2. Разрезание профильным [23] или непрофилированным инструментом включает разделение заготовки на части – отрезание – и получение непрямолинейного контура – вырезание, которое выполняется только непрофилированным электродом-инструментом.



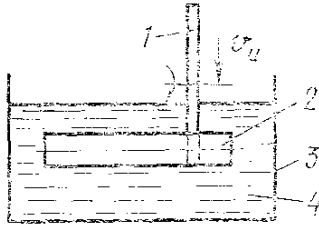


Рис. 1.4. Схема электроконтактного разрезания материалов в жидкой среде

Профильный электрод-инструмент *1* при разрезании деталей (рис. 1.4) может быть выполнен в форме диска или пластины. Его перемещают к заготовке *2* со скоростью  $v_n$  и в плоскости его вращения вдоль детали. Обработка выполняется в ванне *3* с диэлектрической жидкостью *4*. Если разрезание выполняется пластиной с одним поступательным перемещением ее к заготовке, то это будет прошивание.

В случае использования непрофилированного электрода (рис. 1.5) инструмент *1* выполняют в форме круглой проволоки диаметром 0,02 ... 0,3 мм или стержня, которые могут перемещаться в различных направлениях со скоростью  $v_n$  и в любой части заготовки *2*. Для устранения влияния износа электрода-инструмента на точность прорезаемых пазов проволоку или стержень перемещают (обычно перематыванием) вдоль оси со скоростью  $v_n$ . Разрезание выполняют в ванне с диэлектрической жидкостью.

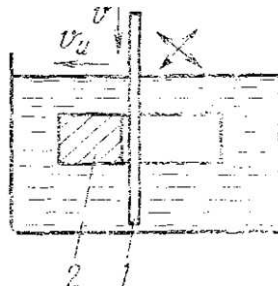


Рис. 1.5. Разрезка материалов непрофилированным электродом

### ***1.1.2. Комбинированные методы обработки***

#### **Электро-абразивная обработка**

Электрохимический метод первоначально был разработан для шлифования инструментов из карбида вольфрама [9]. Новый процесс показал явные преимущества по сравнению с дорогим обычным шлифованием. Успехи, достигнутые в настоящее время, позволяют экономично использовать электролитический метод для обработки деталей из закаленной стали. Использование абразивных кругов на угольной связке также будет вкладом в дальнейшем развитии электролитического шлифования.

При разработке труднообрабатываемых материалов электрохимический метод следует сравнивать с электроискровой обработкой. Там, где можно использовать инструменты большой площади и подвести необходимый к ним ток, электрохимическая работа гораздо производительнее электроискровой. Но если по какой-либо причине можно использовать только инструменты с малой площадью, искровая обработка будет, возможно, более экономичной, так как стоимость оборудования для нее составляет примерно только половину стоимости оборудования для электрохимической обработки. Конструкции инструмента для искровой обработки проще, но при электрохимической обработке инструмент не изнашивается. Более того, электрохимическая обработка не повреждает обрабатываемую поверхность, обеспечивает высокий класс чистоты и, кроме того, самый высокий класс чистоты поверхности получается в том случае, когда плотность тока и, следовательно, местная скорость съема металла максимальны. Это означает, что самый высокий класс чистоты поверхности получается тогда, когда обработка ведется на предельной скорости подачи.

Комбинированные методы обработки направлены на интенсификацию процесса анодного растворения [23]. Скорость съема металла и точность формообразования при ЭХО зависят от того, насколько быстро будет идти реакция перехода материала заготов-

ки в шлам. Скорость анодного растворения ограничивается наличием пленки, пассивирующей поверхность, и толщиной диффузионного слоя, которые преодолевают удаляемые продукты обработки.

При электроабразивном шлифовании твердые частицы (абразивные зерна или наполнитель) устраняют пленку, активируя тем самым процесс ЭХО. Размеры абразивных зерен, определяющие межэлектродный зазор, как правило, не превышают десятых долей миллиметра. При таких малых зазорах плотность тока будет значительно больше, чем в случае размерной электрохимической обработки. Резко возрастает скорость съема металла в зоне действия абразивных зерен инструмента. Кроме того, часть припуска удаляется механическим шлифованием. В отличие от обычного шлифования при анодно-абразивной обработке на поверхности заготовки не образуется более прочный наклепанный слой, а производительность шлифования повышается. Следовательно, интенсивность съема металла при анодном растворении возрастает вследствие механического удаления пассивирующей пленки и ускорения процесса выноса продуктов обработки из промежутка, а электрохимическое растворение части металла, в свою очередь, способствует повышению скорости механического шлифования. Кроме указанных составляющих съема при малых зазорах может иметь место электроэрозионный процесс. Таким образом, при малых размерах зазора часть металла заготовки удаляется за счет электрической эрозии.

Скорость съема  $Q$  металла с заготовки может быть представлена в виде следующей суммы:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3,$$

где  $Q_1$  – скорость анодного растворения металла за счет ионного тока;  $Q_2$  – скорость механического удаления припуска абразивными зернами;  $Q_3$  – скорость электроэрозионного съема металла.

Соотношение между составляющими общего съема может изменяться в широких пределах. Если зерна 2 (рис. 1.6, а) только

касаются заготовки 1, то припуск в основном удаляется анодным растворением. Механический и электроэрозионный съем практически отсутствуют. При значительном усилии на инструмент выступающие части зерен 1 (рис. 1.6, б) могут углубляться в заготовку 3. В этом случае между металлическим инструментом и заготовкой на каком-то участке образуется контакт. Заготовка с инструментом могут контактировать посредством частиц стружки 2. Режим обработки может быть таким, что сочетание всех составляющих дает возможность получить наиболее высокую скорость удаления припуска и обеспечить заданное качество поверхности. Этот режим устанавливают обычно по результатам экспериментов и поддерживают его, сохраняя параметры процесса, в частности усилие прижима инструмента к заготовке.

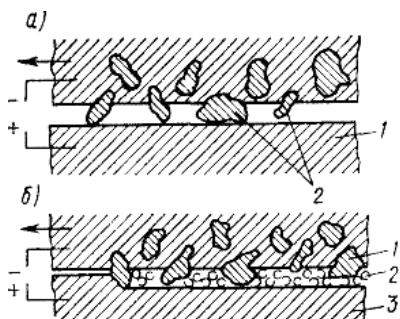


Рис. 1.6. Воздействие абразивных зерен при разделении материалов

Если используется схема обработки с электронеутральным инструментом, то скорость съема определяется двумя составляющими. Электрическая эрозия здесь не возникает. Однако и в этом случае сказывается эффект взаимного положительного влияния шлифования и анодного растворения, в результате которого суммарная скорость съема металла значительно превышает сумму отдельных составляющих, взятых без учета такого влияния.

При подаче в зону обработки свободного абразива процесс протекает так же, как при закрепленном зерне. Однако здесь слож-

но поддерживать постоянную концентрацию зерен в межэлектродном пространстве и съем материала за счет механического шлифования нестабилен. Это влияет на составляющую  $Q_2$  и процесс становится трудно управляемым. Чтобы избежать коротких замыканий, вызывающих прижоги поверхности, обработку свободным абразивом обычно ведут при пониженных напряжениях ( $U < 10$  В).

В случае подачи наполнителя струей электролита расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности может достигать десятков миллиметров, поэтому напряжение на электродах повышают до  $U = 60 \dots 80$  В. Ускорение съема припуска с заготовки происходит за счет удаления пассивирующей пленки и интенсификации анодного растворения. При использовании металлических наполнителей достаточно больших размеров удается повысить электропроводность электролита, что также способствует ускорению съема металла.

При электро-абразивном полировании припуск удаляется либо анодным растворением металла и съемом абразивным зерном, либо только растворением. В первом случае инструмент содержит связанный или свободный абразивный порошок, во втором – в качестве инструмента используют деревянные или пластмассовые бруски, расположенные между металлическими электродами-инструментами.

### ***1.1.3. Области применения процессов с наложением электрического поля***

Сравнивая технологические показатели различных способов, можно определить возможности наиболее эффективного их использования в машиностроении.

Электроэрозионная обработка в электроискровом режиме происходит при относительно малой энергии импульсов. Объем металла, удаленный за каждый импульс, невелик, а глубина лунки незначительна. Такой режим позволяет получить поверхности с

высокой точностью и малой шероховатостью при невысокой производительности. Кроме того, процесс весьма энергоемок. Энергоемкость оценивают отношением расхода электрической энергии к массе удаленного с заготовки металла. Энергоемкость при обработке на электроискровом режиме на порядок выше по сравнению с механической обработкой на аналогичных операциях. Велик также износ профильного инструмента. С учетом сказанного обработка в электроискровом режиме эффективна для изготовления прецизионных деталей небольших габаритов. Эффективность еще более повышается, если материал детали трудно поддается традиционными методами механической обработки или если обрабатываемая поверхность имеет сложную форму. Такие детали характерны для приборостроения, точного машиностроения, инструментального производства.

Обработка в электроимпульсном режиме характеризуется большей энергией разряда – высота неровностей здесь больше. Но за счет повышения энергии разряда достигается высокая производительность процесса, которая в 15 ... 20 раз превышает аналогичный показатель при электроискровом режиме и составляет для стали до 250 мм<sup>3</sup>/с, для твердых сплавов – 3 ... 5 мм<sup>3</sup>/с. Учитывая малый износ электрода-инструмента и удовлетворительную энергоемкость, не превышающую аналогичного показателя для фрезерования, обработку на электроимпульсном режиме можно рекомендовать для замены фрезерования крупных полостей сложной формы, углублений, каналов, где механической обработкой не удается достичь высокой производительности или где затруднен доступ инструмента в зону резания. Такие изделия применяются во многих отраслях индустрии, в частности в энергетическом и транспортном машиностроении, в двигателестроении, радиотехнической промышленности.

Электроконтактное разрезание в жидкости позволяет получить производительность процесса до 400 ... 450 мм<sup>3</sup>/с, что значи-

тельно выше, чем при механическом разрезании заготовок. Однако чистота поверхности и точность обработки здесь невысоки. Способ экономичен – расход электроэнергии в 6 ... 10 раз ниже, чем при обработке на электроискровом режиме. Значителен износ электрода-инструмента и неудобна в эксплуатации рабочая жидкость, которая разбрызгивается. Это вызывает загрязнения станков, деталей, одежды работающих и требует особых конструкций накладных ванн.

Электроконтактное разрезание в жидкости используется в качестве заготовительной операции при получении заготовок из труднообрабатываемых токопроводящих материалов.

Разрезание профильным электродом-инструментом в электроискровом режиме позволяет выполнять:

- пазы и щели малой ширины, например в цангах;
- профильные электроды-инструменты для прошивания;
- разрезание заготовок из вольфрама и других материалов.

Разрезанием непрофилированным электродом-инструментом получают:

- узкие сквозные или глухие щели;
- вырубные штампы небольших габаритов из твердых сплавов и закаленных сталей;
- рабочую часть резцов и других инструментов;
- щели в цангах для закрепления деталей малого диаметра (менее 2 ... 3 мм);
- таблетки из магнитных, вольфрамовых сплавов, при обработке которых требуется достичь минимального расхода материала;
- надписи, знаки, гравюры.

Электроконтактное разрезание диском или лентой в жидкости используется:

- для получения заготовок из труднообрабатываемых материалов (нержавеющих, жаропрочных, титановых, магнитных и других сплавов);

- для разрезания труб из конструкционных материалов;
- для прорезания узких пазов и отверстий в деталях.

Разрезание в воздушной среде находит широкое использование в металлургической промышленности для:

- разделения на части проката;
- отрезания литников с крупных литых заготовок.

Для более полного использования преимуществ ЭХО необходимо проектировать детали с учетом особенностей процесса анодного растворения сплавов. Следует учитывать, что при ЭХО нет разделения на черновые и чистовые операции – при любом режиме ЭХО высота неровностей соответствует чистовым операциям механической обработки, и с возрастанием скорости съема металла шероховатость поверхности снижается. В отличие от механической обработки технологические показатели ЭХО даже повышаются с увеличением твердости материала заготовки. Кроме того, при ЭХО инструмент либо вообще не изнашивается, либо изнашивается незначительно (при комбинированном способе обработки).

При использовании ЭХО необходимо удовлетворить следующим требованиям, общим для всех видов заготовок и схем обработки.

1. Поверхность перед ЭХО должна быть очищена от окалины и других неэлектропроводных веществ.

2. В местах, где удаление металла планируют выполнять с применением ЭХО, не допускается местная зачистка поверхности, например, для контроля твердости.

3. ЭХО необходимо проводить после термической обработки заготовок. Это позволяет избежать нарушения точности за счет коробления при термообработке, предотвращает появление обезуглероженного слоя в готовой детали.

4. При проектировании заготовок припуск не должен быть меньше некоторого предельного значения, определяемого с учетом



возможного растворения на обрабатываемых и соседних поверхностях, где металл может растворяться за счет токов рассеяния и ускоренного съема на кромках детали.

5. В технологическом процессе не предусматривают операции и переходы по удалению заусенцев и скруглению кромок на поверхностях после ЭХО.

Существуют специфические требования к технологичности для каждой схемы обработки.

При схеме с неподвижными электродами съем металла интенсивно протекает не только в зоне обработки, но и на большом удалении от нее. Например, при удалении заусенцев с зубчатых колес профиль зуба со стороны торца утоняется на 0,01 ... 0,03 мм. Это не влияет на точность зацепления.

При изготовлении посредством ЭХО больших сквозных отверстий их целесообразно прошивать тонкостенным трубчатым электродом-инструментом (схема трепанации). Сердцевина детали остается целой, сокращаются энергоемкость и трудоемкость операции.

При схеме разрезания на конце заготовки должен быть участок с малой шероховатостью ( $R_z = 10 \dots 20$  мкм) для подвода напряжения. Если контакт заготовки с токопроводом не плотный, то возможны прижоги поверхности, нестабильный процесс разрезания.

При обработке по схеме шлифования следует предусмотреть свободный выход круга за шлифуемую поверхность. Если при чистой обработке, например зуба или шлицевого профиля, невозможен выход инструмента за торцовую поверхность, то приходится останавливать продольную подачу круга при положении его внутри впадины зуба. При этом за счет анодного растворения происходит дополнительный съем металла, что вносит дополнительные погрешности.

Размерная электрохимическая обработка значительно расширяет технологические возможности изготовления деталей. Бла-

годаря ей можно получать формы поверхностей, создание которых другими способами или невозможно, или невыгодно.

По схеме разрезания можно получить с высокой точностью ажурные детали без деформации и заусенцев. Электрод-инструмент выполнен в виде тонкого диска. Анодное растворение происходит без заметного усилия на заготовку, поэтому она не деформируется, заготовка может иметь вращательное движение, что ускоряет процесс отрезания. Скорость углубления инструмента может достигать 0,2..0,3 мм/с, погрешность обработки находится в пределах 0,1 мм. При этом достигается скругление кромки с радиусом до 0,5 мм. При использовании непрофилированного электрода проволоки удается получить пазы сложной формы; прямые участки сопряжены – как радиусами  $R_1, R_2, R_3, R_4$ , так и практически без радиуса ( $R = 0$ ). Скорость разрезания может достигать 0,2 мм/с, ширина паза 0,5 ... 5 мм, глубина 0,1 ... 20 мм, погрешность по ширине – до 0,1 мм.

## **1.2. Технологические процессы**

### ***1.2.1. Порядок проектирования техпроцесса электроэрозионной обработки***

1. По форме обрабатываемой поверхности, ее размерам и требованиям к шероховатости намечают один или несколько способов обработки, позволяющих обеспечить соответствие детали чертежу и техническим условиям; подбирают схему обработки (сведения о выборе способа и схемы изготовления типовых деталей приведены в 1.1.1); рассматривают возможность и целесообразность использования многоконтурной и многоэлектродной обработки.

2. Намечают маршрут технологического процесса электроэрозионной обработки, для чего определяют последовательность и число операций, выполняемых на станке, и контрольных операций.

3. Рассчитывают технологические показатели процесса для каждой операции: производительность, точность, качество поверхности и режимы обработки.

Для эрозионной составляющей расчет режимов выполняют в зависимости от технологических требований к детали: а) при необходимости исключить последующую операцию находят параметры режима, обеспечивающие заданную точность и качество поверхности; б) если деталь должна работать в условиях динамических нагрузок, надо выбирать режимы, при которых отсутствуют микротрещины; в) для достижения минимальной трудоемкости за основу выбора режима принимают максимальную производительность процесса; г) для получения минимальной трудоемкости доводки выбирают режим, при котором затраты на электроэрозионную обработку и последующую доводку будут минимальны.

Режимы рассчитывают в такой последовательности: а) выбирают технологический критерий, который должен быть достигнут в конце операции (точность, шероховатость, производительность и т.д.); б) для выбранного критерия по одной из формул и номограммам, прилагаемым к оборудованию, находят энергию импульса в) по характеру операции (черновая, чистовая) находят напряжение холостого хода среднее напряжение. Выбирают требуемую диэлектрическую среду (вода, нефтепродукты и др.); г) определяют длительность импульса; д) находят средний ток, ток короткого замыкания; е) для известной энергии импульса и его длительности находят технологические показатели процесса, не являющиеся критериальными.

Рассчитанные показатели точности, шероховатости и состояния поверхностного слоя сравнивают с требованиями чертежа и технических условий. Если хотя бы один из показателей оказывается ниже требований чертежа, необходимо наметить последующие операции, используя для этой цели другие методы обработки (электрохимический, механический и т.д.).

4. Из расчета производительности процесса находят скорость подачи электрода-инструмента. Если площадь обрабатываемой поверхности переменная, то определяют закон движения электрода-инструмента. Устанавливают среднюю скорость подачи

$$V_{\text{иср}} = (V_{\text{и1}} + V_{\text{и2}} + \dots + V_{\text{ин}})/n, \quad (1.1)$$

где  $V_{\text{и1}}$ ,  $V_{\text{и2}}$ ,  $V_{\text{ин}}$  – скорости подачи в 1, 2, ...,  $n$ -м сечении по глубине обработки.

5. Находят основное время обработки детали на станке

$$t_0 = z/V_{\text{иср}}, \quad (1.2)$$

где  $z$  – размер припуска (берется равным углублению электрода инструмента в направлении подачи).

6. По нормативам находят остальные составляющие штучно-калькуляционного времени  $t_{\text{ш.к}}$ : вспомогательное время  $t_{\text{б}}$ , время обслуживания  $t_{\text{обс}}$ , время отдыха  $t_{\text{отд}}$ , подготовительно-заключительное время  $t_{\text{п.з}}$  (при упрощенных расчетах время обслуживания и отдыха берут в зависимости от суммы  $t_0 + t_{\text{б}}$ )

$$t_{\text{ш.к}} = (t_0 + t_{\text{б}} + t_{\text{п.з}} + t_{\text{отд}} + t_{\text{обс}})/N, \quad (1.3)$$

где  $N$  – число деталей в партии.

7. Если намечаются дополнительные операции, для доведения технологических показателей до требований чертежа детали необходимо рассчитать их трудоемкость и найти общие затраты времени на выполнение электроэрозионной и последующих операций.

8. Сравнивают общие затраты времени на электроэрозионную и ранее применявшуюся на этой операции обработку. Если проектируют процесс производства нового изделия, то для сравнения берут технологию механической обработки, позволяющую получить требуемую деталь. Из исходных данных берут программу выпуска деталей, подбирают серийный станок, обеспечивающий изготовление заданной детали, и проводят предварительное

технико-экономическое обоснование целесообразности использования электроэрозионной обработки.

Электроэрозионный и комбинированные методы позволяют обрабатывать поверхности, которые не могут быть обработаны традиционными методами. К ним относятся криволинейные глухие и сквозные отверстия переменного сечения, узкие сквозные и глухие пазы, соединительные каналы между углублениями. В подобных случаях нет необходимости в технико-экономическом обосновании.

9. При положительных результатах расчета по п. 8 разрабатывают операционные карты технологического процесса в количестве, определяемом маршрутной картой.

10. Намечают схему базирования, установки и закрепления заготовки, обосновывают целесообразность проектирования специальных приспособлений для установки заготовки и инструмента.

11. Выбирают из числа имеющегося или в противном случае проектируют и изготавливают инструмент. При обработке непрофилированным электродом-инструментом выбирают материал, диаметр, скорость перемещения проволоки или стержня, натяжение проволоки и рассчитывают траекторию движения электрода-инструмента. Если станок оборудован числовым программным управлением, то изготавливают программноноситель (перфокарту, перфоленту); в других случаях требуемый контур получают на копире или с чертежа с помощью фотосчитывателя.

12. Разрабатывают технические задания на проектирование специальных приспособлений. При этом учитывают условия установки деталей в приспособлении, необходимость изоляции, защиту подвижных элементов от попадания продуктов обработки, вызывающих абразивный износ.

13. После изготовления всей оснастки и инструмента производят настройку станка и изготовление первой детали.

14. Уточняют режимы обработки в операционных картах, конструкцию инструмента и приспособлений.

15. Проводят уточненный расчет технико-экономических показателей от внедрения электроэрозионного процесса.

### ***1.2.2. Особенности проектирования технологического процесса ЭХО***

После изучения чертежей заготовки, детали, технологических возможностей ЭХО проектируют технологический процесс:

1. Выбирают схему ЭХО, учитывая форму обрабатываемой поверхности, исходя из наличия оборудования и инструмента.

2. Оценивают технологичность детали и вносят необходимые изменения в чертежи с учетом применения ЭХО.

3. Оценивают технологические показатели ЭХО и сравнивают их с аналогичными показателями механической обработки.

4. Обосновывают целесообразность применения ЭХО. Если деталь нельзя изготовить другим способом, такого обоснования не требуется.

В серийном производстве ЭХО целесообразно применять при обработке заготовки сложной формы из высокопрочных сплавов или материалов с повышенной хрупкостью, вязкостью (жаропрочные, титановые и другие сплавы). Детали из конструкционных материалов изготавливают, используя ЭХО, если затруднен доступ инструмента в зону резания, или другие способы вызывают деформацию, например обработка труб и отверстий некруглой формы при отношении длины к диаметру более 10.

Следует учитывать также, что процесс ЭХО легко поддается автоматизации и его можно применять для изготовления деталей из токсичных, огнеопасных материалов, например бериллия, магния.

5. Сравнивают полученные расчетным путем показатели точности, качества поверхности с требованиями чертежа детали. Если возможности ЭХО не удовлетворяют этим требованиям, то предусматривают доводочные операции.

6. Определяют минимальный припуск на обработку и уточняют чертеж заготовки.

7. Разрабатывают маршрутный процесс ЭХО и уточняют его место в общем технологическом процессе изготовления детали.

8. Намечают способы защиты необрабатываемых поверхностей от анодного растворения: создание повышенных межэлектродных зазоров, использование диэлектрических покрытий.

### ***1.2.3. Этапы построения процесса (на примере ЭХО)***

ЭХО обычно включается в комбинированный метод как составная часть. При выполнении операций с учетом ЭХО следует предусматривать этапы, которые могут быть самостоятельными операциями или переходами: подготовительный, обработки на станке, промывки и консервации детали, ее контроля.

Подготовительный этап включает очистку заготовок от консервирующих смазок, создание базовых поверхностей для установки заготовки и подвода тока, удаление неэлектропроводных участков и покрытий, проверку размеров.

Расконсервацию заготовок, например, после транспортировки, хранения на складе проводят, помещая их в горячее масло ( $T = 370 \dots 390 \text{ K}$ ) на 10 ... 15 мин.

Если на детали не предусмотрены базовые поверхности, то их изготавливают на операциях, предшествующих ЭХО. Шероховатость таких поверхностей не хуже  $Ra = 5 \text{ мкм}$ , точность 8 ... 10-й квалитет. Размеры участков для подвода напряжения рассчитывают в зависимости от силы тока, применяемого при обработке. Для этого вычисляют площадь участка как отношение силы тока к его плотности в местах контакта деталей:  $S = I/J_K$ . Плотность тока ( $\text{A}/\text{мм}^2$ ) выбирают в зависимости от материала токопроводящего элемента станка:

Таблица 1.1

Медь .....	$\leq 3$	Бронза, латунь .....	$\leq 0,8$
Алюминиевые сплавы .....	$\leq 1,5..2$	Нержавеющие стали .....	$\leq 0,3$

Заготовки очищают от загрязнений и окалины пескоструйной обработкой, химическим травлением в ваннах, зачисткой металлическими щетками, абразивным инструментом. Затем заготовку подвергают химическому обезжириванию в ваннах с раствором каустической соды концентрацией 100 ... 150 кг/м<sup>3</sup>, нагретым до температуры 350 ... 370 К, в течение 15 ... 20 мин. После обезжиривания заготовку промывают водой с температурой 350 ... 360 К в течение 1 ... 2 мин и сушат на воздухе. Места подвода тока протирают ветошью, смоченной бензином или другим органическим растворителем.

В процессе подготовительного этапа необходимо предусмотреть входной контроль заготовки. Выборочно на одном двух экземплярах из партии контролер обязан проверить соответствие марки материала, указанной в чертеже. На нескольких заготовках из партии в начале изготовления деталей и периодически в дальнейшем следует измерять размеры припусков по сечениям и наименьшее значение припуска. Для деталей, имеющих незначительный припуск, например для лопаток турбин и компрессоров, в процессе входного контроля приходится перераспределять припуск на обе стороны для каждой заготовки. Такую операцию выполняют на специальных оптических приборах с автоматической установкой положения детали.

Выборочно контролируют наличие неэлектропроводных участков. Если они будут обнаружены, то необходимо подвергнуть контролю всю партию заготовок. Контролер обязан также выборочно проверить твердость материала. Измерение твердости следует выполнить только на участках заготовки не подлежащих ЭХО, так как углубления от наконечника твердомера могут копироваться на детали и вносить дополнительную погрешность при последующей ЭХО.



Перед обработкой партии заготовок следует проверить состояние электрода-инструмента, соответствие его цехового номера и размеров чертежу, отсутствие, следов коротких замыканий, состояние диэлектрических покрытий. Эту работу выполняет оператор при установке инструмента на станок.

Если используется специальное приспособление, то следует проверить соответствие цехового номера оснастки чертежу, правильность закрепления приспособления на станке, правильность подключения полюсов источника питания, места подвода электролита отсутствие коротких замыканий между деталями. Этот контроль обязан выполнять оператор.

Перед началом смены оператор должен проверить состояние станка: измерить объем, плотность, температуру электролита в ванне, проконтролировать начальное и конечное положения электродов, герметичность гидравлических узлов.

Обработка на станке включает установку заготовки, ее крепление и крепление токоведущих проводов к зачищенным участкам, установку электрода-инструмента в исходное положение, обработку в расчетном режиме, снятие и контроль детали. Механизмы станка приводят в действие в такой последовательности: 1) вентиляцию; 2) вспомогательные движения детали или электрода-инструмента (вращение, подвод и др.); 3) подачу электролита; 4) рабочее напряжение; 5) подачу электрода-инструмента.

Режим ЭХО контролируют по приборам, установленным на станке. Оператор обязан проверить соответствие напряжения требованиям операционной карты, следить за силой тока, давлением электролита, температурой и расходом электролита.

Первую деталь из партии контролирует настройщик и контролер или мастер. Это необходимо для настройки станка и корректировки режима. При контроле первой детали следует также иметь в виду, что из-за неудачного расположения мест подвода электролита и нерасчетной скорости его протекания может воз-

никнуть волнистость поверхности, которая не снижает прочности детали, но ухудшает внешний вид.

Выключение подачи инструмента и напряжения обычно осуществляется концевыми выключателями. Подачу электролита и привод вращения заготовки или инструмента включает оператор с пульта управления станком. Электрод-инструмент следует периодически очищать от загрязнений, оседающих на нем из потока электролита.

Промывка и пассивация. После обработки на станке детали из конструкционных сталей в течение 8 ... 15 мин промывают и подвергают пассивации, чтобы избежать коррозии. Промывку выполняют проточной водой в течение 3-5 мин, при этом желательно удалить загрязнения с помощью щетки. Затем деталь промывают в течение 5-8 мин в горячей воде при  $T = 330 \dots 350$  К. Изделия пассивируют в слабом растворе каустической соды при температуре не ниже 330 К в течение 0,5 ... 1 мин. Для пассивации можно применять также растворы мыла, кальцинированной соды, промывочные жидкости. После этого деталь сушат и смазывают маслом. Если деталь поступает на склад, то применяют более густые смазки.

В случае ЭХО нержавеющей сталей, меди, латуни применяют только промывку проточной водой для удаления остатков солей и загрязнений.

Окончательный контроль включает оценку соответствия линейных угловых размеров детали чертежу, сравнение обработанных поверхностей с эталоном шероховатости, визуальный осмотр на отсутствие прижогов от коротких замыканий, коррозии, проверку качества консервации.

При контроле может обнаруживаться местное проявление структуры материала и рисунок перемещений инструмента на предшествующих операциях. Это не является дефектом, и в чертежах следует указывать допустимость таких явлений.

Кроме того, при освоении в производстве новых изделий может потребоваться специальный контроль эксплуатационных

характеристик деталей после ЭХО. Это могут быть металлографические исследования материала, позволяющие выявить микрорастравливание и изменение химического состава поверхностного слоя, механические испытания при различных видах нагрузок, усталостные испытания стандартных образцов и натуральных деталей. Эти виды контроля выполняют на специальном оборудовании в лабораториях завода.

### 1.3. Анализ моделей процессов электрохимической и комбинированной обработки

#### 1.3.1. С механической депассивацией поверхности

Здесь скорость съема определяется только анодным растворением, а бруски способствуют механическому удалению пассивирующей пленки.

На рис. 1.7 показана схема полирования диэлектрическим инструментом 1 без абразива, может быть с абразивом. Перемещая его по поверхности заготовки 4, снимают пленку 3 на выступах неровностей. Сильнее всего растворение происходит на участках, расположенных ближе к электроду-инструменту 2 и не имеющих пассивирующей пленки – высота неровностей уменьшается.

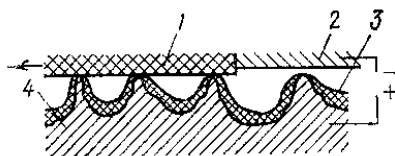


Рис. 1.7. Схема комбинированной обработки с механической депассивацией поверхности

Производительность электроабразивной обработки с применением связанного абразива во многом зависит от скорости замены изношенных зерен свежими. Для этого требуется регулировать из-

нос абразивного инструмента. Абразивный инструмент, как и электрод-инструмент, при электроэрозионной обработке под действием разряда частично разрушается, обнажая свежие режущие зерна. Для разных обрабатываемых материалов интенсивность износа инструмента различная, поэтому экспериментально подбирают или теоретически рассчитывают такое напряжение на электродах и такое давление инструмента на заготовку, чтобы получить наибольшую производительность при минимальном расходе кругов или брусков.

При обработке вязких сплавов на инструмент налипают частицы обрабатываемого материала, что препятствует срезанию стружки. Налипание вызывает местные прижоги на заготовке и ухудшает точность обработки. Чтобы устранить этот недостаток, на электроды подают напряжение обратной полярности, т.е. заготовку подключают к отрицательному полюсу. Происходит анодное растворение инструмента, и налипший металл полностью удаляется. Применяют также схемы правки с разнесением зон обработки и правки.

Комбинированный метод [23] электроэрозионно-химической обработки представляет сочетание двух процессов, которые оказывают взаимное влияние друг на друга, значительно повышая производительность и снижая износ инструмента. Исследования показывают, что при каждом импульсе последовательно осуществляется сначала анодное растворение, а затем электрическая эрозия металла. Скорость съема определяется зависимостью  $Q = Q_1 + Q_3$ , где  $Q_1$  – скорость съема металла за счет анодного растворения;  $Q_3$  – скорость съема за счет эрозии.

Процесс анодного растворения создает хорошие условия для пробоя промежутка, так как на катоде-инструменте имеется парогазовый слой. Эрозия обрабатываемой поверхности, в свою очередь способствует удалению пассивирующей пленки, значительно ускоряет диффузию и вынос продуктов обработки. Процесс наибо-

лее эффективен при благоприятных условиях удаления продуктов обработки: малой площади рабочей поверхности электрода-инструмента, небольшом размере углубления. Так, при прошивании отверстий скорость подачи электродов после углубления на несколько миллиметров снижается в несколько раз.

Электрическая эрозия сильно сказывается на размерах шероховатости поверхности. На ней возникают углубления, которые несколько сглаживаются анодным растворением, но качество обработки все же хуже, чем при ЭХО. Износ электрода-инструмента от воздействия эрозии может быть снижен, если изготавливать его из эрозионностойких материалов (графита, вольфрама). Энергоемкость такого метода значительно ниже, чем электроэрозионного. Это объясняется лучшими условиями протекания процесса и за счет этого снижением числа разрядов, не производящих удаления металла.

При протекании тока через электропроводные жидкие растворы (электролиты) происходит процесс электролиза, подчиняющийся законам М. Фарадея. В зависимости от конкретных условий могут наблюдаться такие процессы, как осаждение на катоде тех или иных металлических элементов, входящих в состав электролита, образование на аноде окисных пленок, растворение металла анода и др.

Для ускорения подобных процессов прибегают к различным искусственным приемам, которые в частности позволяют осуществлять размерную обработку, использующую явление анодного растворения.

Далее излагаются методы электрической обработки металлов в электролитах, хотя, строго говоря, не всегда рассматриваемый процесс представляет размерную обработку (например, галтование).

Анодное растворение металла на обрабатываемых поверхностях может быть ускорено либо механическим воздействием самого

электролита, либо с помощью соответствующих рабочих инструментов, В некоторых случаях прибегают к использованию комбинированного процесса: электроэрозионного и электрохимического.

Среди процессов размерной электрической обработки в электролитах можно выделить следующие три группы.

1-я группа. Размерная электрохимическая обработка (ЭХО) в движущемся электролите. Автор этого метода обработки В.Н. Гусев назвал его «электрогидравлическим»; позже в некоторых случаях стали применять названия «размерная ЭХО в проточном электролите», «анодно-гидравлическая обработка», «электрохимико-гидравлическая обработка» и др. Но чаще всего этот процесс называют размерной ЭХО. Слово «размерная» применяют для того, чтобы подчеркнуть, что электрохимические явления использованы в данном случае в целях формообразования, а не для обработки поверхности, изделий (полирование, анодирование, нанесение покрытий, окраска и пр.). В дальнейшем изложении процессы 1-й группы называются ЭХО, соответственно смыслу явлений, используемых для формообразования и в соответствии с установившимися названиями станков. Слово «размерная» далее обычно опускается, поскольку ясно, что речь идет о формообразовании.

2-я группа. Электроабразивная обработка, в которой сочетаются процессы анодного растворения и абразивного резания.

3-я группа. Электроэрозионнохимическая обработка, использующая комбинацию анодного растворения и процессов, которые обычно сопровождают электроэрозионную обработку.

В связи с все расширяющейся практикой электрохимической обработки твердых сплавов немаловажную роль приобретает изучение их электрохимического поведения. Такое исследование обработки твердого сплава было проведено А.И. Левиным и М.А. Евсеевой [11]. Выпускаемый промышленностью твердый сплав вольфрамо-кобальтовой группы применяют при изготовлении режущего, кузнечно-прессового инструмента и фильер для волочения проволоки, где требуется разделение заготовок на фрагменты.

Опытные данные показали, что свойства и поведения твердого сплава заметно меняются при ЭХО по мере удаления от начальной поверхности, стабилизируясь лишь на глубине порядка 1 мм. Применение подвижного катода обеспечивало плавную автоматическую регулировку тока в случае компенсации его самопроизвольных изменений по мере изменения материала.

Изучение влияния изменения скорости циркуляции электролита на ЭХО твердого сплава показало, что при определенных значениях потенциала заметный рост плотности тока наблюдался лишь до некоторого предела скоростей циркуляции (300 – 400 м/мин).

Применяемые в промышленности скорости циркуляции достигают обычно 600 м/мин и выше. Таким образом, электрохимическая обработка твердого сплава может проходить в той области скоростей потока, в которой увеличение интенсивности циркуляции практически уже не может влиять на скорость процесса ЭХО. Повышение температуры позволяет увеличить выход по току с 90 до 96 % и улучшить качество поверхности отверстия [34].

Поляризационные кривые (рис. 1.8), полученные в отдельности для кобальта, карбида вольфрама и твердого сплава в сложном рабочем электролите и в электролитах, составленных из его компонентов в отдельности (10 %-ного раствора хлористого натрия и 5 %-ного раствора углекислого натрия), позволили сделать следующие выводы. Потенциал анодного растворения сплава ВК8, как правило, более положительный, чем потенциал растворения его компонентов.

Были обнаружены две стадии пассивации.

Первая стадия и по общему ходу поляризационной кривой и по температурной зависимости в значительной степени совпадает с ходом поляризационной кривой для карбида вольфрама в растворах хлористого натрия.

Вторая стадия пассивации в значительной степени обусловлена поведением кобальта в растворе углекислого натрия.

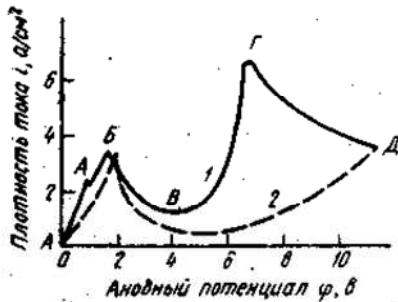


Рис. 1.8. Поляризационные кривые при обработке твердого сплава VK8

Пассивирование сплава можно объяснить адсорбцией на его поверхности гидроокиси кобальта. Занимая активные участки поверхности кобальтовой связи, она вызывает резкое падение скорости растворения сплава в целом, поскольку растворение фазы внедрения карбида вольфрама также тормозится при пассивировании связи. Одновременно в результате адсорбции на поверхности сплава ионов гидроксила образуется катализатор, ускоряющий дальнейшую реакцию растворения кобальта. Повышение скорости ионизации кобальтовой связи устраняет и связанные с ней ограничения в растворении карбида вольфрама, что также приводит к некоторому повышению плотности тока. При этом выделяется кислород. Совокупность этих факторов служит причиной образования наряду с ионизацией кобальта нерастворимого окисла трехвалентного, а возможно и четырехвалентного кобальта. Поэтому с ростом скорости процесса отвод продуктов реакции затрудняется. По мере сдвига потенциала в положительную сторону процесс ионизации сплава начинает конкурировать с образованием на его поверхности пленки, состоящей из продуктов растворения. В некоторый момент эти скорости должны сравняться, затем вторая начинает превалировать. Это в конечном итоге вызывает появление видимой фазовой пленки на поверхности сплава (вторая стадия пассивации). Качественный анализ образующейся при этом пленки показал присутствие в ней кобальта.



Обращают на себя внимание высокие положительные значения анодного потенциала изучаемого сплава, достигающие (на участке активного растворения) до 5 – 6 В. Для карбида вольфрама в содовом растворе были отмечены значения поляризации, достигающие до 4 В. Тот факт, что такая высокая поляризация наблюдалась именно для карбида вольфрама, не случаен. Карбиды вольфрама отличаются высокой теплотой образования и низкой химической активностью. Поэтому можно полагать, что их электрохимическое растворение протекает со значительными затруднениями.

Сплав ВК8 отличается еще более положительными значениями потенциалов, чем чистый карбид вольфрама. Причина этого заключается в том, что сплав состоит из двух фаз: кобальтовой связки, представляющей собой твердый раствор 4 – 6 % вольфрама в кобальте, и распределенных в ней зерен фазы внедрения – карбида вольфрама. Кобальтовая связка, вследствие содержания в ней карбида вольфрама по указанной выше причине должна растворяться с большими затруднениями, чем чистый кобальт, т.е. должна иметь более положительный потенциал растворения. В то же время и поведение, фазы внедрения также изменится по сравнению с поведением чистого карбида вольфрама.

Из-за значительного содержания в сплаве зерен карбида вольфрама он имеет чрезвычайно высокоразвитую поверхность. Это объясняет некоторые особенности его поведения, подчеркивающие специфическую роль границ зерен. Избыточная свободная энергия границ зерен создает избыточный термодинамический потенциал, в связи с чем напряжение, при котором происходит анодное растворение сплава, повышается по сравнению с его значением при растворении чистого карбида вольфрама.

Совокупность рассмотренных выше обстоятельств позволяет объяснить влияние депассивации поверхности абразивными зёрнами при комбинированном разделении хрупких материалов.

При анодной поляризации металлов [11] параллельно с реакцией их растворения почти всегда образуются поверхностные слои

адсорбированного кислорода, а также фазовые слои (пленки) из оксидов или солей металла. Кислородсодержащие слои часто возникают также при контакте металла с раствором (без анодной поляризации), а также при контакте его с воздухом – воздушно-окисленное состояние поверхности.

Первая стадия образования оксидного слоя – адсорбция (хемосорбция) кислорода. На платине процесс на этой стадии прекращается и на ее поверхности находится в зависимости от условий незаполненный или заполненный монослой адсорбированного кислорода. На других металлах образование слоя продолжается. После того, как толщина  $\delta$  достигает 2 – 3 атомных размеров, слой превращается в отдельную поверхностную фазу кристаллического (реже аморфного) строения со свойствами, аналогичными свойствам соответствующих объемных оксидов.

В зависимости от структуры металла и оксида поверхностный фазовый слой имеет разнообразный характер. На некоторых металлах (цинк, кадмий, магний и др.) образуются рыхлые высокопористые слои, достигающие значительных толщин. На других металлах (алюминий, висмут, титан и др.) образуются плотные малопористые или беспористые слои, толщина которых не больше 1 мкм. В ряде случаев (например, на железе) образуются сплошные пленки, в которых под влиянием структуры металла-подложки, а также из-за действия поверхностных химических сил кристаллическая решетка искажена. Физико-химические и термодинамические параметры таких пленок отличаются от параметров обычных объемных оксидов. Из-за наличия внутренних напряжений деформированной решетки такие пленки устойчивы только при незначительной толщине, примерно до 3-5 нм.

На поверхности металлических электродов, как правило, одновременно образуются различные виды оксидных слоев, например, пористые фазовые слои над адсорбционными слоями.

Часто происходят процессы парения оксидных слоев - изменения их свойств во времени или перехода из одного вида в другой.

На многих металлах оксидный слой при достаточно большой катодной поляризации восстанавливается, однако в некоторых случаях (на титане, тантале и др.) он не может быть удален электрохимическими средствами. Чистую, неокисленную поверхность металла можно получить термическим восстановлением в атмосфере водорода или механическим снятием поверхностного слоя металла в среде (газ или раствор), тщательно освобожденной от кислорода.

Поверхность металла имеет поликристаллическое строение и довольно сложный рельеф: из-за разной ориентации кристаллитов на поверхность выступают различные кристаллографические грани: гладкие грани с низким кристаллографическим индексом и «ступенчатые» грани с высоким индексом. В отдельных случаях может образоваться поверхностная текстура со структурными изменениями, если вместо твердого металла использовать электроды из расплавленного металла (при повышенных температурах и в неводных электролитах) или из жидкой амальгамы данного металла.

При анодной поляризации металлического электрода в водных растворах возможны разнообразные электрохимические реакции: а) анодное растворение (окисление) металла с образованием растворимых или нерастворимых продуктов реакции:

а) образование поверхностных адсорбционных и фазовых оксидных или солевых слоев (пленок);

б) анодное окисление компонентов раствора, например, органических примесей;

в) анодное выделение кислорода (в хлоридсодержащих растворах также анодное выделение хлора).

Каждая из этих реакций протекает в своей характерной области потенциалов. Может иметь место параллельное протекание нескольких реакций.

Для металлов с малой поляризуемостью форма поляризационной кривой определяется главным образом концентрационной

поляризацией. В случае сильно поляризуемых металлов, когда можно измерить активационную поляризацию с достаточной точностью, поляризационная зависимость обычно выражается законом Тафеля. Для металлов, образующих многовалентные ионы, значение коэффициент наклона  $B'$  в этом уравнении часто лежит в пределах 30 – 60 мВ.

Для реакций анодного растворения металлов характерна сильная зависимость скорости от состава раствора, в частности, от природы и концентрации анионов [14]. Эта связь облегчает последующие стадии отрыва атома (иона).

### *1.3.2. С абразивным удалением припуска*

При совместном использовании анодного растворения металла с воздействием абразива удаление припуска происходит под действием механического шлифования и одновременного растворения материала электрическим током. Благодаря перемещению абразивных зерен относительно поверхности заготовки происходит интенсивное удаление продуктов анодного растворения из зоны обработки, что способствует стабилизации процесса и повышению его технологических показателей. Такой метод называют электроабразивной обработкой. Различают несколько разновидностей его использования: а) абразивонесущим токопроводящим инструментом, б) электронейтральным инструментом и свободным абразивом. В первом случае инструмент имеет форму кругов, брусков, применяемых при механическом шлифовании или повторяющих форму обрабатываемых участков детали. Однако во всех случаях связка должна быть электропроводной. Различают электроабразивную и электроалмазную обработки. При разделении материалов (рис. 1.9, а) инструмент 2 выполнен в форме абразивного или алмазного круга на металлической связке. Абразивные зерна 1 могут быть равномерно распределены по всему объему инструмента 2 или располагаться только на его поверхности. Алмазные

зерна обычно закрепляют в форме кольца на внешней окружности инструмента или вдавливают их в наружную поверхность оправки. Инструмент 2 и заготовку 3 подключают к полюсам источника питания. В процессе обработки инструмент вращают и подают на врезание со скоростью  $V_{ин}$ . Межэлектродный зазор  $s$  ограничен выступанием зерен абразива 1, поэтому нет необходимости применять сложные следящие системы для поддержания постоянных зазоров. Электролит подают поливом на поверхность, либо прокачивают через внутреннюю полость инструмента. В последнем случае он должен иметь поры для протекания жидкости. Благодаря вращению инструмента электролит протекает через зазор со скоростью до 15 ... 20 м/с. Следовательно, в пространстве между инструментом 2 и заготовкой 3 имеются все условия для интенсивного процесса ЭХО (малые зазоры, достаточная скорость протекания электролита, возможность протекания тока). Выступающие зерна в зависимости от усилия прижима инструмента к заготовке удаляют как срезаемый материал заготовки, так и продукты анодного растворения.

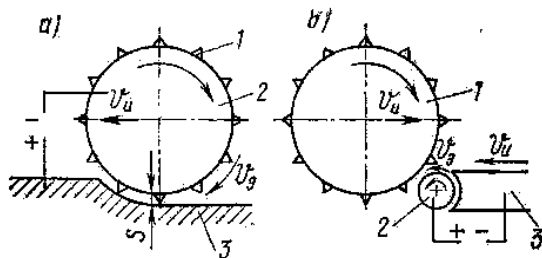


Рис. 1.9. Электроабразивное разделение материалов

Если используют диэлектрический абразивный круг 1, то напряжение подают на специальный электрод-инструмент 3 (рис. 1.9, б). Такую разновидность метода называют анодно-абразивной обработкой электронейтральным инструментом. Электронейтральный инструмент может применяться для шлифования, полирования,

притирки, хонингования, суперфинишных операций. Здесь уже необходимы специальные устройства для поддержания зазора между электродом-инструментом 3 и заготовкой 2. С этой целью обычно используют диэлектрические упоры. При шлифовании абразивный инструмент (круг) 1 имеет скорость до 25 ... 30 м/с. Круг и электрод-инструмент 3 подают к заготовке со скоростью  $V_{и}$ . Электролит поступает через зазор со скоростью  $V_3$ . Процесс удаления металла протекает за счет абразивного съема и анодного растворения. При операции притирки вместо абразивного инструмента может применяться притир из пластмассы или дерева. Притир служит только для механического удаления пленки оксидов с обрабатываемой поверхности и способствует ускорению процесса анодного растворения заготовки.

При электроабразивной обработке несвязанным абразивом абразивные зерна не связаны с заготовкой или инструментом. Их называют свободными. Зерна могут и не иметь абразивных свойств, тогда их называют наполнителем. Абразивные зерна или наполнитель 2 (рис. 1.10, а) вместе с электролитом подают в зазор между токопроводящим инструментом 3 и заготовкой 1. Абразив перемещается инструментом со скоростью  $V_a$ , удаляет часть припуска и вместе с электролитом выносит продукты анодного растворения из зазора. Требуемый зазор поддерживается абразивными зернами, находящимися между инструментом 3 и заготовкой 1. Если необходимо только удалить пленку, вызывающую пассивацию обрабатываемой поверхности, применяют наполнитель из фарфоровых, стеклянных или пластмассовых шариков, диаметр которых меньше заданного значения зазора между инструментом и заготовкой.

Если область обработки удалена от инструмента, то наполнитель 2 могут подавать струей электролита (рис. 1.10, б) или посредством центробежных сил, возникающих при вращении заготовки, например крыльчатки компрессора или колеса насоса.

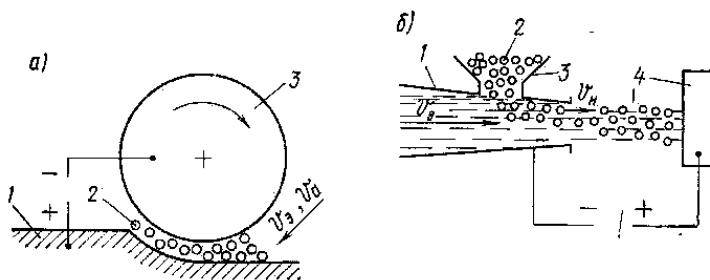


Рис. 1.10. разделение материалов с применением несвязанных абразивов

При подаче наполнителя струей (рис. 1.10, б) электролит прокачивают со скоростью  $V_3$  через сопло 1. В струю из дозатора 3 вводят наполнитель 2, который приобретает скорость  $V_n$  и транспортируется струей к обрабатываемой поверхности заготовки 4. Для повышения электропроводности среды наполнитель может быть изготовлен из токопроводящих материалов: шариков из металла или графитовых композиций. Перед повторным использованием электролит отделяется от наполнителя, например, с помощью фильтрующей сетки.

## 1.4. Технологические показатели процессов

### 1.4.1. Точность обработки

Анодно-абразивный метод используется как для черновых, так и для чистовых операций. При черновой обработке режимы выбирают, исходя из условия получения максимальной производительности. Для чистовых операций необходимо обеспечить высокую точность и хорошее качество обрабатываемой поверхности.

При использовании абразивонесущего инструмента точность обработки значительно выше, чем при электроконтактном или электрохимическом шлифовании, но ниже, чем при обработке абразивным или алмазным инструментом. Обычно погрешность по-

сле электроабразивного шлифования находится в пределах 0,02 ... 0,05 мм, а после электроалмазного – 0,01 ... 0,02 мм. Для сравнения можно указать, что погрешность алмазного шлифования обычно составляет 0,001 ... 0,005 мм. Снижение точности при наложении тока объясняется повышенным съемом металла на кромках и удалением его с поверхности, которая обработана абразивом начисто. А бесконтактный процесс анодного растворения зависит от многих параметров, которые изменяются во времени, поэтому съем металла на участках заготовки будет различным. Для повышения точности обработки перед последними ходами инструмента ток выключают и осуществляют выхаживание. Если используется электронейтральный абразивный инструмент, то в конце шлифования обработку также ведут без тока. Это позволяет обеспечить точность, как при применении абразивных или алмазных кругов.

В схемах шлифования со свободным абразивом сложно обеспечить его постоянную концентрацию в промежутке между заготовкой и инструментом. Поэтому не удается достичь стабильного съема припуска. Погрешность обработки по схеме обычно составляет 0,02 ... 0,05 мм.

При анодно-абразивном полировании и хонинговании погрешности не превышают значений, получаемых при использовании традиционных методов.

В случае обработки удаленных участков заготовки в электролитах с наполнителем погрешности формы и размеров не регламентируются.

### ***1.4.2. Качество поверхности***

Из-за постоянного обновления абразивных зерен усилия резания при электроабразивной обработке в 1,5 ... 2,0 раза ниже, чем при шлифовании. При этом снижается наклеп поверхности, не образуются микротрещины. Металл, снимаемый с заготовки, не налипает на инструмент – исключается сильный нагрев из-за трения контактных поверхностей и не возникают местные прижоги. Такие



дефекты особенно опасны для высоконагруженных деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок (зубчатых колес, элементов шлицевых соединений). Отсутствие шлифовочных прижогов позволяет повысить ресурс деталей. Шероховатость поверхности после электроалмазной и электроабразивной обработки уменьшается из-за анодного растворения вершин микронеровностей. Средняя высота неровностей  $R_z$ , может быть определена по зависимости  $R_z = K \cdot R_{zш}$  где  $R_{zш}$  – высота неровностей после шлифования;  $K$  – коэффициент, учитывающий скругление выступов при наложении тока.

С целью повышения точности при шлифовании последние ходы обычно выполняют без тока и тогда шероховатость электроабразивной и электроалмазной обработки близка к получаемой после шлифования инструментом той же зернистости. Если применяют электронейтральный инструмент, то обработку все время выполняют, не выключая тока. Это обеспечивает получение минимального наклепа, отсутствие прижогов поверхности, снижение высоты неровностей до  $R_a = 0,1 \dots 0,15$  мкм.

При обработке свободным абразивом удастся получить шероховатость штампованных или литых деталей не ниже  $R_a = 4,5$  мкм. Такие операции позволяют механизировать ручной труд при доводке труднодоступных поверхностей.

### ***1.4.3. Производительность***

Все комбинированные методы ускоряют процесс съема металла. При черновых режимах электроабразивной обработки съем металла происходит в основном за счет эрозии. Процесс близок к электроэрозионному. Скорость съема можно оценить по зависимости:

$$Q = kI, \quad (1.4)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий материалы электродов, режим обработки и долю съема за счет анодного растворения и абразивного воздействия инструмента.

Черновая обработка выполняется при повышенных напряжениях. При чистовых режимах съём металла абразивными зёрнами и эрозией снижается, но возрастает доля анодного растворения. Расчёт скорости съёма металла выполняют по формуле, вытекающей из выражения:

$$Q = \varepsilon \eta_1 \chi U / (\rho s S), \quad (1.5)$$

где  $S$  – площадь обрабатываемой поверхности;  $\eta$  – выход по току с учетом механической депассивации поверхности и скорости перемещения инструмента.

Если электроабразивное или электроалмазное разделение выполняется периферией круга, то скорость съёма металла находят через силу тока  $I$  и напряжение  $U$  на электродах:

$$Q = k' IU, \quad (1.6)$$

где  $k'$  – коэффициент, учитывающий условия протекания процесса (электролит, скорость на периферии круга и др.).

При использовании электронейтрального инструмента скорость съёма возрастает из-за анодного растворения и, главное, из-за интенсификации процесса резания абразивным инструментом. Поэтому расчёт производительности выполняют, как при шлифовании, а влияние тока учитывают коэффициентом, который может изменяться в широких пределах и зависит от свойств обрабатываемого материала.

Производительность процесса электро-абразивной обработки с применением свободного абразива или наполнителя в несколько раз выше, чем при аналогичных операциях механической обработки. При использовании свободного абразива в схеме шлифования скорость съёма металла находят по зависимостям обработки электронейтральным инструментом. Если обрабатывают удаленные от электрода с твердым токоведущим наполнителем участки поверхности, то производительность возрастает в десятки раз по сравнению с анодным растворением без наполнителя.

Сочетание анодного растворения и механического (абразивного) воздействия на заготовку значительно расширяет использование электрохимических процессов для размерной обработки [92]. В настоящее время электроабразивную обработку (ЭАО) применяют во многих технологических процессах для шлифования, затачивания, полирования и галтования (табл. 1.2).

Таблица 1.2

**Технологические показатели ЭАО**

Разновидность анодно-абразивной обработки	Абразивный инструмент	Технологические показатели			
		объемная производительность, мм/мин	линейная скорость съема, мкм/мин	класс шероховатости поверхности, $R_z$ мкм	относительный износ инструмента, %
Электроалмазное разделение	Алмазные круги на металлической связке	2000	—	10	0,1..0,2
Электроабразивное разделение	Графитированные круги	120	–	10	20 ... 40
	Металлоабразивные круги	4000	–	10	0,05 ... 0,1
Электрохонингование	Абразивные бруски	–	20	11	10 ... 20
Суперфиниширование	Электропроводные бруски	–	10	12	10 ... 20
Электро-абразивное полирование	Суспензия из мелкозернистого абразива	–	10	13	–
Электро-абразивное галтование	Несвязный абразив	–	20	7	0

Процессам, объединяемым в группу ЭАО, соответствуют различные по своей физической сущности способы удаления металла. На поверхности ЭЗ могут производить воздействия: электрический ток, вызывающий анодное растворение; механическая сила, которая создается частицами абразива, осуществляющими резание или царапание поверхности; тепловой поток, приводящий к плавлению (термической эрозии) поверхностного слоя ЭЗ. Комбинирование этих воздействий и применение различных приемов их подачи на поверхность ЭЗ приводят к упомянутому выше раз-

нообразию процессов ЭАО, которые делят по крайней мере на две группы: с использованием монолитного абразивного ЭИ и с применением жидкости, содержащей абразивные частицы (см. табл. 1.2).

## **1.5. Конструкции оборудования и средств автоматизации для электрических методов обработки**

### ***1.5.1. Силы, действующие на элементы конструкции***

Может показаться, что при существовании зазора между инструментом и деталью в процессе электрохимической обработки отсутствуют какие-либо силы, способные вызвать деформацию элементов станка и приспособлений, и поэтому можно использовать нежесткие конструкции. В действительности необходимо учитывать влияние электромагнитных, гидростатических и гидродинамических сил.

Электромагнитные силы. В любой точке электрического проводника, по которому протекает ток, действуют силы магнитного поля. В длинном ровном цилиндрическом проводнике радиусом  $r$  сила действует по радиусу внутрь и эквивалентна давлению

$$p = \frac{\mu I^2}{100\pi r^2}, \quad (1.7)$$

где  $I$  – сила тока в проводнике;  $\mu$  – магнитная проницаемость проводника.

С учетом плотности тока  $I$

$$p = \frac{\mu A I^2}{100}, \quad (1.8)$$

где  $A$  – площадь поперечного сечения.

При постоянной плотности тока давление пропорционально площади проводника. В жидком проводнике с удельной магнитной проницаемостью, это давление небольшое; при площади  $45 \text{ см}^2$  и

токе 1500 А оно равно примерно  $0,003 \text{ кгс}\cdot\text{см}^{-2}$ . Однако для электродов с ферромагнитными свойствами и проницаемостью, равной 1000, давление могло бы достигать  $0,3 \text{ кгс}\cdot\text{см}^{-2}$ .

Фактическое магнитное поле в узком зазоре между инструментом и деталью будет зависеть от магнитной проницаемости электродов и геометрических параметров зазора.

Гидростатические силы. Электролит в зазор можно подавать либо в направлении, перпендикулярном поверхности обрабатываемой детали через полый электрод, либо параллельно обрабатываемой поверхности. В любом случае среднее давление в зазоре между инструментом и деталью равно примерно половине подводного давления электролита. Таким образом, для станка с площадью обрабатываемой поверхности  $53\times 23 \text{ см}$  и давлением подводного электролита  $3,0 \text{ кгс}\cdot\text{см}^{-2}$  разжимающая сила в зазоре приблизительно равна 2000 кгс.

Гидродинамические силы. Если электролит подается через полый инструмент и растекается по поверхности детали равномерно во всех направлениях, тогда в расчете сил, действующих на инструмент и деталь, не учитывается сила, направленная параллельно зазору. Если электролит подается в зазор параллельно поверхности детали, то в результате сил трения на инструмент и деталь действуют силы, равнодействующая которых совпадает с направлением потока. В приведенном примере давление на входе в зазор будет равно  $3,0 \text{ кгс см}^{-2}$ , и, полагая, что электролит подается в направлении наименьшего размера детали в промежутке, равный 0,125 мм, на инструмент и деталь будут действовать силы 1,135 кгс. Однако на практике эти силы, вероятно, должны быть гораздо больше, чем указанная, потому что часть кромок инструмента и детали будут воспринимать полное гидростатическое давление.

Из приведенных рассуждений видно, что элементы электрохимических станков и оборудование для комбинированной обра-

ботки воспринимают значительные силы в направлении, перпендикулярном рабочему зазору, и их необходимо учитывать при проектировании оснастки и самих станков. Относительное смещение между инструментом и деталью вследствие упругих деформаций узлов и приспособлений зависит не только от упругости системы (СПИД), но и от величины давления электролита; итак, давление необходимо контролировать, особенно к концу процесса обработки. Чем жестче конструкция, вспомогательные узлы и приспособления, тем меньше погрешностей возникает в результате действия этих сил. Вследствие асимметричного расположения электродов относительно шпинделя равнодействующая сила может быть направлена под углом к направлению подачи. Приспособления необходимо конструировать так, чтобы они обладали соответствующей жесткостью в поперечных направлениях, в противном случае возникают погрешности формы. Рабочие зазоры обычно выбирают в диапазоне 0,125 – 0,5 мм, и отклонения из-за деформаций системы порядка 0,025 мм влияют на точность обработки. Следовательно, необходима высокая степень жесткости в направлении, перпендикулярном поверхности детали. На относительное смещение инструмента и детали влияет и изменение температуры. Поэтому необходимо тщательно контролировать, температуру электролита.

Кроме постоянных, нужно учитывать и переменные силы. Такие силы могут возникать в результате пульсации потока электролита (что определяется характеристикой применяемого насоса), изменения скорости подачи электрода или интенсивного выделения газа в зазоре, и если они возникают, то связанные с ними вибрации элементов станка приводят к изменению зазора. Иногда необходимо применять устройства, которые фиксировали бы наличие вибраций, и если она существенна, приостанавливали бы процесс обработки.

### ***1.5.2. Защита от коррозии конструктивных элементов оборудования***

Рассмотрим три основных элемента [16] электрохимического станка, которые наиболее подвержены коррозии:

1) рабочие поверхности, близко расположенные к катоду и обрабатываемой детали (рабочая камера и базовые поверхности детали и приспособления);

2) конструктивные элементы станка, удаленные от рабочей камеры, например станина, державка инструмента и т.д.;

3) вспомогательное оборудование, в которое входит насос для подачи электролита и трубопроводы (рабочая камера и базовые поверхности детали и приспособления).

Когда электролит протекает по поверхности детали, как, например, при формообразовании лопаток, то его поток необходимо ограничить до размеров рабочего зазора. В этом случае направляющие для потока и фактически вся рабочая камера могут быть изготовлены из блоков акрилового пластика или плексигласа. Этот материал не реагирует с растворами кислоты и щелочи, и рабочая камера может быть достаточно жесткой, чтобы выдержать давление электролита. Этот же материал может быть использован тогда, когда электролит подводится перпендикулярно поверхности детали и отводится через полый электрод, как при прошивке отверстий с реверсированием потока. При обработке без реверсирования потока электролит подается через полый электрод и при выходе из зазора находится под атмосферным давлением. В этом случае ограждение является только предохранением от разбрызгивания и конструкция его может быть не жесткой; например, лист из полиэтилена окажется вполне удовлетворительным. В некоторых случаях рабочую камеру желательно изготавливать из металла. Для этих целей можно использовать низкоуглеродистые стали при условии, что внутренние стенки будут надежно защищены. Покрытия из смолы должны быть надежными, и в этом случае можно рекомен-

довать нерастворяющиеся эпоксидные смолы. Чтобы довести до минимума коррозию рабочей камеры, когда станок не работает, желательно в конце обработки промывать ее водой. Электроды иногда проектируют таким образом, чтобы уплотняющие кольца под давлением электролита прижимались к поверхности детали и инструменту, обеспечивая полную герметизацию рабочей зоны, без применения дополнительных ограждений.

Материал, используемый для изготовления зажимов детали во время обработки, подвергается анодному травлению, и поэтому лучше использовать титан вследствие его анодной пассивности. Образцы, в которых прошивались глубокие отверстия, были зажаты в титановый блок: через это приспособление к образцам подводился ток и в процессе обработки поверхность титана не подвергалась травлению. Другим примером могут служить титановые патроны, применяемые при электрохимической заточке.

Такие элементы, как головки болтов, могут быть защищены органическими покрытиями, например, полиэтиленом или эпоксидными смолами.

В присутствии электролита на разнородных металлах, находящихся в контакте, особенно когда станок не работает, может наблюдаться сильная биметаллическая коррозия. Поэтому важно, чтобы контактирующие металлы не очень отличались по своим электрохимическим потенциалам. Например, металлы, находящиеся в контакте, должны быть подобраны таким образом, чтобы напряжение образующегося гальванического элемента не превышало 0,25 В.

Рабочая камера [23], в которой находятся инструмент и деталь, содержит значительный объем электролита, способного вступить в контакт с элементами станка, благодаря неизбежному разбрызгиванию его и осаждению на незащищенные поверхности. Коррозия может быть значительной из-за свободного доступа воздуха к поверхности металла, а также способности осевшей жидко-



сти к испарению, что, в свою очередь, повышает концентрацию коррозионной среды.

Элементы станка, находящиеся в непосредственной близости от рабочей камеры, могут быть изготовлены из коррозионно-стойкого материала, например, нержавеющей стали, но их, вероятно, лучше делать из чугуна или низкоуглеродистой стали и защищать краской или пластмассовым покрытием. Защитные покрытия на большие поверхности наносятся щеткой или распылением. В качестве примера можно привести хлоркаучук, который на подготовленную поверхность металла наносят в следующем порядке: грунтовка, нижнее и верхнее (последнее) покрытия. Толщина всего покрытия приблизительно равна 0,25 мм. Эпоксидные и полиуретановые покрытия также оказываются удовлетворительными. Необходимо часто мыть стенки, так как немногие покрытия обеспечивают полную защиту в течение длительного времени. Направляющие станков, например электрохимического токарного и прошивочного, покрывают смазкой, которая защищает открытые поверхности, и ее защитные свойства могут быть повышены добавлением ингибиторов.

Дополнительно для защиты длинных трубопроводов, проложенных под землей: он заключается в сдвиге потенциала защищаемой конструкции по сравнению со вспомогательным анодом с получением отрицательных значений с помощью внешней э.д.с.

### ***1.5.3. Вспомогательное оборудование***

Насос электрохимического станка [92] может быть центробежного типа; рабочее колесо и кожух могут быть изготовлены из графита, керамики или нержавеющей стали, но покрытие металла не исключается, так как покрытия устойчивы к сильной турбулентности. Поршневые плунжерные или ротационные насосы необходимо изготавливать с повышенной точностью для получения удовлетворительных характеристик; их обычно не защищают по-

крытиями, так что в этом случае нужно использовать коррозионно-стойкие материалы. Довольно стойким считается сплав лангголой 5R, но даже низкая скорость коррозии его в кислотных растворах может быть достаточно большой, чтобы сильно повлиять на работоспособность определенных типов насосов, например поршневых.

Когда используют нейтральные растворы, можно применять такие материалы, как нержавеющая сталь, монель-металл, оружейные стали и определенные типы алюминиевой бронзы. Насосы, изготовленные из титана, могут непрерывно пассивироваться анодным потенциалом, и небольшой центробежный насос с анодным потенциалом проработал вполне удовлетворительно в горячем 50 %-ном водном растворе серной кислоты. Незащищенный титан корродирует в этой среде со скоростью примерно  $25,4 \text{ мм год}^{-1}$ , но наложение небольшого положительного потенциала уменьшает коррозию до  $0,002 \text{ мм год}^{-1}$ . Расход энергии при этом составляет только 3 Вт на  $100 \text{ м}^2$  погруженного титана.

Резервуары для электролита изготавливают из пластических материалов, например полиэфира или эпоксидных смол, армированных стеклом или даже из полиэтилена, в тех случаях, когда не важна прочность. Более высокую прочность, однако, обеспечивают стальные или бетонные резервуары, облицованные поливинилхлоридом или смолой.

Трубопроводы, выдерживающие максимальные давления  $0,6 \text{ кгс см}^{-2}$ , изготавливали из жесткого поливинилхлорида, но там, где требуется эластичность, оказался пригодным пластифицированный поливинилхлорид, армированный нейлоновыми кольцами. Эти материалы также можно с успехом использовать при работе под высокими давлениями при условии применения жестких соединений; для очень высоких давлений рекомендуется, например, стальной трубопровод, облицованный синтетической смолой.

Клапаны изготавливают из поливинилхлорида, но для более высокой прочности предпочитают металлы. Титан или ланголлой 5R пригодны для кислотных электролитов, а нержавеющая сталь, монель и некоторые медные сплавы – для солевых растворов. Можно использовать также обычные металлы, но при условии, что изнутри они должны быть покрыты стеклом или хлорированным полиэфиром, известным под названием «пентон».

Фильтры для очистки кислотных электролитов целесообразнее изготавливать из керамических материалов, а для солевых растворов из коррозионностойких фиброматериалов, например стеклоткани.

Кожухи для вспомогательного оборудования, например фильтров, можно делать из жестких пластмасс, в зависимости от требуемого размера и прочности, хотя можно использовать и металлы при условии, что они защищены таким же образом, как и части станка.

#### ***1.5.4. Типовая структура оборудования [92]***

По структуре станки для ЭХО близки к агрегатным. Они включают стандартные узлы: источник питания, насос, ванны для хранения электролита и промывочно-пассивирующих жидкостей, устройство для очистки электролита, элементы управления. Механическая часть станка всегда оригинальна, она содержит элементы для установки и крепления деталей, механизмы подачи электродов-инструментов, системы подвода рабочего напряжения и электролита. Для проектирования любого электрохимического станка необходимо рассчитать параметры источника питания, насоса, ванны для электролита, выбрать средства очистки жидкости от продуктов обработки, разработать элементы механической части станка, выбрать систему регулирования межэлектродного зазора. Стандартные узлы обычно рассчитывают для группы обрабатываемых деталей и выбирают из числа серийно выпускаемых. Нестан-

дартные узлы и детали также рассчитывают, проектируют и изготавливают для конкретного вида обрабатываемых поверхностей и схемы обработки.

Затраты на создание нового типа станков для ЭХО складываются из: а) стоимости проведения поисковых исследований, разработки технического задания и технико-экономического обоснования создания оборудования, проектирования оригинальной механической части и общей компоновки (около 50 % всех затрат); б) стоимости комплектующих стандартных узлов: источника питания, насоса, ванн, устройства для очистки электролита, электрооборудования ( $\approx 15$  %); в) стоимости изготовления механической части, ее сборки и наладки ( $\approx 20$  %); г) стоимости доводки узлов и технологического процесса ( $\approx 15$  %).

Источники питания (ИП) электрохимических станков преобразуют переменное напряжение электрической сети в постоянное или униполярное импульсное. В отдельных случаях для ЭХО используют и переменный ток. Но во всех случаях, кроме обработки струйным методом, выходное напряжение источника питания обычно не превышает 36 В. Сила тока может достигать 30 000 А (в зависимости от мощности ИП). Источники могут быть со ступенчатым и плавным регулированием силы тока или напряжения, со стабилизацией выходных параметров. Источники бывают двух видов: электромеханические и статические. Электромеханический ИП представляет собой механически связанные электродвигатель, и генератор, вырабатывающий ток требуемого напряжения. При работе генератора возникают шум, вибрации, электромеханические ИП сложны в обслуживании, имеют низкий КПД и в настоящее время используются редко.

Благодаря развитию выпрямительной техники были созданы статические источники питания на селеновых и кремниевых выпрямителях. Наиболее перспективными являются источники с управляемыми выпрямителями, называемыми тиристорными пре-

образователями, с системами защиты от перегрузок. Некоторые преобразователи позволяют менять полярность напряжения на выходе, их называют реверсивными.

Системы подачи электролита. Если процесс ЭХО протекает в течение нескольких секунд, например, при маркировании деталей по схеме с неподвижными электродами, то электролит не успевает загрязниться продуктами обработки. В этих условиях электролит не прокачивают. При времени процесса до 8 ... 10 с для перемещения электролита могут быть использованы ультразвуковые или низкочастотные вибрации электродов или влажные ленты, перемещаемые через межэлектродный зазор. Если обрабатывают детали, предназначенные для перемещения газов или жидкостей (крыльчатки компрессоров, насосов шнеков и др.), то электролит можно перемещать за счет вращения самой заготовки. Жидкость протекает по зазору между электродами со скоростью, регулируемой частотой вращения заготовки. В остальных случаях используют насосы. При небольших расходах электролита, например для прошивания отверстий малого диаметра, применяют прокачку с помощью пневмонагнетателей (рис. 1.11).

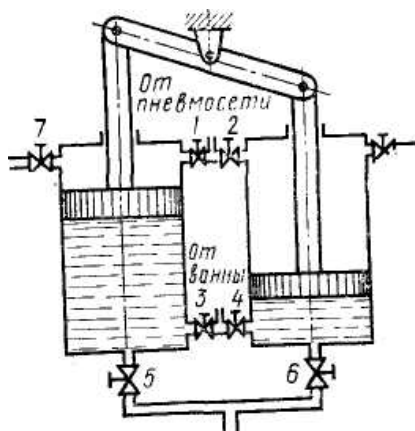


Рис. 1.11. Схема подачи рабочей среды пневмонагнетателем

Пневмонагнетатели позволяют получить высокое давление электролита без использования электропривода. Однако они обладают малой производительностью, а также низкой надежностью при плохой очистке электролита.

Наиболее широко применяются центробежные насосы, выполняемые из нержавеющей стали. Они не боятся загрязнения перекачиваемой жидкости и надежны в работе. Для подбора промышленного насоса необходимо рассчитать его напор и подачу.

Агрегаты очистки электролита от продуктов обработки. При ЭХО в электролите происходит накопление продуктов обработки. При малых межэлектродных зазорах в загрязненном электролите между электродом-инструментом и деталью происходят пробой промежутка и короткое замыкание. При нормальном протекании процесса ЭХО допустимая массовая концентрация твердых продуктов обработки в электролите зависит от размера зазора:

Системы регулирования режима ЭХО. В качестве основного параметра режима в зависимости от схемы обработки используют:

- при неподвижных электродах – постоянную плотность тока;
- при ЭХО заготовок с постоянной площадью обрабатываемой поверхности – постоянную силу тока;
- при необходимости удалить определенный объем металла – количество электричества;
- в случае обработки заготовок с переменной площадью – минимальный межэлектродный зазор.

Критически анализ вышерассмотренных опубликованных работ показывает:

1. Применяемые методы разделения металлов позволяют, в основном, выполнять заготовительные операции, где не требуется высокая точность и качество поверхностного слоя, которые обеспечиваются на последующих этапах обработки, требующих значительных припусков на процесс, имеющих высокую трудоемкость и удельную энергоемкость.

2. Электроэрозионная обработка непрофилированным электродом обеспечивает точность процесса, но требует последующих операций для достижения заданной чистоты. Кроме того она на порядок более трудоемкая по сравнению с резкой вулканитом или армированным диском, что делает ее не эффективной для серийного производства.

3. Разделение вулканитом или армированным диском, повышает на порядок и выше потери материала и не обеспечивает стабильных показателей по точности реза, что вызывает необходимость в чистовых операциях.

4. Известные конструкции дискового инструмента для разделения дают большую ширину паза или не обеспечивают требуемой точности процесса, качества поверхностного слоя.

5. Имеющееся оборудование для разделения материалов не оснащено требуемыми средствами автоматизации процесса, в том числе элементами адаптивного управления с корректировкой режимов по заданным закономерностям.

6. Применение анодной составляющей в комбинированном процессе значительно снижает силы резания от механического воздействия при разделении металлов, что позволит ускорить процесс без нарушения точности и качества поверхностного слоя.

7. Управление комбинированным процессом разделения металла возможно за счет изменения анодной составляющей в широких пределах, что даст снижение сил резания и исключив дефекты (сколы, заусенцы) на выходе из зоны резания инструментов для любых металлов.

8. Управление комбинированным процессом возможно независимым изменением параметров химической и механической составляющей с ограничениями их предельных значений. Целью управления может стать оптимизация технологических режимов, объединяющая все составляющие комбинированного процесса.

9. Управление процессом возможно при использовании адаптивных систем, работающих по известному механизму взаимодействия элементов технологической системы с ограничениями по предельной погрешности поверхности разделения металла и допустимой микрошероховатости.

10. Адаптивные системы оборудования позволяют осуществлять обратные связи и выполнять оперативную корректировку режимов по выбранным воздействиям в зависимости от свойств разделяемого металла и требований в изделию.



## **Глава 2. ПУТИ СНИЖЕНИЯ РАСХОДА МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ РАЗДЕЛЕНИИ КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ ОБРАБОТКИ**

### **2.1. Основы выбора метода обработки**

Для разрезания дефицитных металлических материалов используются, как традиционные способы механической обработки, так и новые виды электроискровой, электроконтактной, ультразвуковой, электрохимической, электроалмазной методы резки, технико-экономические характеристики которых приведены на рис. 2.1 – 2.3. При этом на всех графиках цифра I характеризует электроискровой, II – электроконтактный, III – ультразвуковой, IV – электрохимический, V – механические, VI – электроалмазный метод обработки заготовок из конструкционных сталей. Приведенные на рисунках диаграммы характеристик видов обработки позволяют выбрать наиболее оптимальный метод, удовлетворяющий требованиям чертежа и технических условий на изготовления детали при минимальных издержках производства. На рис. 2.1 представлены диаграммы знаний производительности сравниваемых методов при наименьшей (*a*) и наибольшей (*б*) шероховатости обрабатываемой поверхности. На рис. 2.2 изображены диаграммы шероховатости обработанных поверхностей при наименьшей (*a*) и наибольшей (*б*) производительности процесса. На рис. 2.3 приве-

дены данные по точности обработки, энергоемкости процессов, износу инструмента и глубине измененного слоя.

Поскольку приведенные диаграммы относятся к обработке деталей из конструкционных сталей, то при обработке высокопрочных, жаропрочных, магнитных сплавов и материалов параметры процессов по сравниваемым характеристикам значительно лучше при применении электрических методов обработки, особенно комбинированной-электроалмазной, будем рассматривать их показатели.

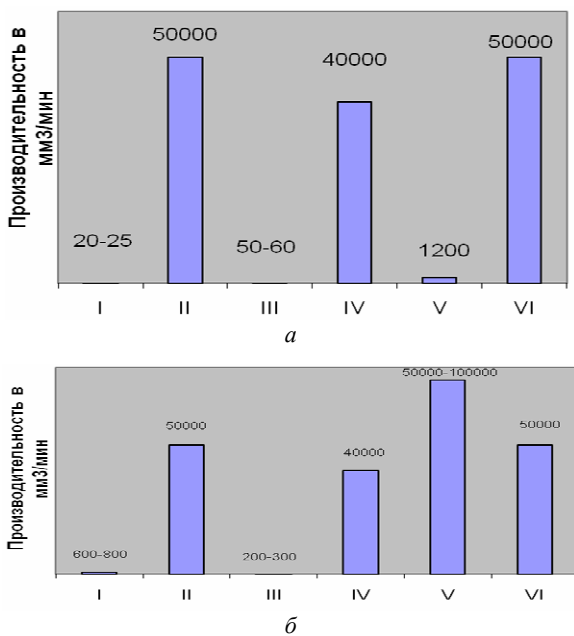


Рис. 2.1. Характеристики производительности обработки резанием

Стоимость материалов в машиностроении составляет от 40 до 80 % общей себестоимости продукции. Поэтому снижение удельного расхода материала на единицу продукции имеет боль-

шое народно-хозяйственное значение. В нашем случае, при выборе метода обработки, экономии материала в процессе резания можно достичь применением инструмента с минимальной толщиной и минимальной глубиной измененного слоя после обработки. Минимальная толщина используемых инструментов для всех электрических методов обработки сопоставимы и не превышает  $t = 1$  мм. Сравнивая характеристики рассматриваемых методов обработки по глубине измененного слоя рис. 2.3, б находим, что электроконтактная обработка дает максимальную глубину измененного слоя по сравнению со всеми видами, вследствие его мы можем исключить из рассмотрения, как неконкурентоспособный процесс.

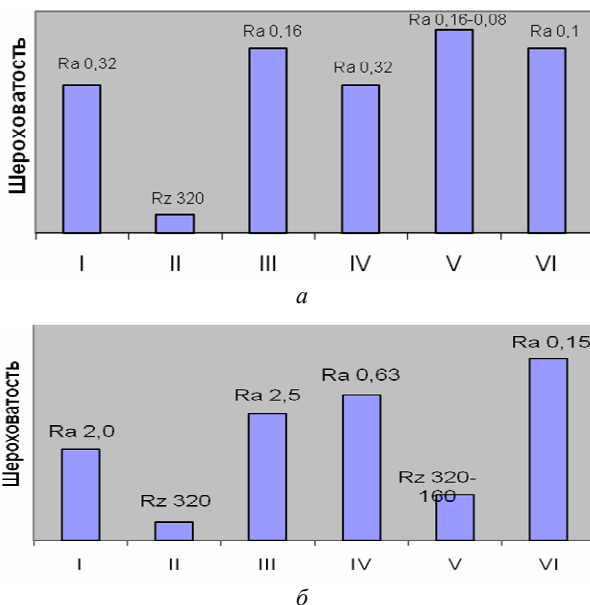
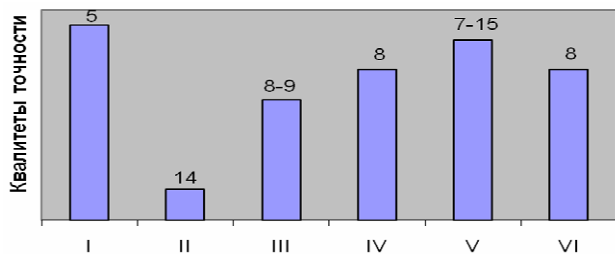
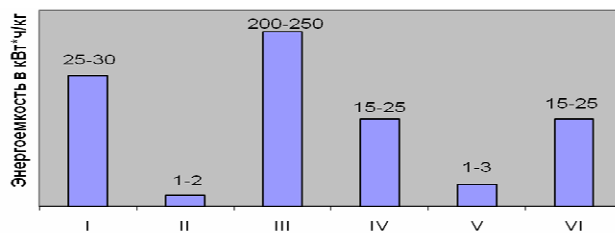


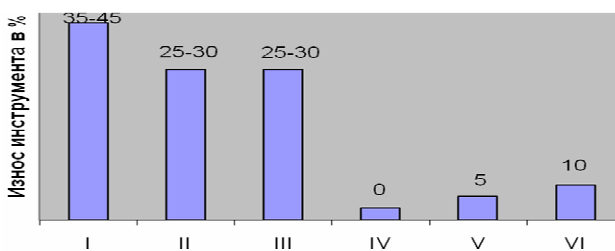
Рис. 2.2. Сравнительные характеристик и методов обработки по шероховатости поверхности



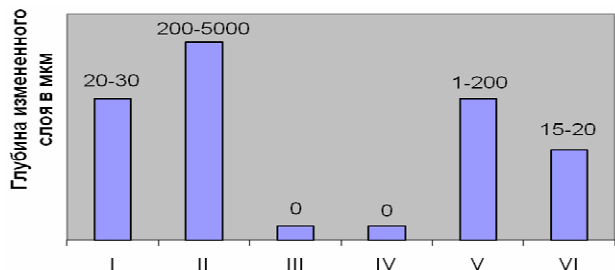
a



б



в



г

Рис. 2.3. Сравнительные характеристики методов обработки по точности, энергоемкости, износу инструмента, глубине измененного слоя

Электроискровой и ультразвуковой методы обработки имеют незначительную производительность процесса, поэтому предпочтительнее выбирать для разделения заготовок и обработки прямолинейных каналов электроалмазную обработку.

## **2.2. Способы управления стабильного резания при комбинированном разделении заготовок**

Электроалмазная резка выполняется по схемам, аналогичным электрообразной (см. рис. 1.9), и в основном применяется для обработки деталей из сверхтвердых и хрупких материалов (вольфрама, молибдена и их сплавов). Обычно процесс резания ведут с вращением электрода-инструмента и с неподвижной обрабатываемой заготовкой.

Электрод – инструмент – алмазный круг изготавливают на металлической основе. Алмазные зерна размерами от 30 до 150 мкм располагают по периферии круга и закрепляют гальванический.

Алмазные зерна круга выполняют две функции: предотвращают возможность непосредственного электрического контактирования основы инструмента с заготовкой, тем самым повышают плотность тока, кроме того, механически ускоряют удаление образовавшихся продуктов растворения.

При электроалмазной обработке можно установить режимы как с преимущественным механическим съемом, так и с преимущественной электрообработкой. Обычно доля механического съема составляет 50 ... 60 %. Технологические показатели процесса электроалмазной резки зависят от долевого соотношения механической и электрической составляющих и их необходимо устанавливать исходя из конкретных требований, изложенных в чертежах и в технических условиях на изготавливаемую деталь.

Одним из основных преимуществ процесса электроалмазной резки является применение при обработке тонкого дискового инструмента, толщиной от 0,3 до 0,6 мкм.

Однако, применяемый в процессе резания тонкий нежесткий дисковый инструмент может терять устойчивость (стабильность) формы под влиянием усилия подачи. Кроме того, в процессе электроалмазной резки боковые поверхности обрабатываемого пореза имеют характерный склон V-образной формы, вследствие анодного растворения.

Для избежания указанных недостатков авторами при разработке гибких автоматизированных модульной конструкции станков использованы ряд технических решений на уровне изобретений (А.С.1016129, 1641539, 1641540, 1653920, 1657303).

Технологический процесс на этих станках строится с учетом реализации режимов обработки по управляющим координатам. В модуле предусмотрено 6 рабочих управляющих координаты, которые рассмотрены ниже.

Координата I – управление образованием направляющей лунки необходимо для обеспечения вертикального вхождения нежесткого диска в тело заготовки путем подачи в межэлектродный зазор  $h$  электролита и напряжения  $V$  от дополнительного источника питания, регулируемое по закону

$$V = kh, \quad (2.1.)$$

где  $k = 70$  В/мм

Графическое пояснение приведено на рис. 2.4.

На участке  $AB$  осуществляется сближение инструмента к заготовке, где напряжение от дополнительного источника питания регулируется пропорционально величине зазора между ними с коэффициентом пропорциональности  $k = 70$  В/мм. В момент контакта диска заготовкой в точке  $B$  отключают дополнительный источник питания и далее напряжение питания рождается рабочее ( $V_p$ ).

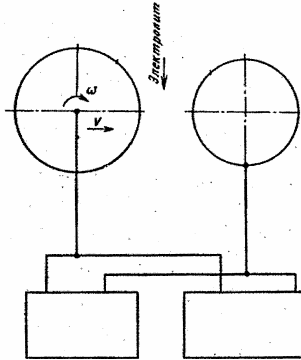


Рис. 2.4. Подача электролита в межэлектродный зазор

Таким образом формируется «лунка» для осуществления плавного, вертикального вхождения инструмента в заготовку по А.С.1016129.

Координата II Управление врезанием диска в заготовку с минимальным боковым биением инструмента осуществляется по А.С.1641539.

На рис. 2.5 боковые поверхности вращающегося диска 1, врезаемого в заготовку 2 подают электролит через форсунки 3 с давлением  $P_1$  и  $P_2$ . Боковое биение диска контролирует токовихревые датчики 4. Вторичный преобразователь 5 биений вырабатывает напряжение  $\Delta u$ , величина которого пропорциональна амплитуде биений. Напряжение  $\Delta u$  поступает на генератор б питания регулятора 7 давление электролита. Регуляторы давления работают в противофазе, при этом дисковый инструмент находится под воздействием изменяющегося давления электролита, то обеспечивают компенсацию биений.

Координата III. Управление скоростью подачи дискового инструмента.

На рис. 2.6 приведена схема устройства для осуществления способа управления скоростью подачи алмазного диска по АС.1653920 способ осуществляют следующим образом.

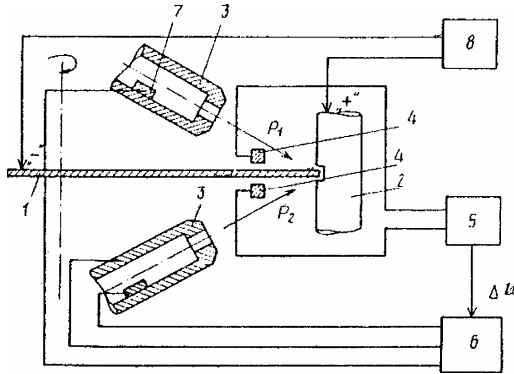


Рис. 2.5. Схема стабилизации диска струей электролита

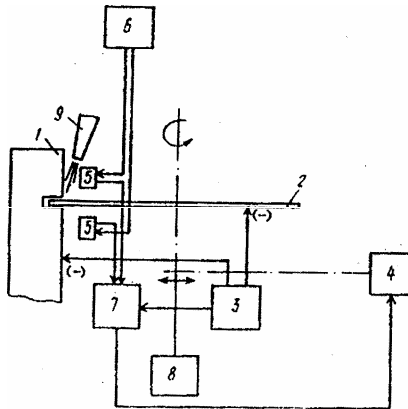


Рис. 2.6. Контроль положения диска по скорости подачи на врезание

На источнике питания 3 устанавливают напряжение холостого тока 6/10 В. Включают привод 8 для вращения дискового инструмента, подключенного к отрицательной полярности источника питания 3.

С дифференциального токового датчика 5, запитываемого напряжением высокой частоты порядка 1,5 мГц снимают сигнал в виде напряжения, пропорционального комплексному сопротивлению катушек датчика, которое зависит от величины наведенных



вихревых токов в поверхностном слое токопроводящего диска 2. Напряжение с токовихревого датчика поступает на вход компаратора 7, сравнивается с величиной опорного напряжения, выходной сигнал от компаратора поступает на управляемый электропривод 4 скорости подачи алмазного диска, тем самым изменяют величину подачи круга.

Координата IV. Управление положением режущей части алмазного диска в пазу (в процессе резания) осуществляется по авторскому свидетельству 1641540 применением электродов-инструментов выполненных составным из нескольких дисков, наложенных друг на друга с эксцентриситетом относительно оси вращения, что позволяет периодически создавать в зоне обработки увеличенный торцевой и боковой зазоры за счет плавного изменения величины снимаемого слоя материала. Предложенный способ управления положением режущей части диска в пазу обеспечивает стабильность обработки путем гашения боковых колебательных перемещений периферии за счет симметричного их расположения относительно плоскости совмещения дисков. Попеременное смещение режущей части каждого диска в сторону стенок паза исключает V-образность формы паза и позволяет получать пазы с вертикальными стенками.

Электрод-инструмент выполненный составным из двух и более дисков, наложенных друг на друга с эксцентриситетом относительно оси вращения позволяет периодически создавать в зоне обработки увеличенные зазоры и тем самым промывать зону обработки свежим электролитом интенсифицируя электрохимическое растворение обрабатываемого материала и в следующий период обеспечивается механическое резание и вынос продуктов обработки.

Координата V. Управление стабилизацией формы диска позволяет исключить воздействия случайных факторов, вызывающих изгиб диска. Способ раскрыт в А.С.1657303 рис. 2.7. Использование этой координаты необходимо при разделении заготовок в кас-

сете, когда приходится увеличивать диаметр диска на глубину разделения нескольких рядов заготовок. Обработку ведут сборным инструментом из двух электрически изолированных друг от друга дисков 1 и 2. Каждый диск автономно подключают к источнику тока 7 через регуляторы 5 и 6. При превышении допустимой величины изгиба инструмента уменьшают до устранения изгиба, величину напряжения, подаваемого на этот диск в сторону которого произошел изгиб в теле заготовки 4. Управление процессом выполняется по сигналу дифференциальных датчиков 8 деформации диска и вторичного преобразователя 9, подающего сигнал управления амплитудой напряжения на этот из дисков 1 или 2 в сторону которого произошел изгиб.

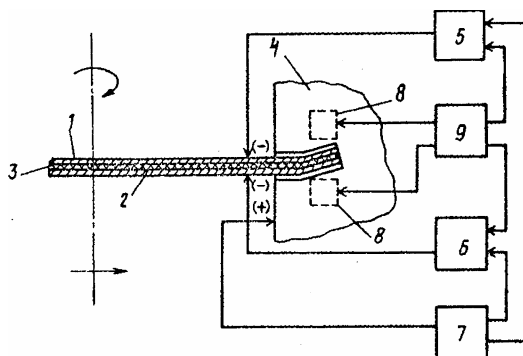


Рис. 2.7. Схема разделения материала сборным электродом

### Координата VI. Управление калибровкой стенок паза.

Как показано на рис. 2.8, *a* в процессе разделения материалов возникает погрешность поверхности пазы, что ограничивает технологические возможности при разделении заготовок с повышенным сечением.

Нами предложен способ калибровки боковой поверхности, позволяющий снизить остаточную погрешность от воздействия электрического поля до 1-3 мкм при увеличении потерь материала не более чем на 5 %.

Схема осуществления способа приведена на рис. 2.8.

Условием осуществления способа по рис. 2.8. является удержание отрезанной части заготовки (слева на рис. 2.8), что технически является осуществимым.

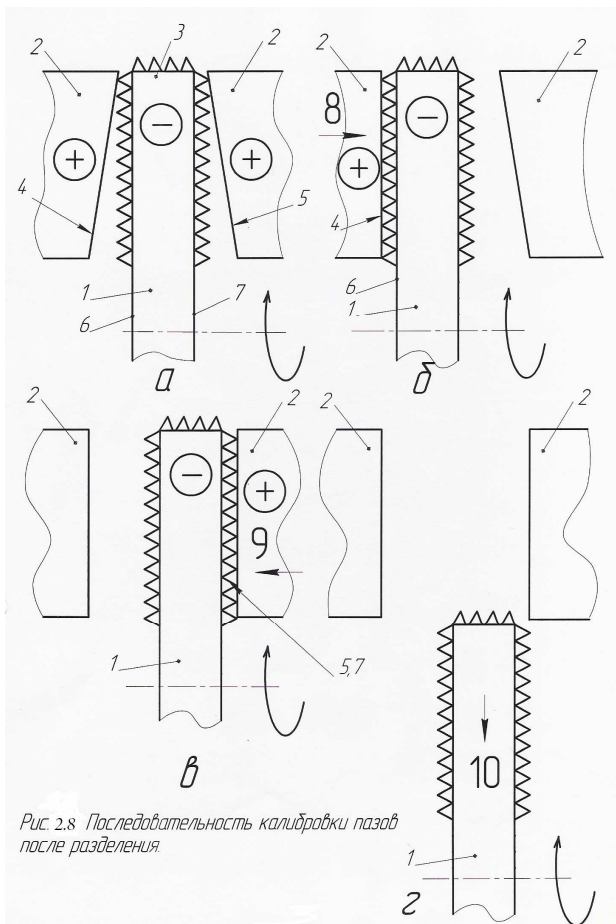


Рис. 2.8 Последовательность калибровки пазов после разделения

На рис. 2.8, а показано положение инструмента 1 в момент выхода его из заготовки 2. Инструмент может быть выполнен в форме диска или ленты и перемещается относительно заготовки 2

(вращение, продольное движение). На наружной поверхности инструмента закреплены абразивные зерна 3. Инструмент 1 подключен к отрицательному, а заготовки 2 к положительному полюсу источника тока. Разделяют заготовку 2 при прямой подаче инструмента 1 в сторону заготовки 2 до окончания разделения. Далее прямую подачу инструмента 1 отключают. После разделения боковые поверхности 4 и 5 зоны разделения заготовки 2 имеют уклоны (или конусы образованные при вращении заготовки 2), вызванные анодным растворением боковыми поверхностями 6 и 7 инструмента 1 в период разделения заготовки 2.

На рис. 2.8, б пояснено направление перемещения 8 заготовки 2 перпендикулярно направлению подачи инструмента 1 в направлении боковой поверхности 4 зоны разделения до соединения с боковой поверхностью 6 инструмента 1. Процесс перемещения заканчивается при стабилизации величины технологического тока, поступающего на инструмент 1 и заготовку 2 от источника тока.

На рис. 2.8 в представлено перемещение 9 заготовки 2 перпендикулярно направлению подачи инструмента 1 до соединения боковой поверхности 5 зоны разделения заготовки с боковой поверхностью инструмента 7 до стабилизации величины технологического тока.

На рис. 2.8, г показано конечное положение инструмента 1 относительно разделенной заготовки 2 после выхода инструмента 1 из зоны разделения заготовки 2 при обратной подаче 10.

Процесс осуществляют следующим образом: заготовку (рис. 2.8, а) устанавливают на электроабразивный станок с положением зоны разделения напротив электроабразивного инструмента 1, зерна 3, которого препятствуют прямому электрическому контакту инструмента 1 с заготовкой 2. Включают перемещение инструмента 1 относительно заготовки 2 (вращение для дисков, продольное движение для лент), подают электролит в место разде-

ления заготовки 2, ток на инструмент 1 (минус) и заготовку 2 (плюс). Включают прямую подачу инструмента 1 и разделяют заготовку 2 с образованием боковых поверхностей 4 и 5 в зоне разделения заготовки 2, которые под действием анодного растворения боковыми поверхностями 6 и 7 инструмента 1 получают уклоны (если заготовка 2 не вращается) или конусы (при вращении заготовки 2). Уклоны и конусы должны быть удалены, что требует дополнительной операции (как правило шлифования) с потерей большого слоя материала на припуск и средств на дополнительную операцию. Для исключения дополнительной операции заготовку 2 перемещают: в направлении 8, например, в сторону боковой поверхности 6 инструмента 1 (рис. 2.8, б). При этом за счет удаления уклона (конуса) на боковой поверхности 4 зоны разделения площадь обработки возрастает и увеличивается ток (от источника тока), поступающий на инструмент 1 и заготовку 2. Ток стабилизируется при контакте инструмента 1 со своей боковой поверхностью 4 зоны разделения заготовки 2. После этого (рис. 2.8, в) заготовку 2 перемещают в направлении 9 до совмещения боковых поверхностей 5 и 7 с отключением перемещения в момент стабилизации величины технологического тока. Ток может быть выключен. Затем (рис. 2.8, г) включают обратную подачу 10 инструмента 1 и выводят инструмент из зоны разделения заготовки 2.

Рассмотрен пример конкретного осуществления способа: требуется разделить на таблетки круглый пруток из вольфрама. Диаметр прутка 6,4 мм, высота таблетки 1,2 мм. При разделении электроэрозией (диск шириной 2,5 мм) для удаления припуска (1,2 мм) на последующее шлифование требовалось 0,3 минуты при общей трудоемкости на разделение 2,8 минуты. При этом брак деталей по точности достигал 25 %. Электроабразивное резание, применяемое ранее, не позволяло избегать последующего шлифования, хотя снижало трудоемкость разделения до 2,5 минуты, а брак – до 20 %.

Разделение по предлагаемому способу испытано при режимах: напряжение 5 В, сила тока до 12 А, прямая подача инструмента до 4 мм/мин, обратная подача инструмента 50 мм/мин, это позволило снизить погрешность таблеток до 30 мкм, что исключило необходимость в последующем шлифовании. Общее время обработки составило 2 минуты. Брак деталей устранен полностью.

## **Глава 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЧИСТОВОГО РАЗДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ**

### **3.1. Схемы разделения материалов электроабразивным кругом**

В технике при разделении заготовок с сечением менее  $15 \text{ мм}^2$  используются следующие технологические схемы:

1. Разрезка одним диском одной заготовки (рис. 3.1) с постоянной подачей, заготовка 1 может иметь любое сечение.

Для осесимметричных сечений (например круглых) заготовка может иметь вращательное движение вокруг оси ( $n$  на рис. 3.1) со скоростью до 10 м/мин.

Подача может происходить с регулированием по силе  $P$  или скорости  $V_{\text{и}}$ .

К достоинствам схемы относится простота оборудования, средств технологического оснащения.

Однако, процесс весьма трудоемок. В ряде случаев вспомогательное время в 2-3 раза превышает машинное. При перестановке инструмента или заготовки возникают погрешности, в конце разделения имеют место сколы кромок хрупких материалов.

Погрешность в месте разделения, как правило, превышает 0,3 – 0,4 мм, а припуск на последующую обработку более 0,5 мм на сторону. Ширина паза более 0,5 мм.

Схема находит использование в единичном производстве.

2. Та же схема (рис. 3.1), но с управляемой скоростью или силой подачи.

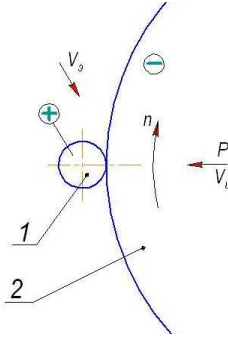


Рис. 3.1. Разрезка круглой заготовки электроабразивным методом:  
 $I$  – заготовка;  $2$  – инструмент – электроабразивный диск;  $P$  – сила подачи инструмента;  $V_u$  – скорость подачи инструмента;  $V_3$  – подача рабочей жидкости (электролита)

Здесь можно устранить некоторые дефекты, возникающие при разделении по схеме 1. В частности снижается изгиб диска под действием силы  $P$  что позволяет снизить ширину паза для мелких заготовок до 0,35 – 0,4 мм. Однако, трудоемкость операции высока, погрешности могут превышать толщину диска. Схема применяется для разделения хрупких материалов в единичном и мелкосерийном производстве.

3. Многоинструментальная схема с несколькими дисками, подключенными к одному источнику тока (рис. 3.2).

В этом случае требуется регулируемая подача инструмента ( $V_u$ ) или заготовки ( $V_3$ ) в направлении резания. Возможно вращение заготовки  $I$ .

Режимы разделения зависят от условий протекания процесса под каждым диском и управление при такой схеме возможно если оборудование оснащено адаптивной системой подачи блока инструментов с обратной связью по сигналам датчиков положения дисков. Схема используется на предприятиях при наличии специального оборудования.



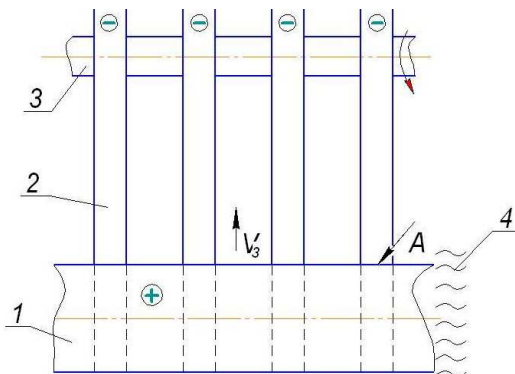


Рис. 3.2. Многоинструментальное разделение:

1 – заготовка; 2 – инструмент – диск; 3 – вал привода; 4 – рабочая среда;  
 $V_3$  – подача заготовки на врезание; A – зона обработки

Ширина паза обычно не менее 0,4 мм, погрешность 0,2 – 0,3 мм на сторону, для крупных (сечение более 2-3 мм) заготовок требуется окончательная обработка паза для снижения погрешностей. Скорость подачи  $V_3$  зависит от числа диска и снижается с увеличением их количества.

4. Схема по п.3 с индивидуальными источниками тока на каждый диск (рис. 3.2).

Здесь заготовка соединяет электрическую цепь и эффект от усложнения конструкции станка и средств управления становится не существенным. Такая схема не нашла применения, хотя и исследовалась специалистами.

5. Кассетное разделение одним или несколькими дисками с последовательной обработкой заготовок (рис. 3.3).

Здесь наиболее эффективным является адаптивное управление подачей кассеты (иногда инструмента), так как каждая последующая заготовка повторяет этапы разделения предшествующей и система адаптации настраивается на оптимальный режим, обеспечивающей наиболее высокие технологические показатели.

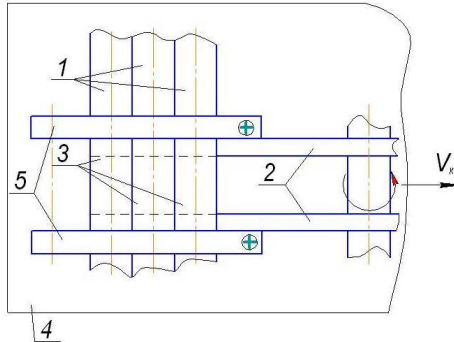


Рис. 3.3. Разделение заготовок в кассете с последовательной разрезкой:  
 1 – заготовка; 2 – диски-инструменты; 3 – детали; 4 – кассета;  
 5 – прижимы;  $V_k$  – скорость подачи на врезание кассеты

Прижимы 5 обеспечивают стабильность получения всех деталей 3 и снятие их с кассеты и после обработки. В схеме может использоваться система адаптивной стабилизации положения дисков, устранения прогибов по диаметру.

Однако, точность разрезки по такой схеме не высока из-за анодного растворения боковых поверхностей деталей. Для использования необходимы инструменты с диэлектрическим покрытием боковых поверхностей (рис. 3.4) Толщина покрытия, как правило превышает 0,2 – 0,3 мм на сторону, что требует уточнения диска в зоне покрытия (рис. 3.4) и общего увеличения его толщины в 2-3 раза. Это приводит к потере дефицитных материалов, хотя и позволяет в ряде случаев избежать последующих технологических операций по чистовой обработке торцев.

К недостаткам такого инструмента можно отнести нарушение изоляции при изгибах и невозможность использования разрядов на боковой поверхности для стабилизации положения диска.

6. Разделение в кассете с постоянной площадью обработки (рис. 3.5) Весь слой заготовок 1, заполняющих полость в кассете 3, прижат зажимами аналогично схеме на рис. 3.3.

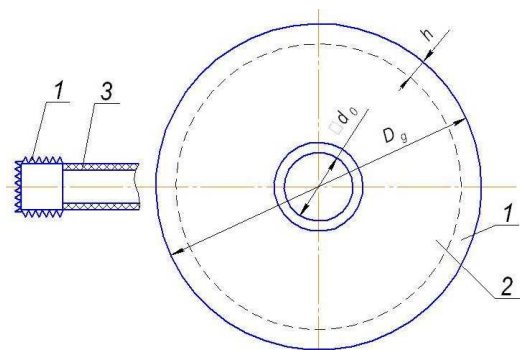


Рис. 3.4. Электроабразивный диск с покрытием:

1 – абразивонесущий слой шириной  $h$ ; 2 – зона диэлектрического порьтия; 3 – диэлектрическое порьтие;  $D_g$  – диаметр диска;  $d_0$  – диаметр посадочного отверстия

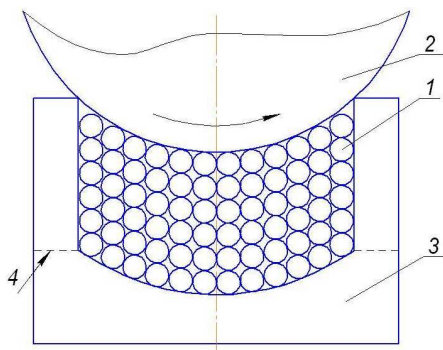


Рис. 3.5. Разделение в кассете с постоянной площадью обработки:

1 – заготовки; 2 – диск; 3 – кассета; 4 – граница пазов в кассете для прохода диска

На рис. 3.5 диск 2 с начала разделения работает при режимах, близких к стационарным, но воздействие электрического поля на торцевые поверхности деталей вызывает, значительные погрешности и потери материала. Возрастают погрешности между деталями, получаемыми из заготовок, находящихся на различных участках кассеты. Требуется диски увеличенного диаметра  $D_g$  (рис. 3.4), что ухудшает точность разделения.

Рассматриваемая схема является наиболее перспективной, если будут предложены методы калибровки непосредственно в кассете боковых поверхностей пазов. Последнее становится возможным, если оборудование оснащено еще одной координатой, возможно, с адаптивным управлением.

Таким образом повышение точности обработки с минимальными потерями материала при разделении возможно, если использовать закономерности процесса разделения дисковыми инструментами с расчетными геометрическими параметрами с адаптивным управлением по нескольким координатам, создании новых способов управления положением различных частей инструмента и калибровке паза после разделения заготовки с минимальным припуском.

Исключение последующих операций по обработке мест разделения деталей позволяет в несколько раз ускорить процесс обработки, значительно повысить точность и качество деталей, снизить расход дефицитных материалов.

Автоматизация процесса разделения заготовок снижает негативное воздействие на человека и окружающую среду.

## **3.2. Обоснование границ достижения заданных технологических показателей**

### ***3.2.1. Основные требования к технологическим режимам***

Требования разработчика изделий должны учитывать технологические возможности используемых приемов обработки. Эти сведения достаточно доступны и достоверны для традиционных методов разделения материалов вулканитовым кругом, резанием металлическим инструментом, но для комбинированных процессов такая информация отсутствует или носит фрагментарный характер.

Граничные показатели по образованию боковых зазоров, определяющих одну из составляющих погрешности могут быть установлены путем моделирования электроабразивного процесса (рис. 3.6).

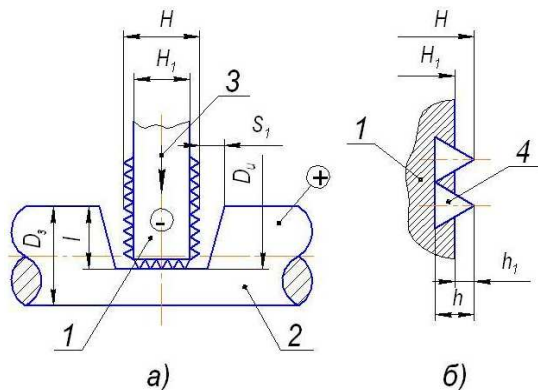


Рис. 3.6. Схема комбинированного разделения токопроводящих материалов: *a* – положение диска 1 относительно заготовки 2 при разделении заготовки 2; 3 – подача инструмента-диска 1 на врезание;  $S_1$  – боковой зазор со стороны врезания диска 1;  $H$  – толщина инструмента;  $H_1$  – толщина диска;  $D_3$  – диаметр заготовки;  $D_i$  – диаметр инструмента;  $l$  – глубина обработки; *б* – Закрепление режущих зерен 4 в диске 1:  $h$  – размер зерна;  $h_1$  – выступание зерна на инструменте

Как показано в [60] скорость ( $V_{и}$ ) подачи (3 на рис. 3.6, *a*) при разделении крупных заготовок без их вращения должна изменяться по закону

$$V_{и} = f(F) \rightarrow \text{var}, \quad (3.1)$$

где  $F$  – площадь донной части паза.

Если принять ширину паза в месте обработки  $H$ , то площадь обработки ( $F$ )

$$F = H \cdot L, \quad (3.2)$$

где  $L$  – длина образующей контура реза. Для плоских заготовок это может быть толщина, для круглых (без вращения) – длина периферийного участка инструмента – диска в зоне резания.

Площадь  $F$  (рис. 3.6) представляет из себя произведение длины дуги в заготовке на ширину  $H$ . Принимая кривую контакта инструмента отрезком прямой из геометрических построений можно найти  $F = L \cdot H$ , где  $L = 2\sqrt{l(D_3 - l)}$

Условием стабильности (управляющая функция) резания абразивными зернами является

$$P_{уд} \rightarrow \text{const}, \quad (3.3)$$

где  $P_{уд}$  – расчетное давление резания при переменной площади торцевой поверхности инструмента, участвующей в разделении.

Тогда сила  $P$  подачи инструмента (рис. 3.7) составит:

$$P = P_{уд} \cdot F, \quad (3.4)$$

где  $P_{уд}$  находят расчетным путем через силу резания или по экспериментальным кривым.

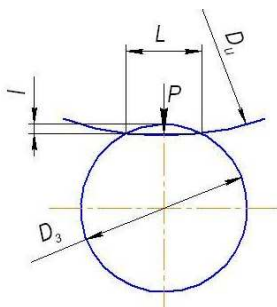


Рис. 3.7. К расчету площади контакта инструмента с заготовкой

Расчеты могут выполняться по известным эмпирическим зависимостям для обработки деталей абразивным инструментом. Поскольку соотношение сил подачи  $P$  для разделения вулканитом и электроабразивным инструментом достаточно стабильно (рис. 3.8) для широкого диапазона диаметров диска, то можно принять  $P_{уд}$  для электроабразивной обработки пропорциональной давлению

абразивной резки  $\bar{P}_{уд}$  ( $K_p$  – коэффициент, учитывает снижение давления на инструмент при комбинированной обработке)

$$P = \bar{P}_{уд} K_p, \quad (3.5)$$

где  $K_p = 0,8 - 0,82$  (рис. 3.8).

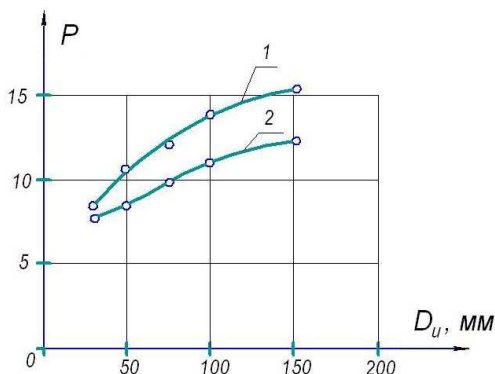


Рис. 3.8. Изменение наибольшей силы подачи инструмента в зависимости от диаметра диска (окружная скорость 20 м/с; диаметр заготовки 10 мм;  $U = 6$ ): 1 – при разделении вольфрама вулканическим кругом толщиной  $U$ ; 2 – при резке электроабразивным диском толщиной 0,58 мм постоянных магнитов

Тогда закон изменения силы подачи  $P$  (управляющая функция) в диапазоне диаметров диска  $D = 30 - 150$  мм может быть представлен в виде:

$$P = 2K_p \bar{P}_{уд} \cdot H \sqrt{l(D_3 - l)}. \quad (3.6)$$

### 3.2.2. Расчет предельных размеров инструмента

Толщину инструмента  $H$  (см. рис. 3.6) рассчитывают по формуле

$$H = H_1 + 2h_1.$$

Из [17]  $h_1 = 1/3 h$ .

Тогда с учетом закрепления зерен с 2-х сторон диска

$$H = H_1 + \frac{2}{3} h. \quad (3.7)$$

Здесь глубина закрепления зерна ( $h_3$ ) в диске не должна превышать  $1/3$  общей толщины диска ( $H$ ).

Тогда с учетом использования дисков с толщиной  $H \geq 0,3$  мм размер зерен не должен превышать

$$h \leq \frac{H}{2} = 150 \text{ мкм}. \quad (3.8)$$

При этом  $H_1 \geq 0,29$  мм.

С увеличением толщины диска ( $H_1$ ) размер зерна может возрасти, но в этом случае ухудшается качество поверхностного слоя в зоне резания.

Диаметр  $D_u$  дискового инструмента зависит от следующих факторов:

1. Диаметр должен превышать глубину паза при разделении материалов в течение заявленного ресурса работы инструмента.

$$D_u \geq D_{\text{ик}} + \Delta D, \quad (3.9)$$

где  $D_{\text{ик}}$  – диаметр диска после выработки ресурса с учетом износа, правки (если это требуется.)  $\Delta D$  – изменение диаметра диска из-за износа при работе.

2. Диск должен сохранять устойчивость при разделении с силой подачи  $P$  при известной толщине  $H_1$

Если принять схему действия сил  $P$  на тонкостенный диск, толщиной  $H_1$  и шириной  $1/2 D_3$  в виде, приведенном на рис. 3.9, то можно найти предельный диаметр  $D_u$ , при котором диск не теряет устойчивости.

По формуле Эйлера критическая сила  $P_{\text{кр}}$  для стержня определяется:

$$P_{\text{кр}} = \frac{K_y E J_{\text{min}}}{(\mu l)^2}, \quad (3.10)$$



где  $K_y$  – коэффициент устойчивости;  $E$  – модуль продольной упругости материала;  $J_{\min}$  – момент инерции стержня;  $\mu$  – коэффициент приведенной длины (зависит от схемы закрепления, см. рис. 3.9);  $l$  – длина стержня (в нашем случае  $l = D_u/2$ ).

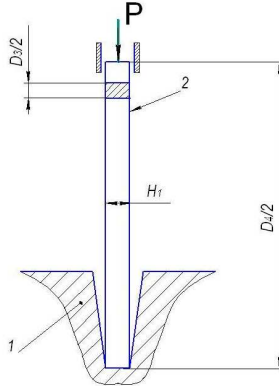


Рис. 3.9. Расчетная схема устойчивости диска: 1 – заготовка; 2 – инструмент-диск

Расчетная схема для определения  $D_u$  приведена на рис. 3.9.

В формуле (3.10)  $J_{\min} = J$  Из [ ]  $J_{\min} = \frac{H_1 \cdot D_3}{24}$ .

Для рассматриваемой схемы  $K_y = 20,19$ ,  $\mu = 0,699$ .

Для латунного диска  $E = 1,3 \cdot 10^5$  МПа.

Из (3.10) с учетом (3.6)  $D_u = f(P)$

$$K_p \bar{P}_{уд} H \sqrt{4lD_u + \frac{4}{3} l^2} = K_y E \frac{H_1 D_3}{6} \frac{1}{\mu^2 D_u^2}.$$

После ряда преобразований

$$4l\mu^2 D_u^3 + \frac{4}{3} l^2 \mu^2 D_u^2 - \frac{K_y E H_1 D_3}{6 K_p^2 \bar{P}_{уд}^2 H^2} = 0. \quad (3.11)$$

Решение (3.12) относительно  $D_u$  возможно путем замены переменных [44]

$$y = D_u + \frac{b}{3a}, \quad (3.12)$$

где  $b = \frac{4}{3}l^2\mu^2$ ,  $a = 4 \cdot l\mu^2$ ,  $c = 0$ ;  $d = -\frac{K_y E H_1 D_3}{6K_p^2 P_{уд}^2 H^2}$ .

$$y = D_u + 4l^2\mu^2 D_u^3 + \frac{1}{3 \cdot 4l\mu^2} = D_u + \frac{l}{9}. \quad (3.13)$$

Тогда (3.11) примет вид:

$$y^3 + 3py + 2q = 0, \quad (3.14)$$

где  $3p = -\frac{b^2}{3a^2} = -\frac{16}{9}l^4\mu^4 \frac{9}{3 \cdot 16l^2\mu^4} = -\frac{l}{3}l^2$ .

$$\begin{aligned} 2q &= \frac{2b^3}{27a^3} + \frac{d}{a} = \frac{2 \cdot 64}{27} \frac{l^6\mu^6}{27 \cdot 64l^3\mu^6} - \frac{K_y E H_1 D_3}{6 \cdot K_p^2 P_{уд}^2 H^2 4l\mu^2} = \\ &= \frac{2 \cdot 1^3}{729} - \frac{K_y E H_1 D_3}{24K_p^2 P_{уд}^2 H^2 l\mu^2}. \end{aligned}$$

В (3.14)

$$y^3 - \frac{1}{3}l^2 y + \frac{2 \cdot 1^3}{729} - \frac{K_y E H_1 D_3}{24K_p^2 P_{уд}^2 H^2 l\mu^2} = 0.$$

Количество действительных решений оценивается по дискриминанту  $D = q^2 + p^3$

$$D = \left( \frac{l^3}{729} - \frac{K_y E H_1 D_3}{48K_p^2 P_{уд}^2 H^2 l\mu^2} \right)^2 - \frac{l^6}{729}. \quad (3.16)$$

Если  $D > 0$ , то уравнение имеет 1 решение (1 действительный корень).

По формуле Кардана

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= U + V; \\ y_2 &= \varepsilon_1 U + \varepsilon_2 V; \\ y_3 &= \varepsilon_2 U + \varepsilon_1 V, \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

где  $U = \sqrt[3]{-q + \sqrt{q^2 + p^3}}$ ;  $V = \sqrt[3]{-q - \sqrt{q^2 + p^3}}$ ;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – корни уравнения  $x^2 + x + 1 = 0$

$$\varepsilon_{1,2} = -\frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - 1} = -\frac{1}{2} \pm i \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Действительный корень в (3.17)

$$y_1 = U + V, \quad (3.18)$$

$$\text{где } U = \sqrt[3]{\left( \frac{K_y E H_1 D_3}{48 K_P^2 P^2 H^2 l \mu^2} - \frac{l^3}{729} \right)} + \sqrt[3]{\left( \frac{K_y E H_1 D_3}{48 K_P^2 P^2 H^2 l \mu^2} - \frac{l^3}{729} \right)^2 - \frac{l^6}{729}}$$

$$V = \sqrt[3]{\left( \frac{K_y E H_1 D_3}{48 K_P^2 P^2 H^2 l \mu^2} - \frac{l^3}{729} \right)} - \sqrt[3]{\left( \frac{K_y E H_1 D_3}{48 K_P^2 P^2 H^2 l \mu^2} - \frac{l^3}{729} \right)^2 - \frac{l^6}{729}}$$

С учетом (3.12)

$$D_u = (U + V) - \frac{b}{3a}. \quad (3.19)$$

Нижней границей  $D_u$  является диаметр посадочного места ( $d_0$ ) и глубина паза разделения ( $l_0$ ). Если деталь не вращается, то  $l_0 = 1,1D_3$ ; при вращении заготовки  $l_0 = D_3/2$ .

$$D_{\min} = d_0 + l_0. \quad (3.20)$$

Тогда изменение диаметра диска  $D_{ит}$  происходит в диапазоне (3.21)

$$D_{и\min} \leq D_{ит} \leq D_{и\max} \quad (3.21)$$

Результаты расчетов, выполненных по (3.20), приведены на рис. 3.10. В расчетах использовались данные рис. 3.8 для выбора силы подачи при различном диаметре диска.

Из рис. 3.10 видно, что диск сохраняет постоянную форму при толщинах более 0,18 мм.

Фактически используют алмазные диски с толщиной более 0,3 мм и диаметром до 110 мм.

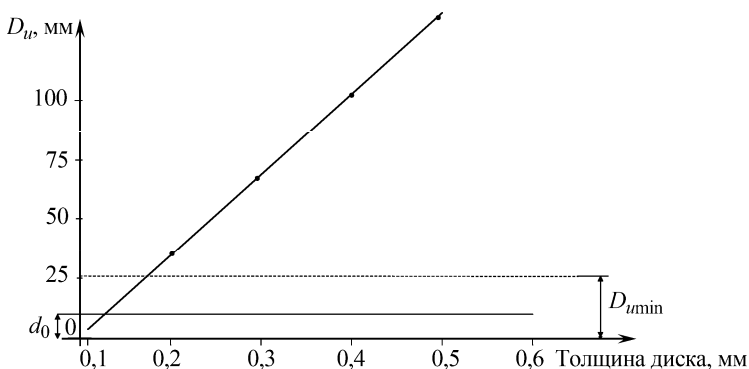


Рис. 3.10. Предельный диаметр диска без потери устойчивости при разделении круглых заготовок из магнитного сплава ( $D_3 = 15$  мм). Заготовка не вращается

### 3.2.3. Не параллельность стенок паза за счет воздействия электрического поля

На рис. 3.6, а показано изменение положения поверхности паза по мере углубления инструмента в заготовку. Это происходит за счет анодного растворения сформированных инструментом боковых поверхностей паза, где зазор зависит от выступания зерен ( $h_1$  на рис. 3.6, б)

Активная часть электролизера зависит от площади боковой поверхности инструмента, занятой абразивными зернами, которые, как правило не токопроводящие. Для изготовления алмазных отрезных кругов используются концентрации зерен от 50 до 150.

Фактически площадь активной зоны боковой поверхности диска составляет 50 – 70 %, следовательно коэффициент активного использования площади инструмента внутри паза  $K_a = 0,5 - 0,7$ .

Тогда по аналогии с (3.2) активная площадь  $F_a$  составляет на каждую сторону

$$F_a = \frac{1}{2} K_a \left[ \frac{D_3}{2} \sqrt{4lD_3 + \frac{4}{3}l^2} - 2 \left( \frac{D_3}{2} - l \right) \sqrt{l(D_3 - l)} \right]. \quad (3.22)$$

При выполнении условия (3.1) скорость подачи инструмента при разрезании круглых заготовок будет переменной. Если заготовка не вращается, то скорость подачи снижается до пересечения диском диаметра заготовки, затем возрастает по тому же закону до отрезки материала.

На боковую поверхность действует ток, подаваемый на инструмент. Время анодного растворения ( $\tau_a$ ) боковой поверхности со стороны входа диска-инструмента зависит от общего времени разделения заготовки. Если заготовка вращается, то время разделения:

$$\tau = \int_{l_0}^{D_3/2} \frac{dl(\tau)}{V(l)}. \quad (3.23)$$

При неподвижной заготовке можно принять

$$\tau_n = 2 \int_{l_0}^{D_3/2} \frac{dl(\tau)}{V(l)}, \quad (3.24)$$

где  $l_0$  – глубина врезания инструмента в заготовку. Обычно  $l_0 = 0,2 - 0,5$  мм.

Если известна начальная скорость врезания (корректируется на участке  $l_0$ ), то из (3.23) время разделения  $\tau$  (в первом приближении)

$$\tau = \frac{D_{3/2}}{2V_{\text{нач}} \left( 1 + \frac{l_0}{D_3} \right)}, \quad (3.25)$$

без вращения заготовки

$$\tau_{\text{н}} = 2\tau. \quad (3.26)$$

Начальная скорость врезания ( $V_{\text{нач}}$ ) зависит от диаметра диска – инструмента, его толщины, силы подачи, материала заготовки (рис. 3.11).

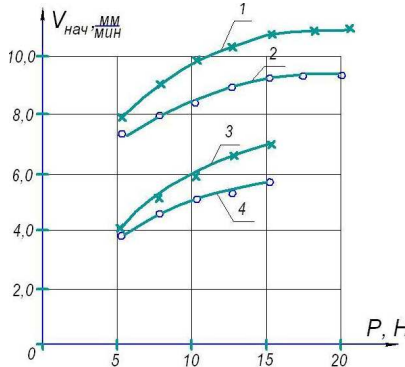


Рис. 3.11. К выбору  $V_{\text{нач}}$ : 1 – диаметр  $D_{\text{и}} = 100$  мм,  $H = 0,6$  мм, материал заготовки – вольфрам ( $D_3 = 8$  мм); 2 – диаметр  $D_{\text{и}} = 100$  мм,  $H = 0,6$  мм, материал заготовки – магнитный сплав; 3, 4 – диаметр  $D_{\text{и}} = 50$  мм,  $H = 0,3$  мм, материал заготовки – вольфрам (3), магнитный сплав (4)

Как видно из рис. 3.6, наибольший уклон образуется на участке врезания инструмента, где время действия электрического поля наибольшее.

Изменение ширины паза (погрешность детали) составляет (рис. 3.6).

– с вращением заготовки

$$\delta = 2S_1 = K_a \sqrt{\left( \frac{H-H_1}{2} \right)^2 + 2 \frac{\alpha}{\gamma} \eta \chi (U - \Delta U) \frac{D_3}{4V_{\text{нач}} \left( 1 + \frac{l_0}{D_3} \right)}}. \quad (3.27)$$

Здесь  $\alpha$  – электрохимический эквивалент материала заготовки;  $\gamma$  – плотность материала заготовки;  $\eta$  – выход по току;  $\chi$  – удельная электропроводность рабочей среды;  $U$  – напряжение на электродах;  $\Delta U$  – потери напряжения.

– без вращения заготовки

$$\delta = 2\delta. \quad (3.28)$$

Оценка погрешности по (3.27) и (3.28) позволяет установить технологические возможности процесса разделения заготовок по показателю точности.

Некоторые численные расчеты приведены на рис. 3.12 ( $V_{\text{нач}} = 6$  мм/мин;  $l_0 = 0,5$  мм; зерно – 150 мкм; напряжение 5 В).

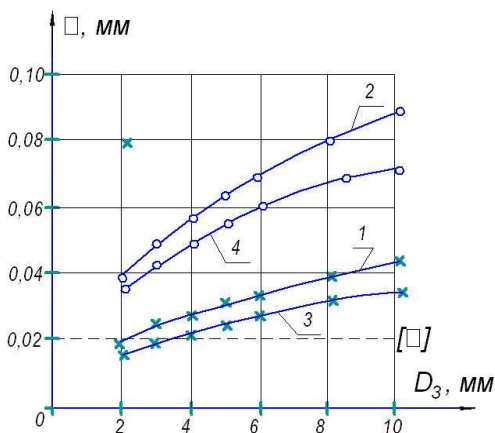


Рис. 3.12. Погрешность от бокового анодного растворения: 1, 2 – вольфрам; 3, 4 – магнитный сплав АЛНИКО; 1, 3 – с вращением заготовки; 2, 4 – без вращения заготовки

Из рис. 3.12 видно, что погрешности вызванные анодным растворением, значительно превышают пределы, заданные для разделения (0,02 – 0,03 мкм) Готовые детали с заданной точностью можно получить только при вращении заготовок с диаметром до 2-3 мм (при допуске 0,02 мм) и с  $D_3 \leq 5$  мм (для вольфрама),  $D_3 \leq 7$  мм (для магнитного сплава) при допуске 0,05 мм.

Шероховатость поверхности паза зависит от зернистости круга, стабильности его положения при разделении, наличия и мощности боковых разрядов, напряжения.

При разделении вулканитом шероховатость зависит в основном от окружной скорости, свойств разрезаемого материала и зернистости круга. Чем выше зернистость, тем ниже чистота. Но при этом дольше сохраняются режущие свойства инструмента, особенно при разделении вязких материалов.

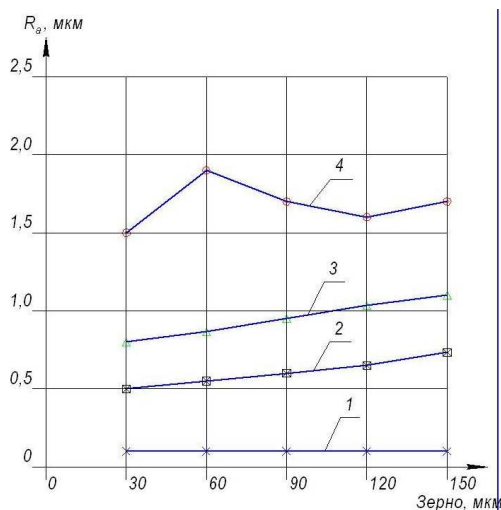


Рис. 3.13. Влияние зернистости круга и напряжения на шероховатость поверхности разделения вольфрама: 1 –  $U = 3$  В; 2 –  $U = 5$  В; 3 –  $U = 7$  В; 4 –  $U = 12$  В



В случае электроалмазного (электроабразивного) разделения зернистость не оказывает существенного влияния, так как за счет наложения электрического поля можно снизить давление, налипание материала заготовки. Существенное влияние на величину шероховатости оказывает напряжение на электродах и стабильность движения круга. На рис. 3.13 показано изменение высоты неровностей боковых поверхностей паза от величины зерна и напряжения от 5 до 7 В, где обеспечиваются требования к деталям по шероховатости и достигается высокая интенсивность разделения. Из рис. 3.13 видно, что высота неровностей слабо зависит от размеров зерна. На кривой 4 видны резкие возрастания  $R_a$ , что, видимо объясняется боковыми замыканиями из-за изгиба или колебаний диска в пазе.

Из анализа раздела 3.2 видно, что для комплексного обеспечения требуемой точности разделения и шероховатости паза необходимо обеспечить стабильность положения инструмента в пазе, устранить клиновидность стенок паза, ввести адаптивное управление параметрами режима.

## **Глава 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА, ОБОРУДОВАНИЯ, СРЕДСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОГО МАЛОУТХОДНОГО ЧИСТОВОГО РАЗДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ**

### **4.1. Технологический процесс**

#### ***4.1.1. Исходная информация***

Исследования, приведенные в главе 3, позволяют спроектировать технологический процесс, который по аналогии с [23] с учетом ограничений, заданных заказчиком.

Исходная информация включает сведения о детали после выполнения операции размещения (точность качество поверхностного слоя); ограничения (допустимые габариты заготовки, производительность, себестоимость, операции, обрабатываемость, масштаб выпуска, потери материала, технологичность, и др.); сведения об инструменте (наличие, характеристики и др.); сведения об оборудовании (наличие, технические характеристики и др.).

#### ***4.1.2. Выбираемые параметры***

А. Окружная скорость диска ( $W_n$ ). Зависит от размеров дискового инструмента (раздел 4В), сечение заготовки, ее формы, ограничений по точности, шероховатости и других факторов. При использовании традиционного электроабразивного разделения за-

готовок (без адаптивного регулирования процесса) выбор скорости  $W_{и}$  может быть выполнен по номограмме рис. 4.1.

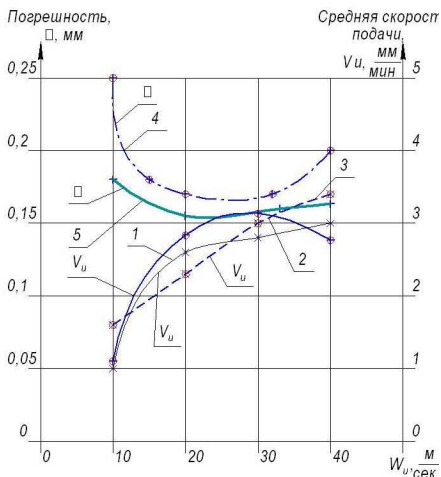


Рис. 4.1. К выбору окружной скорости диска: 1 – толщина диска 0,3 мм; 2 – 0,5 мм; 3 – 1 мм; 4 – величина погрешности для диска толщиной 0,3 мм; 5 – 1 мм; диаметр заготовки 8 мм; материал заготовки – вольфрам; напряжение – 6 В; рабочая среда – 15 %  $\text{NaNO}_3$

В работе рассматриваются металлосберегающие технологии разделения, поэтому толщина дискового инструмента должна лежать в диапазоне 0,3 – 0,5 мм (см раздел 4.3). Для этого диапазона по рис. 4.1 скорость  $W_{и}$  может применяться в достаточно широких пределах  $15 \leq W_{и} \leq 30$  м/с.

По рекомендациям [7] скорость электроабразивного инструмента составляет 10 – 25 м/с и зависит от сечения заготовки, скорости ее вращения.

Для случая электроалмазного разделения хрупких и вязких материалов тонкими дисками базовый рабочий диапазон скоростей составляет 20 – 25 м/с (при сечении заготовки 8 мм). Выбранная скорость корректируется (в зависимости от формы и размеров сечения заготовки) по кривым на рис. 4.2.

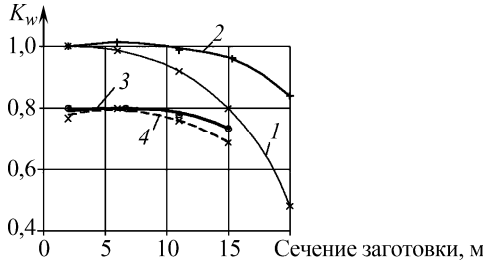


Рис. 4.2. Коэффициент коррекции скорости диска ( $K_w$ ): 1, 4 – некруглые заготовки; 2, 3 – круглые заготовки; 1, 2 – без вращения заготовки; 3, 4 – с вращением заготовки (3 – 150 – 200 1/мин; 4 – 80 – 100 1/мин)

### Б. Рабочая среда.

В [12] приведены рекомендации по выбору рабочих сред для большинства сплавов. Для рассматриваемых дефицитных и хрупких материалов предложены рабочие среды на базе  $\text{NaNO}_3$ , обеспечивающие стабильные технологические показатели при разделении (табл. 4.1).

Таблица 4.1

**Технологические показатели при разделении вольфрама (диам. 8мм) различных рабочих средах ( $U = 6 \text{ В}$ ,  $W_{и} = 20 \text{ м/с}$ )**

№ п/п	Состав рабочей среды	Средняя скорость подачи инструмента, мм/мин	Погрешность, мм (без управления)	Токсичность	Доступность
1	10 % $\text{NaNO}_3$	2 – 2,8	0,1 – 0,15	не токсичен	доступен
2	10 % $\text{NaNO}_3 + 2$ % $\text{NaNO}_2 + 1$ % Бура	2,5 – 3,0	0,1 – 0,15	слабо токсичен	доступен
3	10 % $\text{KCl} + 2\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	2 – 2,5	0,08 – 0,1	слабо токсичен	ограниченно доступен
4	15 % $\text{NaNO}_3 + 2$ % $\text{NaNO}_2$	2,8 – 3,0	0,1 – 0,15	не токсичен	доступен

Электролиты 1 и 4 имеют практически одинаковые показатели, но добавка их в состав  $\text{NaNO}_2$  способствует защите от коррозии деталей оборудования и оснастки, поэтому для сложных обра-

батывающих модулей рекомендуется рабочая среда 15 %  $\text{NaNO}_3$  + 2 %  $\text{NaNO}_2$  при температуре до 300 К, что обеспечивается за счет естественного охлаждения жидкости.

### В. Напряжение.

В [7] рекомендуется применять при электроабразивном шлифовании напряжения от 8 до 12 В. При разделении материалов без управления положением диска уже при напряжении 8 В (рис. 4.3) режим становится не стабильным, что вызывает новые случайные и систематические погрешности, нарушает показатели качества поверхностного слоя из анализа результатов наших исследований следует, что стабильный режим начинается с 5-6 В и заканчивается при 7-8 В. С использованием адаптивного управления подачей инструмента, положением режущего участка в пазе диапазон напряжений может быть расширен до  $4 < U < 8$  В.

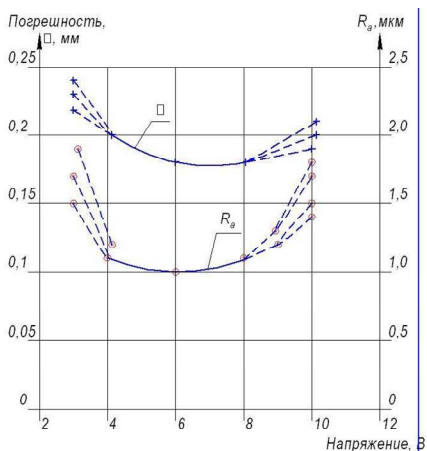


Рис. 4.3. Выбор напряжения (инструмент  $D_{и} = 80$  мм;  $H = 0$ ;  $W_{и} = 20$  м/с;  $D_3 = 8$  мм; материал заготовки – вольфрам)

### 4.1.3. Расчет режимов разделения

Как показано в главе 3 реализация предлагаемого технологического процесса возможна, если создан новый гибкий автома-

тизированный модуль с адаптивными управляющими координатами. Испытания экспериментальной установки создали предпосылки проектирования модуля, который был создан (см. 4.2). В модуле предусмотрено 6 рабочих управляющих координаты, 1 резервная. Поэтому технологический процесс строится с учетом реализации режимов обработки по управляющим координатам.

**I координата** – управление образованием направляющей канавки обеспечивающая вертикальное вырезание тонкого вращающегося диска в заготовку.

С целью формирования качественной направляющей канавки необходимо предусмотреть в технологическом процессе достаточные для этого режимы, величину подачи и расстояние между диском-инструментом и заготовкой, начальное напряжение питания, равное 0,6 – 0,9 мм значения пробивного его значения для зазора между инструментом и заготовкой и его плавного снижения к моменту их касания до рабочего значения  $V = 6$  В и рассчитывают их по формуле 2.1.

**II координата.** Управление вертикальным врезанием дискового инструмента в заготовку начинается с моменты включения вращения электрода-инструмента и поддерживается в течении всего технологического процесса разделением автоматическими устройствами станка. Последовательность включения управляемых координат закладывается в алгебраическую схему управления процессом электроалмазной обработки.

**III координата.** При управлении скоростью подачи дискового инструмента в процессе электроалмазной резки необходимо учитывать теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в главах 2 и 3.

Как показано в главе 3, скорость регулируется по критерию

$$P_{уд} \rightarrow \text{const.} \quad (4.1)$$

Тогда закон управления будет соответствовать функции (3,6).

$$P = f(P_{уд}, H, D_3, l, \text{ характеристика материалов}$$

$$\text{инструмента и заготовки}). \quad (4.2)$$

Наибольшая величина  $P$  (в диаметральной сечении) может быть найдена для различных размеров заготовок расчетным путем и автоматически скорректирована модулем по экспериментальному значению, типа приведенного на рис. 4.4.

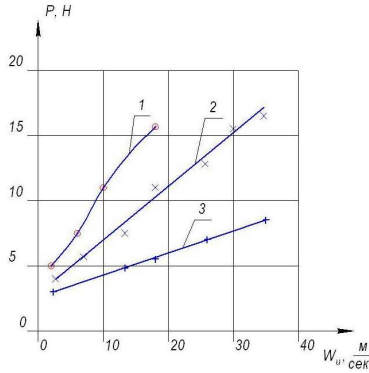


Рис. 4.4. Влияние окружной скорости инструмента на наибольшую силу подачи диска (диаметр диска 80 мм; заготовки 8 мм; материал заготовки – вольфрам; рабочая среда –  $\text{NaNO}_3$ ; напряжение – 6 В; толщина диска: 1 – 7 мм; 2 – 0,6 мм ; 3 – 0,3 мм

Сигналом для изменения подачи диска может служить изгиб профиля инструмента, управляемый датчиками, колебание периферийной части инструмента к стенкам паза, что нарушает точность, увеличивает ширину диска, расширяет припуск на последующую операцию. При стабильных исходных данных (см. 4.1.1) адаптивное управление подачей инструмента обеспечивает работу диском с толщиной более 0,25 – 0,3 мм, ширину паза от 0,3 мм, погрешность (в зависимости от диаметра заготовки) от 0,15 мм, шероховатость  $R_a = 1 - 1,5$  мкм.

**IV координата** – управление положением режущей части диска в пазу. Обеспечивает стабильность обработки путем гаше-

ния колебательных (особенно автоколебательных) перемещений периферии диска. Предложенный (см. 2.2) способ позволяет на ранней стадии колебательного процесса погасить развитие неустойчивости (время реакции 0,5 – 0,2 с), что практически не нарушает точности паза за счет смещения режущей части диска в сторону стенок паза.

В табл. 4.2 приведены статистические сведения о влиянии на качество деталей (таблетки  $D_3 = 6,2$  мм, толщина 2,2 мм) из магнитного сплава АЛНИКО при их разделении без адаптивного управления положением режущей части диска и с применением системы стабилизации инструмента.

Таблица 4.2

**Влияние системы стабилизации режущей части инструмента на технологические показатели разделения магнитных сплавов ( $U = 8$  В,  $W_{II} = 20$  м/с,  $D_3 = 6,2$  мм,  $D_u = 80$  мм,  $H = 0,35$  мм)**

№ п/п	Способ разделения	Показатели			Брак деталей (% , причины)
		погрешность, мм	шероховатость, $R_a$ , мкм	износ диска по объему, %	
1.	Без стабилизации (подача диска 2,0 мм/мин)	0,25 – 0,35	1 – 2,0	20 – 30	15 – 20 % (сколы, местные вырывы)
2.	Со стабилизацией положения диска и подаче 2 мм/мин	0,2 – 0,25	1 – 1,25	20 – 25	10 – 15 % (сколы)
3.	С управляемой подачей диска (средняя скорость подачи диска 4,5 мм/мин) и вращением заготовки	0,12 – 0,15	0,63 – 1,25	10 – 15	отсутствует

Анализ, представленных данных в табл. 4.2 показывает, что использование рассмотренных управляемых координат позволяет получать 100 % годных изделий (соответствующие требованиям чертежа на деталь).



**V координата.** Управление стабильностью формы дискового инструмента позволяет получать заготовки с размерами соответствующими окончательным размерам, и отвечающих требованиям чертежа по точности и качеству обработанных поверхностей. Способ осуществления стабилизации формы диска поясняется на рис. 2.7.

Предполагаемый способ стабилизации возможно использовать в тех случаях, когда есть возможность в несколько раз увеличить ширину обрабатываемого паза и когда требуется разрезать заготовки с соотношением глубины паза к ее ширине превышает  $D_3/H_3 > 20$  м до 50 крат.

В табл. 4.3 приведены результаты использования управляемых координат и стабилизации формы диска.

Таблица 4.3

**Эффективность использования управления по стабилизации формы диска. (толщина диска 0,3 мм)**

№ п/п	Вариант разделения заготовок	Диаметр диска, мм	Показатели		Брак деталей (% , причины)
			погрешность, мм	Ra, мкм	
1	Штучная резрезка ( $D_3 = 6,2$ мм) со стабилизацией по 3 координатам	60	0,1 – 0,15	0,63 – 1,0	отсутствует
2	Резка в кассете тех же заготовок со стабилизацией по 2 координатам одним диском	80	0,15 – 0,25	1 – 1,25	5 – 10 % (прижоги)
3	Разрезка по п.2 координатам 5 дисками	80	0,2 – 0,25	1 – 1,5	10 – 15 % (прижоги)
4	Разрезка по п.2-5 диска мм со стабилизацией по 5 координатам	100	0,15 – 0,20	0,63 – 1,0	отсутствует

Применение многоинструментальной обработки повышает производительность процесса, учитываемую коэффициентом  $K_m$

$$V_{и} = V_{и1}K_{м}(n), \quad (4.4)$$

где  $V_{и1}$  – скорость подачи инструмента при одном диске;  $K_{м}$  – коэффициент изменения скорости подачи в зависимости от числа дисков ( $n$ ). Выбирается по рис. 4.5.

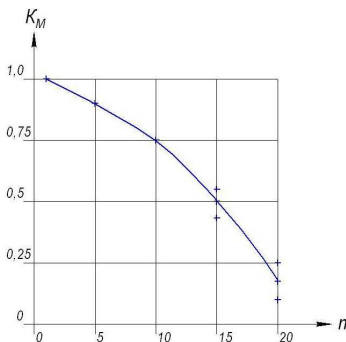


Рис. 4.5. Оценка производительности многоинструментального разделения заготовок

Из рис. 4.5 следует, что многоинструментальное разделение целесообразно использовать в серийном производстве с числом дисков не более 10-12. Далее обеспечить стабильность процесса не удастся даже при полной адаптации управления процессом. В рассматриваемом случае усложняется настройка оборудования, могут возникать дополнительные погрешности из-за неравномерного износа инструмента.

**VI координата** обеспечивает калибровку стенок паза по способу, предложенному а.с. Осевое перемещение инструмента позволяет снизить погрешность до 20 и даже 10 мкм, но требуется предусматривать припуск на калибровку, который зависит от суммарной погрешности при разделении. VI координата обеспечивает управление калибровкой стенок паза по способу предложенному в а.с. Осевое перемещение инструмента позволяет снизить погрешность обработки до 10 мкм, но требуется предусматривать припуск на калибровку, который зависит от суммарной погрешности при разделении. Расширять этот припуск нежелательно, так как он

увеличивает потери дефицитных материалов. Минимальная величина припуска ( $Z_{\min}$ ) зависит от суммарной погрешности при разделении заготовки ( $\delta_{\Sigma}$ ) и допуска на размер детали [ $\delta$ ]

$$Z_{\min} = \delta_{\Sigma} - \delta. \quad (2.3)$$

Адаптация включает выбор минимального осевого перемещения заготовки гали инструмента и оценку необходимости в калибровке, где критерием является

$$Z_{\min} > 0. \quad (2.4)$$

Схема осуществления способа приведена на рис. 2.8.

## 4.2. Гибкий автоматизированный модуль

С учетом технологических требований, изложенных в разделе 4.1, и патентов (раздел 2.2) был спроектирован и изготовлен серийный автоматизированный модуль с 6 управляющими координатами (имеется резервная координата).

### 4.2.1. Компановка

Общая компоновка станка (рис. 4.6) включает: корпус; суппорт; пульт управления (рис. 4.7); панель силовая; головка; камера рабочая; привод самохода; гидроагрегат.

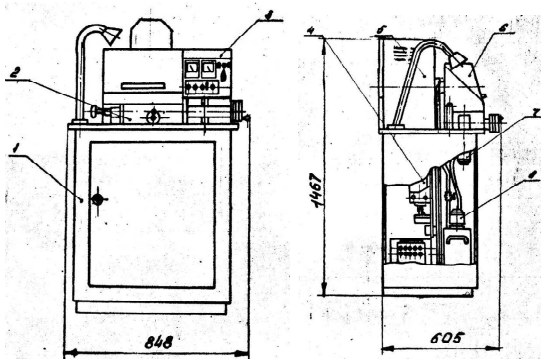


Рис 4.6. Модуль для разделения материалов электроабразивным диском

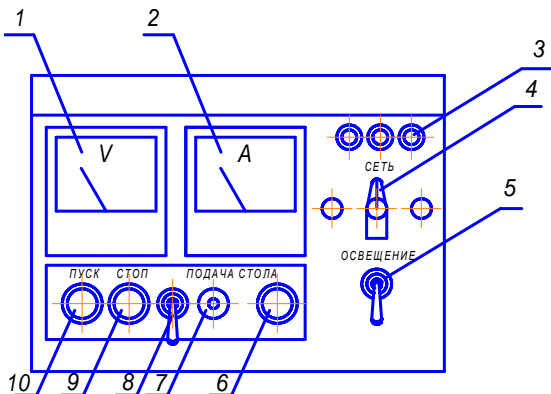


Рис. 4.7. Пульт управления: 1 – вольтметр; 2 – амперметр; 3 – индикаторы; 4 – включение сети; 5 – включение системы освещения; 6 – ручная подача; 7 – автоматическая управляемая подача; 8 – переключатель программ управления; 9, 10 – кнопки включения и выключения систем станка

Модуль включает однотумбовый корпус 1, который разделен перегородкой. В первой половине корпуса размещено электрооборудование станка 4. В другой половине установлен гидроагрегат 8, состоящий из бака для электролита и насоса для подачи электролита в зону обработки.

Суппорт 2 установлен на столе станка и обеспечивает продольную и поперечную подачу заготовки. На тумбе установлен пульт управления 3.

Головка станка 5 включает в себя двигатель со шпинделем.

Вращение от электродвигателя передается на шпиндель посредством ременной передачи. На шпиндель устанавливается алмазный отрезной круг. Зона обработки закрыта рабочей камерой 6, изготовленной из нержавеющей стали и имеющую прозрачную крышку, выполненную из органического стекла. Для слива электролита в рабочей камере имеется сливное отверстие.

Стойка силового оборудования (рис. 4.8) состоит из блока трансформатора технологического тока, блока задания режимов 2, блока управления шаговым двигателем 1, блока питания 3, вентилятора и реле переключения шаговых двигателей.

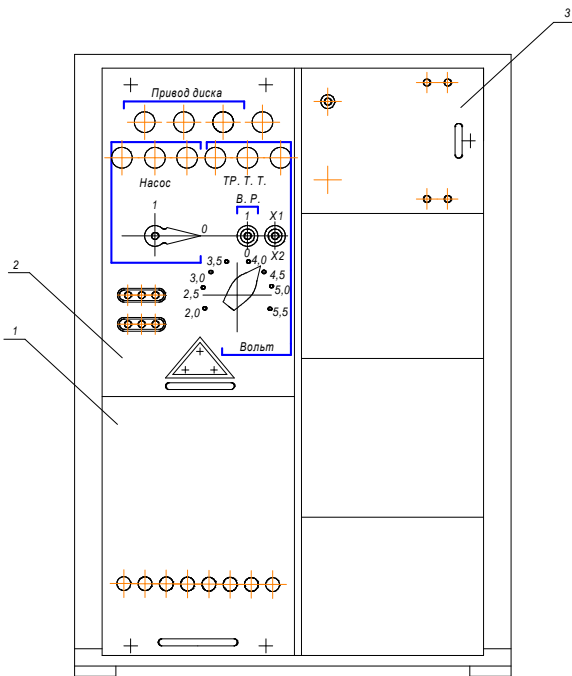


Рис. 4.8. Стойка силового оборудования

Блок трансформатора технологического тока предназначен для преобразования 3-х фазного переменного напряжения в постоянное напряжение устанавливаемое в пределах от 2 В до 11 В с дискретностью 0,5 В и состоит из силового 3-х фазного трансформатора, коммутирующих и диодного моста.

Блок задания режимов предназначен для включения привода режущего диска насоса подачи электролита, выбора величины технологического напряжения и состоит из предохранительной, коммутационной аппаратуры, переходных штепсельных разъемов и трансформатора питания силовой автоматики с выпрямителем на выходное напряжение 27 В.

Блок питания предназначен для питания блока индикации и управления низковольтным стабилизированным напряжением.

Вентилятор предназначен для охлаждения силовых тиристор-ов в блоке управления шаговым двигателем.

Реле переключения шаговых двигателей предназначено для коммутации питания на один из шаговых двигателей в зависимости от выбранной координаты перемещения рабочего стола станка.

На столе установлен суппорт, обеспечивающий продольную и поперечную подачу заготовок.

#### 4.2.2. Средства автоматизации и адаптации

Блок управления и индикации (рис. 4.9) состоит из блока АЦД (анало-цифровой дисплей), пульта задания режимов и блока датчика деформации.

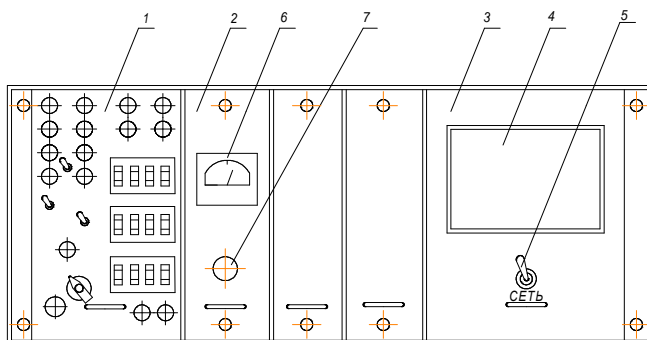


Рис. 4.9. Блок управления индикации: 1 – пульт задания режимов; 2 – блок датчика деформации; 3 – блок АЦД; 4 – экран АЦД; 5 – тумблер «СЕТЬ»; 6 – микроамперметр; 7 – регулятор нуля

Блок АЦД предназначен для отображения на экране газоразрядной матрицы с рабочим полем  $100 \times 100$  элементов разложения следующей информации:

- величины напряжения технологического тока от 0 В до 9,9 В;
- амплитудных значений технологического тока от 0 А до 99 А;
- величин перемещений рабочего стола по координатам  $X$  или  $Y$ .

(Здесь и далее под координатой  $X$  принято перемещение рабочего стола перпендикулярно оси шпинделя привода диска – режим подачи режущего диска на врезание и возврат его. Координата  $Y$  соответствует перемещению рабочего стола параллельно оси шпинделя привода диска). Перемещение отображается по координате  $Y$  в масштабе, мкм, а по координате  $X$  в мкм. Предельные значения отображаемых величин перемещения по  $X$  от 00000 до 15000 мкм, по координате  $Y$  от 00000 до 99000 мкм, задаются в форме дискретных величин скорости подачи режущего диска, отображаемых в виде гистограммы за установленный оператором период времени.

Максимальное число элементов разложения гистограммы по временной шкале соответствует 100, амплитудное разложение – 64. Временной масштаб выбирается при задании режимов оператором, установкой декадного переключателя время 10 с, а амплитудный масштаб гистограммы – тем же переключателем, с помощью декад МАСШТАБ. Таким образом полный интервал времени соответствует  $t = (\times 10 \text{ с}) \div 999 (\times 10 \text{ с})$  при интегрировании скорости резания за период  $\tau = t/100$ , а амплитудное значение отображаемой гистограммы соответствует величине  $2NM$ , где 2 – соответствует величине перемещения рабочего стола в мкм при подаче на шаговый двигатель одного импульса управляющего тока (конструктивно заданная величина),  $N$  – число элементов разложения гистограммы  $00 \div 64$ ,  $M$  – выбранный оператором масштаб отображения гистограммы.

Модуль работает в нескольких режимах

1. Ручной. На блоке задания режимов (рис. 4.10) стойки силового оборудования переключатель НАСОС установить в положение 1. На пульте управления станка (рис. 4.7) автоматический включатель 8 поставить в положение 1, при этом должна загореться лампочка индикации всех блоков питания.

Переключателями (рис. 4.8) ВОЛЬТ и X1-X2 установить необходимое напряжение холостого хода. Закрыть дверцу силового

оборудования. На узле задания режимов (рис. 4.11) переключатель РЕЖИМ РАБОТЫ поставить в положение РУЧНОЙ.

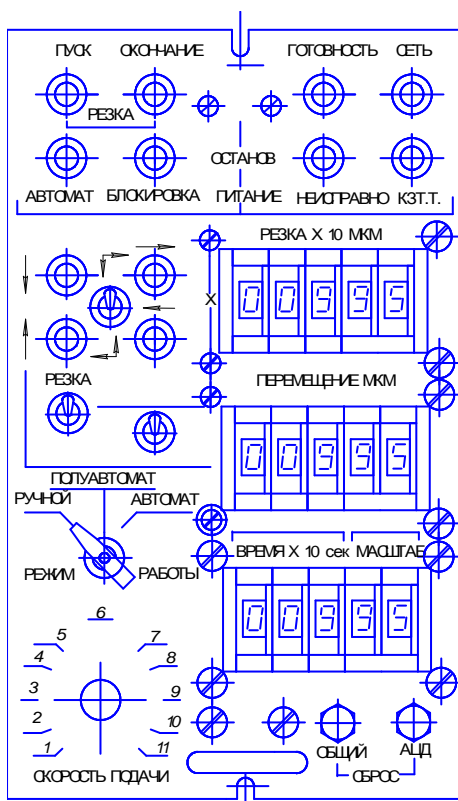


Рис. 4.11. Пульт задания режимов

Нажать на пульте управления одновременно две кнопки ПУСК, при этом должны включиться: привод вращения отрезного алмазного круга, насос подачи электролита в зону обработки.

Вручную подвести алмазный отрезной круг к заготовке и произвести электроалмазную резку. Во время резки на экране АЦД должны высвечиваться текущие значения напряжения X, XI и технологического тока X, XА



2. Настраечный режим. Переключатель РЕЖИМ РАБОТЫ (рис. 4.10) поставить в положение ПОЛУАВТОМАТ. Переключатель НАСОС на стойке силового оборудования поставить в положение 1.

В пульте задания режимов (рис. 4.10) тумблер РЕЗКА-ПЕРЕМЕЩЕНИЕ поставить в положение РЕЗКА, переключатель X-Y поставить в положение X. Тумблер  $\updownarrow$  поставить в положение соответствующее направлению движения рабочего стола при резке. Регулятором СКОРОСТЬ ПОДАЧИ установить нужную скорость подачи рабочего стола.

На декадном переключателе РЕЗКА установить начальную величину подачи рабочего стола ( $\times 10$  мкм). Тумблер СЕТЬ на блоке управления индикации поставить в положение 1, при этом должен засветиться экран АЦД. Кнопками СБРОС ОБЩИЙ, СБРОС АЦД (рис. 4.10) произвести сброс начальной нумерации на экране АЦД (полностью затемненный экран).

На пульте управления станка нажать одновременно две кнопки ПУСК, при этом должны включиться:

- привод вращения алмазного круга;
- насос подачи электролита;
- привод перемещения рабочего стола в выбранном направлении.

Во время резки, на блоке управления и индикации (рис. 4.11) на экране АЦД отображается:

- текущее значение технологического тока XX, А;
- текущее значение напряжение X, X, В.

Символы В и А соответствуют напряжению технологического тока и технологическому току соответственно, а вертикальные линии соответствуют гистограмме распределения скорости резания по времени.

Блок датчика деформации предназначен для автоматического управления скоростью подачи режущего диска (рис. 4.11) в за-

висимости от величины механической составляющей на диск в режиме резания и состоит из дифференциального датчика деформации и платы датчика деформации.

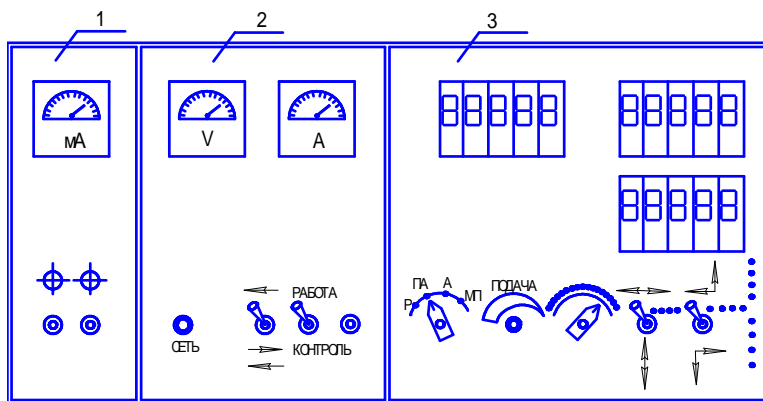


Рис. 4.11. Блок управления и индикации: 1 – узел датчика деформации; 2 – узел контроля; 3 – узел управления

При работе модуля в режиме резания информация отображается на экране АЦД соответствует показанной на рис. 4.12.

(X)(X)(X)(X)-X/Y                      (X)(X)A (X)(X)B

Рис. 4.12. Вид экрана модуля

Блок датчика деформации работает следующим образом. При начальной подаче режущего диска в обрабатываемую деталь происходит частичная стабилизация биений диска (устанавливается начальный уровень деформации диска). Оператором производится компенсация сигнала с блока датчика деформации (регулировка осуществляется регулятором нуля «0», а контроль установки на нуль по стрелочному микроамперметру. В процессе резания несогласование возрастающей скорости подачи с фактическим съемом металла приводит к перегрузке режущего диска за счет увеличения доли механической составляющей резания и как следствие деформация диска. Сигнал с датчика деформации в пульте задания

режимов преобразуется в изменение частоты управления приводом ШД (шаговый двигатель), т.е. к изменению скорости подачи диска. При разработке узла датчика деформации был использован принцип приближения скорости подачи к оптимальному режиму резания – скорости подачи диска соответствует максимально допустимой деформации диска, текущее значение перемещения по координате X, мкм; гистограмма величины скорости подачи рабочего стола усредненная в соответствии с выбранным положением переключателей МАСШТАБ и ВРЕМЯ.

После окончания резки происходит автоматический останов рабочего стола, отключается источник технологического тока, привод вращения шпинделя, насос подачи электролита. По завершении резки, гистограмма скорости сохраняется до сброса кнопками СБРОС АЦД, СБРОС ОБЩИЙ (рис. 4.11).

Для перемещения рабочего стола по координате Y (настроенный ход стола на необходимый размер), необходимо:

- переключить тумблер РЕЗКА-ПЕРЕМЕЩЕНИЕ в положение ПЕРЕМЕЩЕНИЕ (рис. 4.11)
- тумблер X-Y в положение Y;
- тумблер в выбранное направление движения рабочего стола при резке и повторить вышеуказанные операции.

3. Автоматический режим. Установить переключатель «РЕЖИМ РАБОТЫ» в положение «АВТОМАТ». Тумблер РЕЗКА-ПЕРЕМЕЩЕНИЕ в положение РЕЗКА и тумблер X-Y в положение X. Зафиксировать тумблером направление подачи рабочего стола. Нажать кнопки СБРОС ОБЩИЙ и СБРОС АЦД на узле задания режимов. Включить станок от пульта управления. До времени отрезного алмазного круга в заготовку регулятором нуля, который находится на блоке управления индикации (рис. 4.8) провести регулировку нуля.

При начале резки срабатывает индикация ПУСК на узле задания режимов и работает система слежения за технологическим процессом, которая контролируется на экране АЦД. Окончание резки контролируется по срабатыванию индикации ОКОНЧАНИЕ

и соответствует заданной величине перемещения рабочего стола, набранной на декадных переключателях РЕЗКА или ПЕРЕМЕЩЕНИЕ (рис. 4.11).

### 4.2.3. Защита от аварийных ситуаций

В случае необходимости модуль можно остановить вручную кнопкой СТОП на пульте управления. В результате – прекращается подача электролита в рабочую зону, отключается источник питания и происходит останов вращения шпинделя.

Автоматически останов модуля происходит в случаях:

- Короткого замыкания отрезного алмазного круга с деталью.
- Потери сигнала адаптивного управления по любой координате;
- При неисправности источников питания (срабатывает указатель неисправности на пульте (рис. 4.11));
- При замыкании концевых переключателей. Тогда на пульте (рис. 4.11) загорается индикатор «блокировка». Модуль можно включить после устранения причин достижения подвижных частей граничных положений.
- В случае полного износа или поломки дискового инструмента

Для настройки режимов и выявления причин срабатывания средств защиты на модуле установлен пульт (рис. 4.13)

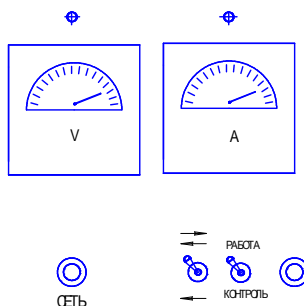


Рис. 4.13. Пульт контроля модуля

#### 4.2.4. Варианты поставок модулей

Технические характеристики модуля с двумя управляющими координатами

Количество управляющих координат	2
Производительность, шт/ч	от 20 до 60
Площадь реза, мм <sup>2</sup> , не более	180
Длина заготовки, мм, не более	100
Точность отрезки по длине, мм:	
сечение реза до 20 мм <sup>2</sup> или диаметр заготовки до 5 мм	0,03
сечение реза до 75 мм <sup>2</sup> или диаметр заготовки до 10 мм	0,05
сечение реза до 180 мм <sup>2</sup> или диаметр заготовки до 15 мм	0,15
Шероховатость обработанной поверхности, R <sub>a</sub> , мкм	0,63 – 1,25
Частота вращения шпинделя, об/мин	до 2800
Скорость подачи стола в автоматическом режиме, мм/мин	от 2 до 12
Продольный ход стола, мм	150
Поперечный ход стола, мм	100
Вертикальный ход шпинделя, мм	80
Отклонение от параллельности хода стола относительно плоскости щеки шпинделя на 100 мм хода, мм	0,02
Отклонение от параллельности перемещения плоскости стола относительно оси шпинделя на 100 мм хода, мм	0,1
Отклонение взаимной перпендикулярности продольного и поперечного хода стола, на длину хода, мм	0,03
Отклонение от перпендикулярности хода шпинделя, относительно плоскости стола, на 80 мм хода, мм	0,1
Цена деления нониусных шкал, мм	0,01
Потребляемая мощность, кВт	3,0
Пределы установки напряжения холостого хода, В	от 3 до 10
Дискретность установки номинала напряжения холостого хода, В	0,25
Пульсация напряжения холостого хода, %	до 10
Максимальный технологический ток, А:	

при $U$ от 3 до 5 В	100 А
при $U$ от 5 до 10 В	50 А
Режущий инструмент	Алмазный отрезной круг токопроводящий
Толщина отрезного круга, мм	от 0,3 до 0,6
Алмазный круг-электрод	катод
Деталь-заготовка	анод
Продолжительность непрерывной работы, ч, не менее	100
Вместимость бака для электролита, л	30
Производительность насоса для подачи электролита, л/мин	22
Габаритные размеры(длина×ширина×высота), мм	820×800× 1720
Масса станка, кг	600
Технические характеристики модуля с пятью управляющими координатами	
Количество управляющих координат	5
Площадь реза, мм <sup>2</sup> , не более	от 20 до 180
Максимальная длина заготовки, мм,	100
Длина отрезаемой заготовки, мм, не менее	1,0
Точность разделения, мм:	0,02
Шероховатость поверхности реза, $R_a$ , мкм	до 0,63
Производительность обработки, шт/ч	от 30 до 100
Диаметр электроалмазного диска, мм	от 70 до 125
Толщина электроалмазного диска, мм	от 0,3 до 0,45
Частота вращения шпинделя, об/мин	до 2800
Средняя скорость резания, мм/мин	от 2,0 до 6,0
Пределы регулирования подач, мм/мин	до 12
Максимальный ток, А	120
Рабочее напряжение, В	от 3 до 8
Емкость бака для электролита, л	20
Способ подачи электролита в зону обработки	поливом

Производительность насоса для подачи электролита, л/мин	22
Габариты станка (длина×ширина×высота), мм	848×605×1467
Масса станка, кг, не более	200

### 4.3. Дискový инструмент

#### 4.3.1. Расчет размеров

В методике, изложенной в 3.2.2 дан порядок расчета предельной толщины диска из условий закрепления в нем инструмента и диаметра, обеспечивающего устойчивость положения под действием сил резания.

По формуле (3.7) толщина диска может быть не менее, приведенной в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Толщина электроалмазного инструмента (зерна до 50 мкм)  
и электроабразивного (зерна более 50 мкм)

№ п/п	Толщина диска, мм	Размер зерен, мм	Минимальная толщина инструмента, мм	Толщина инструментов, мм
1	0,28	0,03	0,3	0,3
		0,05	0,31	0,3
		0,08	0,33	0,35
		0,10	0,35	0,35
		0,15	0,38	0,4
2	0,36	0,03	0,38	0,40
		0,05	0,40	0,40
		0,08	0,42	0,40
		0,10	0,43	0,45
		0,15	0,46	0,50
3	0,45	0,05	0,48	0,50
		0,08	0,5	0,50
		0,10	0,52	0,55
		0,15	0,55	0,55
4	0,5	0,05	0,54	0,55
		0,08	0,56	0,55
		0,10	0,58	0,60
		0,15	0,60	0,60

Диаметры дисков должны быть не более рассчитанных по формулам (3.19), (3.20).

Величина диаметра зависит от толщины инструмента, самого диска, материала, системы управления по различным координатам.

Предельные значения наружных диаметров электроалмазных дисков приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

**Выбор диаметров дисков**

№ п/п	Толщина диска, мм	Диаметр, мм	
		расчетный	выпускаемых инструментов
1	0,3	78,9	80
2	0,35	81	80
3	0,4	90,8	90
4	0,5	107,3	110
5	0,6	119	125

**4.3.2. Выбор характеристик**

Свойства абразивного инструмента зависят от характеристик зерен, связки и метода закрепления зерен на диске. При закреплении зерен вдавливанием концентрация алмаза не превышает 50.

Если зерна закреплены связкой или гальванически, то их размеры желательно иметь более 30 микрон.

В табл. 4.5 приведены результаты испытаний алмазных электропроводящих кругов с различной концентрацией алмазных зерен.

Таблица 4.5

**Выбор характеристик алмазных дисков**

№ п/п	Концентрация алмазных зерен	Производительность, г/мин	Износ дисков, %	Ra, мкм
1	50	1,8	0,145	1,0
2	100	2,3	0,07	0,63
3	150	2,4	0,05	0,32

Анализ табл. 4.8. показывает, что алмазные круги желательно иметь с наибольшей концентрацией зерен без покрытия для их закрепления.



## **4.4. Влияние процесса комбинированного разделения материалов на эксплуатационные свойства изделий**

### ***4.4.1. Стабильность свойств материалов после комбинированных процессов***

В процессе комбинированной обработки в поверхностных слоях изделий происходят структурные изменения, которые могут вызвать высокие уровни остаточных напряжений, которые сложно удалить полностью или значительно их снизить ни низкотемпературным отпускком, ни дисперсионным или мартенситным твердением при температурах 800 – 1000 К.

Максимальная глубина искаженного слоя в обработанных поверхностях может достигать 0,2 мм, что влияет на эксплуатационные свойства изделий.

В дальнейшем в таких изделиях протекают диффузионные, релаксационные и другие процессы, которые сопровождаются не только изменением свойств и размеров деталей во времени, но и параметров приборов в целом.

Применение же электрических и комбинированных методов обработки вместо механического формообразования и алмазной ручной доводки позволяет изготавливать детали и выполнять их доводку без внесения структурных изменений даже в тонкостенные упругие элементы, что обеспечивает стабильность характеристик детали.

В работе приведены исследования по определению факторов, обеспечивающих оптимальные и эксплуатационные характеристики деталей.

Основным определяющим моментом в исследуемой нами технологии изготовления деталей стало формообразование точных изделий без искажения структуры и механических свойств.

Анализ теоретических и экспериментальных данных по стабильности характеристик элементов giroприборов, пружинных

сталей и других материалов, а также анализ брака в отрасли показывает, что изменение размеров деталей во времени вызывающий разброс основных параметров изделий происходят в основном из-за микропластического деформирования поверхностных слоев деталей, распада неустойчивых фаз и структур образовавшихся в процессе реализации комбинированных методов термической или финишной механической и других видов обработки. При этом деформирование тонкостенных, миниатюрных и сложнопрофильных деталей с малой или неравномерной конструктивной жесткостью изменяется по экспоненте несколько лет и достигает  $1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-1} \%$ .

При внедрении новых технологических процессов необходимо однозначно установить последствия операции на свойства изделий в пределах сроков ресурса. Проведенный анализ свидетельствует о том, что не только для различных металлов, но даже для одних и тех же сплавов, имеющих разное структурное состояние, трудно однозначно установить влияние новых методов обработки, их характер и закономерности изменения свойств материалов и размеров детали во времени.

Любой микродефект материала в том числе может приводить к ухудшению его характеристик как в процессе изготовления, так и при эксплуатации.

Поэтому исходные свойства, материалов после обработки и термоупрочнения, необходимо сохранять в зонах упругости в процессе их эксплуатации.

Для оптимизации режимов и обоснованного выбора новых методов обработки необходимо:

1. Установить причины и уровень структурных искажений в поверхностных слоях тонких деталей в процессе их изготовления по применяемой технологии.

2. Определить оптимальное сочетание операций, в том числе новых, их последовательность и обосновать выбор рациональных методов обработки для уменьшения или полного устранения иска-

жений структуры и физико-механических свойств, определяющих качество и надежность изделий.

С этой целью исследовались влияние комбинированных методов обработки на изменение в поверхностном слое микроструктуры, параметров кристаллической решетки ( $a$ , нм), ширины рентгеновских дифракционных линий ( $B$ , угл.мин), микронапряжений, т.е. искажений II рода ( $\Delta a/a$ ), процентного содержания остаточного аустенита –  $\gamma_{\text{ост}}$ , микротвердости ( $H_M$ ), остаточной деформации ( $\Delta \xi_{\text{ост}}$ ), прецизионного предела упругости ( $\sigma_{0,001} \dots \sigma_{0,005}$ ), от которых в основном зависит стабильность характеристик деталей во времени, что определяет эксплуатационные свойства изделий.

Исследования структуры и механических свойств материала в тонких сечениях после важнейших технологических операций проводились на образцах, имитаторах и деталях из вязких жаропрочных, типовым представителем которых являются ЭП 702.

Основной эксплуатационной характеристикой этих сплавов является обеспечение условного предела упругости  $\sigma_y$ , характеризующего при изгибе ее сопротивление величине остаточной микропластической деформации с допуском  $\Delta \xi_{\text{ост}} = 0,001 \dots 0,005$  %. Исследовалось влияние различных способов обработки на анизотропию предела упругости  $\sigma_{0,001} \dots \sigma_{0,005}$  от искажения тонкой структуры в поверхностном слое тонкостенных упругих элементов. Исследования проводились на плоских образцах  $60 \times 5 \times 0,3$  мм после закалки от 1100 К (выдержка 1 час) на воздухе, после различных способов двухсторонней обработки и последующего мартенситного старения.

Рентгеноструктурным анализом установлено, что в процессе электроэрозионной комбинированной обработки за счет составляющей возникает мгновенное микровзрывное расплавление и испарение металла ( $T = 6300 \dots 10000$  К) в поверхностном слое сплава происходит обратное  $\alpha - \gamma$  превращение. Содержание  $\gamma$ -фазы (высокоуглеродистого аустенита) в поверхностном слое достигает 90 %, а на глубине 80 мкм – 8 % (см. рис. 4.14).

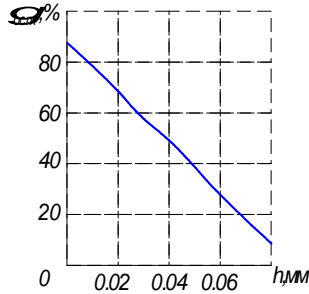


Рис. 4.14. Содержание остаточного аустенита в поверхностном слое сплава после комбинированной разрезки

Обычно при знакопеременных нагрузках или термической активации распадав стали аустенита в мартенсит  $\gamma \rightarrow \alpha$  сопровождается увеличением размеров деталей, что может вызвать недопустимые погрешности у деталей после разделения заготовок.

Влияние составляющих комбинированной обработки с наложением электрического поля на изменение ширины рентгеновской дифракционной линии  $B_{211}$  на поверхности плоских образцов представлена на рис. 4.15.

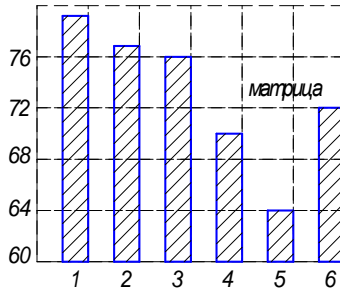


Рис. 4.15. Изменение ширины линии  $B'_{211}$  на поверхности жаропрочного сплава после различных способов обработки: 1 – старение + электроалмазная доводка; 2 – фрезерование + старение; 3 – старение + электроалмазное разделение ( $h = 0,1$  мм) + отпуск (170 С, 8 ч); 4 – чистовое точение ( $h = 0,1$  мм) + старение; 5 – чистовое точение ( $h = 0,05$  мм) + старение; 6 – старение + эрозионно-химическая обработка (ЭЭХО) ( $h = 0,1$  мм)

После электроалмазной доводки (1 на рис. 4.15) на поверхности сплава произошло наибольшее искажение кристаллической решетки, вызванное в основном микронапряжениями. Минимальное искажение по сравнению с матрицей получено после тонкого чистового точения (5 на рис. 4.15) с глубиной обработки поверхности  $h = 0,05$  мм.

Микронапряжения поверхности после ЭЭХО аналогичны тонкой структуре матрицы образцов. Структура после ЭЭХО стабильно.

Результаты исследований изменений ширины линии  $B_{211}$  и параметра  $a$  кристаллической решетки  $\alpha$  – твердого раствора по глубине поверхностного слоя плоских упругих образцов в зависимости от способов обработки после последовательного снятия слоев металла комбинированной полировкой показаны на рис. 4.16 и 4.17

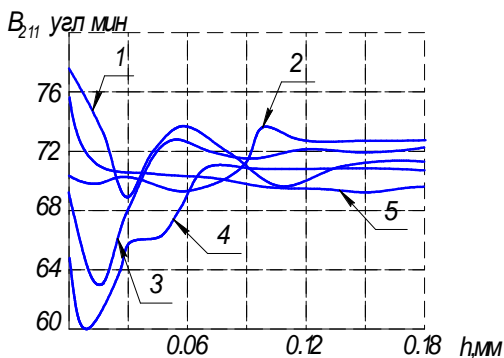


Рис. 4.16. Изменение ширины линии  $B_{211}$  от способов обработки:  
 1 – фрезерование + старение; 2 – старение + электроалмазное разделение ( $h = 0,1$  мм) + отпуск (470 К, 8 часов); 3 – чистовое точение ( $h = 0,1$  мм) + старение; 4 – чистовое точение ( $h = 0,05$  мм) + старение; 5 – старение + ЭЭХО ( $h = 0,1$  мм)

Из анализа рис. 4.16 и 4.17 видно, что глубина зоны наклепа, уровень уширения линий  $B_{211}$  параметр решетки  $a$  зависят от спо-

сособов и режимов обработки поверхности сплава ЭП 702. Глубина наклепа с каждой стороны образцов колеблется от 50 до 150 мкм, что составляет 25 – 60 % от их поперечного сечения.

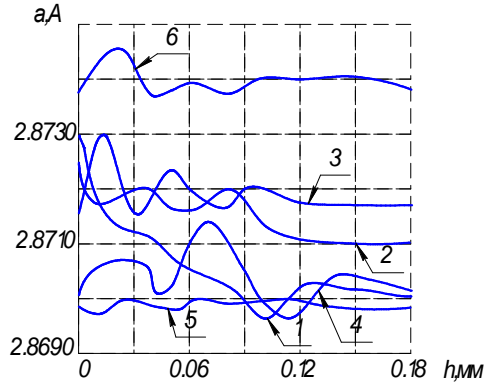


Рис. 4.17. Изменение параметра решетки «а» сплава от способов обработки: 1 – фрезерование + старение; 2 – старение + электроалмазное разделение ( $h = 0,1$  мм) + отпуск (170 С, 8 ч); 3 – чистовое точение ( $h = 0,1$  мм) + старение; 4 – чистовое точение ( $h = 0,05$  мм) + старение; 5 – старение + ЭЭХО ( $h = 0,1$  мм)

Выбор наклепа, как известно из [20], оказывает большое влияние на усталостную прочность материалов, что является определяющим для изделий, работающих при знакопеременных нагрузках.

В то же время в процессе ЭЭХО в поверхностном слое образцов не происходит изменение  $B_{211}$  и  $a$ . их уровень после ЭЭХО остается неизменным по всему сечению упругих элементов (рис. 4.18).

На рис. 4.20 представлены результаты измерений предела упругости  $\sigma_{0,001} \dots \sigma_{0,005}$  в зависимости от способов обработки. Минимальные значения  $\sigma_y$  получены на образцах, имеющих наибольшую глубину наклепанного слоя после фрезерования. Максимум  $\sigma_y$  достигнут после ЭЭХО на образцах, в поверхностном слое которых  $B_{211} = 71 \dots 73$  угл. мин,  $a = 2,8695 \dots 2,8705$ ,  $HV = 578 \dots 618$ , что соответствует упрочненному состоянию матричного твердого раствора для сплавов типа ЭП 702. Следовательно процесс ЭЭХО

обеспечивает стабильность упругих свойств сплавов за счет сохранения однородности структуры как по всему объему металла, так и на его поверхности, что дает основание считать комбинированное разделение перспективным не только для дефицитных материалов, но и жаропрочных сплавов.

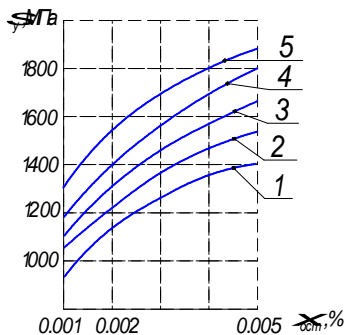


Рис. 4.18. Зависимость предела упругости и остаточной деформации сплава ЭП 702 от способов обработки: 1 – фрезерование + старение; 2 – старение + электроалмазное разделение ( $h = 0,1$  мм) + отпуск ( $170$  °С, 8 ч); 3 – чистовое точение ( $h = 0,1$  мм) + старение; 4 – чистовое точение ( $h = 0,05$  мм) + старение; 5 – старение + ЭЭХО ( $h = 0,1$  мм)

На основании исследований структуры и механических свойств сплава ЭП 702 комбинированный процесс с наложением электрического поля можно рекомендовать для финишной обработки поверхности прецизионных деталей, снятия дефектного слоя металла, при этом установлено, что механические свойства сплава не снижаются, т.е. обеспечивается выполнение эксплуатационных требований.

#### **4.4.2. Технологическая наследственность при использовании комбинированных методов обработки**

Из [24] известно, что наложение электрического поля в комбинированных методах обработки оказывает существенное влияние на свойства материалов при последующих операциях. Харак-

теристики и структура сплавов, сформировавшиеся перед операцией с комбинированным воздействием на объект, может влиять на скорость механического удаления припуска, анодного растворения, высоту неровностей и усталостную прочность сплавов. Исследования проводились на типовом представителе жаропрочных сплавов ЭП 702.

Упрочнение сплава ЭП 702 после комбинированной обработки достигается, в процессе мартенситного старения при температурах 500 – 520 °С. Оно вызывается выделением мелкодисперсных интерметаллидных фаз, создающих в мартенситной матрице особую дислокационную структуру. Твердость сплава ЭП 702 после закалки, не превышает 24 ... 35,5 HRC<sub>3</sub>, а после мартенситного старения твердость достигает 51 ... 55 HRC<sub>3</sub>.

Необходимо отметить, что даже незначительные изменения режима старения, прежде всего температуры, времени и скорости старения, могут привести к «недостариванию» или «перестариванию» сплава, что особенно недопустимо для тонких образцов, полученных разделением материалов, так как изменяет их размеры.

Проводились исследования по отработке режима мартенситного старения на тонких образцах из сплава ЭП 702 толщиной не более 1,0 мм, вырезанных из прутка электроалмазной резкой на автоматизированном модуле.

Толщина образцов определялась необходимостью припуска для последующего полного удаления термически наклепанного слоя с помощью ЭЭХО, а также для предотвращения коробления и поволоков в процессе старения. Толщина образцов после ЭЭХО перед проведением всех измерений составляла 0,2 – 0,3 мм.

По результатам измерений максимальные значения  $\sigma_y$  получены для образцов, состаренных по режимам: T, K

1. 750±10 К, 4 часа.
2. 800±10 К, 1,5 часа.



По результатам коррозионных испытаний снижение времени старения при 800 К с трех до полутора часов, не снижает коррозионной стойкости стали в агрессивной среде.

В то же время старение по режиму 750 К, 4 часа, повышая упругие свойства сплава привело к снижению коррозионной стойкости.

С целью выяснения влияния скорости нагрева при старении на свойства упрочненных образцов старение при температурах 780 К, 820 К, и 900 К проводилось при двух скоростях нагрева 6-7 К/мин и 17 К/мин. Результаты измерений представлены на рис. 4.19 – 4.21; микроструктура представлена на рис. 4.22.

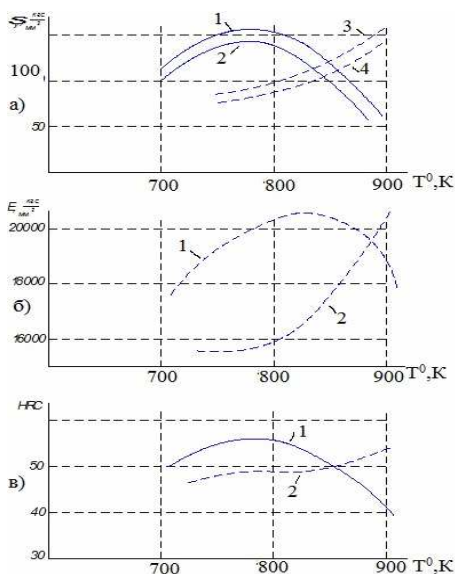


Рис. 4.19. Механические свойства тонких образцов после разделения из стали ЭП 702 после мартенситного старения в течение 90 минут в интервале температур 700 – 900 К: а)  $\delta_y = f(K)$  1 –  $\delta_{0,005}$ , скорость нагрева 307 К/мин; 2 –  $\delta_{0,002}$ , скорость нагрева 317 К/мин; 3 –  $\delta_{0,005}$ , скорость нагрева 317 К/мин; 4 –  $\delta_{0,002}$ , скорость нагрева 317 К/мин; б)  $E = f(K)$  1 – скорость нагрева 307 К/мин; 2 – скорость нагрева 317 К/мин; в)  $HRC_3 = f(K)$  1 – скорость нагрева 307 К/мин; 2 – скорость нагрева 317 К/мин

Из рис. 4.19 видно, что механические свойства материалов, обработанных комбинированным методом, близки к аналогичным показателям других видов технологических операций и могут подвергаться термической обработке без корректировки режимов предшествующей и последующих этапов формообразования.

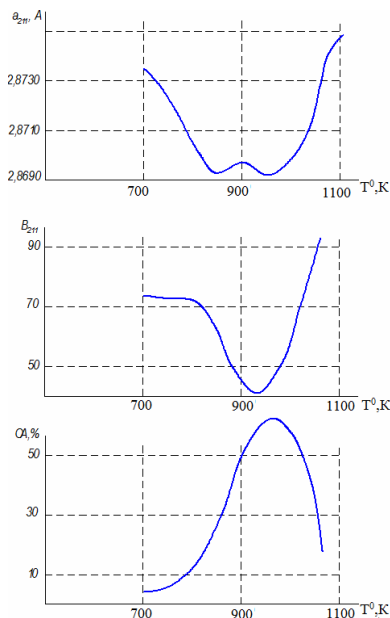


Рис. 4.20. Параметры структуры и фазовый состав после разделения тонких образцов из стали ЭП 702 после мартенситного старения в течение 90 минут в интервале температур 700 – 1100 К

Таким образом, для снижения негативного воздействия технологической наследственности по стабилизации химического состава и микроструктуры материала необходим рекристаллизационный отжиг в течение 1 часа при температуре  $1200 \pm 10$  К.

Хорошие результаты по стабилизации свойств сплавов после различных видов обработки дает старение в течение 1,5 часов при нагреве материала со скоростью 6-7 К/мин до 750 – 770 К.

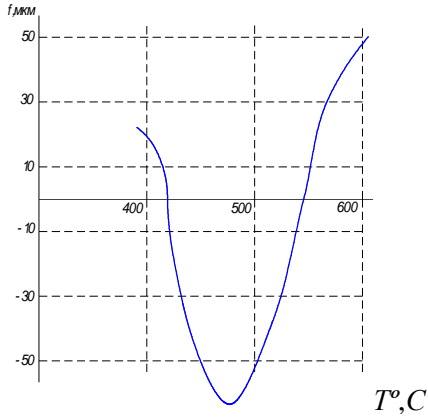


Рис. 4.21. Влияние температуры старения на величину остаточной деформации от изгиба плоских образцов из стали ЭП 702 вырезанных комбинированным методом в процессе испытаний на циклопрочность (База  $N = 3 \cdot 10^6$  циклов – const)

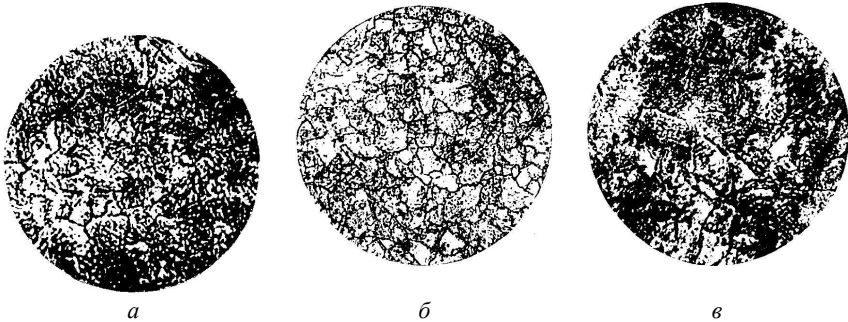


Рис. 4.22. Микроструктура вырезанных комбинированным методом образцов после различных режимов мартенситного старения: *а* – 400 °С, 90 мин, скорость нагрева 6-7 град/мин; *б* – 480 °С, 90 мин, скорость нагрева 6-7 град/мин; *в* – 600 °С, 90 мин, скорость нагрева 6-7 град/мин

Процессы разделения заготовок с наложением электрического поля позволяют получить стабильные характеристики материалов после всех видов предшествующей обработки.

#### **4.5. Перспективы применения комбинированного разделения**

Гибкие автоматизированные модули разделения высоко-твердых, дефицитных, хрупких материалов позволяет обрабатывать номенклатуру деталей круглого сечения диаметров до 15 мм.

В процессе разработки и испытаний модуля выявились дополнительные возможности изготовления изделий некруглого сечения площадью, соответствующей диаметру 15 мм. К этой категории следует отнести пластинки из твердых сплавов для резцов, фрез, сверл, губок мерительных инструментов и вставок для цанг в инструментальном производстве.

В основном производстве электроалмазная резка может применяться для магнитов с направленной кристаллизацией, витых сердечников из пермаллоя, где механическая обработка дисковыми фрезами приводит к значительному браку из-за больших сил резания.

Электро-абразивный метод может использоваться как для черновых, так и для чистовых операций. При черновой обработке режимы выбирают, исходя из условия получения максимальной производительности. Для чистовых операций необходимо обеспечить высокую точность и хорошее качество обрабатываемой поверхности.

При использовании абразивонесущего инструмента точность обработки значительно выше, чем при электроконтактном или электрохимическом шлифовании, но в ряде случаев ниже, чем при обработке абразивным или алмазным инструментом. Обычно погрешность после электроабразивного шлифования находится в пределах 0,01 ... 0,03 мм. Для сравнения можно указать, что погрешность алмазного шлифования обычно составляет 0,001 ... 0,005 мм. Снижение точности при наложении тока объясняется повышенным съемом металла на кромках и удалением его с поверхности, которая обработана абразивом начисто. Бесконтактный

процесс анодного растворения зависит от многих параметров, которые изменяются во времени, поэтому съем металла на участках заготовки будет различным.

В схемах шлифования со свободным абразивом сложно обеспечить его постоянную концентрацию в промежутке между заготовкой и инструментом. Поэтому не удастся достичь стабильного съема припуска.

Из-за постоянного обновления абразивных зерен усилия резания при анодно-абразивной обработке в 1,5 ... 2,0 раза ниже, чем при шлифовании. При этом снижается наклеп поверхности, не образуются микротрещины. Металл, снимаемый с заготовки, не налипает на инструмент – исключается сильный нагрев из-за трения контактных поверхностей и не возникают местные прижоги. Такие дефекты особенно опасны для высоконагруженных деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок (зубчатых колес, элементов шлицевых соединений). Отсутствие шлифовочных прижогов позволяет повысить ресурс деталей. Шероховатость поверхности после электроалмазной и электроабразивной обработки уменьшается из-за анодного растворения вершин микронеровностей. Средняя высота неровностей  $R_z$  может быть определена по зависимости  $R_z = K R_{zш}$ , где  $R_{zш}$  – высота неровностей после шлифования;  $K = 0,1 \dots 0,5$  – коэффициент, учитывающий скругление выступов при наложении тока.

При черновых режимах электро-абразивной обработки съем металла происходит в основном за счет эрозии. Процесс близок к электроэрозионному.

Черновая обработка выполняется при повышенных напряжениях. При чистовых режимах съем металла абразивными зернами и эрозией снижается, но возрастает доля анодного растворения.

При использовании электронейтрального инструмента скорость съема возрастает из-за анодного растворения и, главное, из-за интенсификации процесса резания абразивным инструментом.

Поэтому расчет производительности выполняют, как при шлифовании, а влияние тока учитывают коэффициентом, который может изменяться в широких пределах и зависит от свойств обрабатываемого материала.

Производительность процесса электро-абразивной обработки с применением свободного абразива или наполнителя в несколько раз выше, чем при аналогичных операциях механической обработки. При использовании свободного абразива в схеме шлифования скорость съема металла находят по зависимостям обработки электронейтральным инструментом. Если обрабатывают удаленные от электрода с твердым токоведущим наполнителем участки поверхности, то производительность возрастает в десятки раз по сравнению с анодным растворением без наполнителя.

## **Выводы**

1. Предложена новая структура технологического процесса с расчетом режимов по каждой управляющей координате автоматизированного модуля и с адаптацией параметров процесса по обратным связям.

2. Разработана методика расчета для выбора электроабразивного инструмента, что позволило приобретать или изготавливать средства оснащения с учетом получения достижимых технологических показателей для конкурентных типоразмеров деталей.

3. Созданы гибкие автоматизированные модули с числом управляющих координат до 5, что позволило применить новые разработки по стабилизации режимов, положения инструмента в пазе, предложений соискателем новый способ калибровки, повышающий точность разделения до 20 мкм, что в 5 – 10 раз лучше по сравнению с ранее используемой технологией разделения электроабразивным методом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сформулированы требования к технологической системе для комбинированного разделения материалов. Требования включают: поддержание постоянными соотношения параметров механического, теплового и химического воздействия на характеристики режимов обработки с использованием адаптивного управления процессом; управление формой и положением инструмента в течение цикла разделения по сигналам от блока автоматизации оборудования; ограничение режимов в зависимости от вида обрабатываемого материала; возможность независимого и совместного управления воздействиями в комбинированном процессе; требования по надежности к средствам автоматизации модуля, включающие срок безотказной работы не менее ресурса механической части оборудования.

2. Решена проблема стабильного получения заданной точности и качества поверхностного слоя путем автоматизированного управления составляющими режима комбинированного процесса формой и положением инструмента, применением адаптивных систем управления. При разделении

вольфрама и магнитных сплавов устранены скалывания и нарушения кромок, достигнуты результаты:

- погрешность по торцам не более 20 мкм (допуск 0,03 мм);
- шероховатость  $R_a = 0,32$  мкм (допускается 0,63 мкм)
- снижение потерь материала на разделение: для вязких сплавов до 8 раз, для хрупких материалов – до 10 раз.

3. Обоснованы предельные возможности комбинированного разделения. В частности, показано, что за счет снижения интенсивности процесса на выходе из паза, замены материалов и размеров инструмента, введения дополнительных блоков адаптивного управления гибким автоматизированным модулем возможно снизить потери материалов (например драгоценных металлов, полупроводников) до 10 раз по сравнению с достигнутым уровнем (ширина реза диском может быть снижена до 0,3 мм).

4. Разработаны новые (на уровне изобретений) конструкции дисковых электродов с адаптивным управлением положением режущей кромки в зависимости от состояния абразивной составляющей и режима разделения материала.

5. Создан многокоординатный гибкий автоматизированный модуль с блоками адаптивного управления механическими, электрическими и силовыми факторами

Основные технические характеристики модуля:

Размеры разделяемых заготовок,

Площадь реза, мм<sup>2</sup> ..... до 180.

Длина заготовки, мм ..... до 100

Число управляющих координат ..... 5

Система управления ..... Адаптивная

Диапазон рабочих подач инструмента, мм/сек ..... 0,03 – 0,2

Напряжение, В ..... 3 – 8

Модуль выпускался малыми сериями по заказам предприятий.

6. Оптимизированы технологические режимы и разработан технологический процесс разделения материалов исследуемых марок. Технологический процесс спроектирован в форме дискретной системы с автономным управлением режимами по координатам с адаптацией параметров для конкретных условий обработки. Показано, что при адаптивном управлении процессом и положением режущей кромки инструмента появляется возможность снизить энергетическое воздействие на процесс за счет напряжения до 2 раз,



устранить опасность прижогов и повысить до 2-х раз точность поверхностей раздела без ухудшения их качественных характеристик.

7. Проведены промышленные испытания технологической системы для различных изделий машиностроения, приборостроения, радиотехники. Достигнуты положительные результаты и получен экономический эффект от внедрения.

8. Раскрыты перспективы использования результатов работы в других отраслях, применяющих драгоценные и дефицитные материалы (медицинская техника, стоматология, средства управления аппаратами, электрические разъемы и др.), где экономия от устранения потерь металлов может составить значительную сумму.

Разработан технологический режим, созданы новые конструкции инструмента и оборудования для комбинированного разделения материалов, что позволило снизить потери материала до 10 раз, повысить точность и качество поверхностного слоя до уровня требований к готовому изделию, сократить цикл изготовления деталей до 2 раз, затраты на операцию – до 3 раз, устраняется загрязнение окружающей среды продуктами обработки.

Реализация работы позволяет получить прибыль более 560 тысяч рублей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 1641539 Способ резки металлов электрическими методами И.А. Одинцов, С.Ф. Тарасов, В.Б. Чужавин, З.Б. Садыков и В.П. Смоленцев.
2. А.с. 1641540 Сборный электрод-инструмент для электроабразивной резки. И.А. Одинцов, С.Ф. Тарасов, З.Б. Садыков, А.Ф. Зохиринов, В.П. Смоленцев.
3. А.с. 1657303. Способ электроабразивной резки / С.Ф. Тарасов, И.А. Одинцов, З.Б. Садыков, В.П. Смоленцев.
4. А.с. 1016129. Способ электроабразивной обработки в среде электролита / В.П. Смоленцев, З.Б. Садыков, Ш.С. Гафиатуллин.
5. А.с. 1653920. Способ электроабразивной резки / И.А. Одинцов, З.Б. Садыков, С.Ф. Тарасов, В.П. Смоленцев.
6. *Байсуков И.А.* Электрохимическая обработка металлов / И.А. Байсуков. – М.: Высшая школа, 1981. – 152 с.
7. *Бердник В. В.* Шлифование токопроводящими кругами с наложением электрического поля / В.В. Бердник. – Киев: Высшая школа, 1984. – 124 с.
8. *Галажен С.И.* Электрохимическая обработка сплавов и металлов микросекундным импульсом тока / С.И. Галажен. Кострома: КГТУ, 2001. – 118 с.
9. *Де Барр А.Е.* Электрохимическая обработка / А.Е. Де Барр, Д.А. Оливер. – М.: Машиностроение, 1973. – 183 с.
10. *Каримов А.Х.* Методы расчета электрохимического формообразования / А.Х. Каримов, В.В. Клоков, Е.И. Филатов. – Казань: Изд-во КРУ, 1990. – 388 с.

11. *Кащеев В.Д.* Закономерности процесса формирования микрошероховатости поверхности при различных видах электрохимической обработки / В.Д. Кащеев // *Материалы международного симпозиума (ИСЕМ-6)*. – Краков, 1980. – С. 355 – 359.

12. *Энциклопедия. Технология изготовления деталей машин Т-III-3* / А.М. Донский, А.С. Суслов, Ю.Ф. Назаров и др.; под общей ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2000. – 840 с.

13. *Митяжкин Д.З.* Электрические методы обработки деталей / Д.З. Митяжкин. – М.: Машиностроение, 1982. – 496 с.

14. *Попилов Л.Я.* Электрохимическая обработка непрофилированным электродом-инструментом / Л.Я. Попилов. – М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.

15. *Седыкин Ф.В.* Размерная электрохимическая обработка деталей машины / Ф.В. Седыкин. – М.: Машиностроение, 1976. – 302 с.

16. *Смоленцев В.П.* Электрохимическое маркирование деталей / В.П. Смоленцев, Г.П. Смоленцев, З.Б. Садыков. – М.: Машиностроение, 1983. – 72 с.

17. *Смоленцев В.П.* Физические основы и технологическое применение электроконтактного процесса / В.П. Смоленцев, Н.В. Сухоруков. – Воронеж: РИА, 1998. – 148 с.

18. *Седыкин Ф.В.* Оборудование для размерной электрохимической обработки деталей машин / Ф.В. Седыкин. – М.: Машиностроение, 1980. – 277 с.

19. *Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов* / Б.А. Артамонов, Ю.С. Волков, Дрожалова и др. Т. 1, 2. Обработка материалов с применением инструмента; под ред. В.П. Смоленцева. – М.: Высшая школа, 1983.

20. *Электрохимическая размерная обработка деталей сложной формы* / В.А. Головачёв и др. – М.: Машиностроение, 1969. – 196 с.

21. *Хафизов И.И.* Управление процессом комбинированной (электроалмазной) обработки высокотвердых материалов / И.И. Хафизов, З.Б. Садыков // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2007. № 1 (45). С. 18 – 20.

22. *Садыков З.Б.* Исследование структурной стабильности сплава ЭП 702, оптимизация термообработки сплава на максимальные упругие свойства / З.Б. Садыков, И.И. Хафизов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2007. № 2 (46). С. 26 – 28.

23. *Хафизов И.И.* Экономическая эффективность и результативность способов разделения материалов электроалмазной обработкой / И.И. Хафизов // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 17. С. 292 – 296.

24. *Хафизов И.И.* Технологические приемы с наложением электрического поля при малоотходном разделении материалов / И.И. Хафизов // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 18. С. 31 – 36.

25. *Хафизов И.И.* Анализ способов малоотходного разделения дефицитных материалов с наложением электрического поля / И.И. Хафизов, З.Б. Садыков // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2012. № 4. Вып. 2 (68). С. 97 – 101.

26. *Хафизов И.И.* Расчет режимов прецизионного разделения материалов электроалмазной обработкой / И.И. Хафизов, З.Б. Садыков // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2012. № 4. Вып. (68). С. 101 – 104.

21. *Хафизов И.И.* Пути снижения расхода материалов при их разделении комбинированными методами / И.И. Хафизов // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 1. С. 208 – 212.

28. *Хафизов И.И.* Инновационная модель и способы комбинированного малоотходного разделения токопроводящих материалов / И.И. Хафизов // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 1. С. 212 – 217.

29. *Хафизов И.И.* Влияние конструкции оборудования и средств автоматизации электрических методов на повышение качества обработки / И.И. Хафизов // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 3. С. 222 – 225.

31. *Хафизов И.И.* Технология комбинированного упрочнения / И.И. Хафизов // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 3. С. 226 – 229.

32. *Хафизов И.И.* Гибкий автоматизированный модуль с координатами управления для комбинированной обработки / И.И. Хафизов // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 7. С. 286 – 289.

33. Пат. 2323071, Российская Федерация, МПК7 В23Н3/00, В23Н9/14. Способ электрохимической обработки / И.И.Хафизов, А.Р. Закирова, З.Б. Садыков; № 2006113276/02; заявл. 10.04.2006; опубл. 10.11.2007.

34. Пат. 2333820 Российская Федерация, МПК7 В23Н3/00, В23Н5/00, В23Н5/06. Способ комбинированного разделения токопроводящих материалов / В.П. Смоленцев, И.И. Хафизов, О.Н. Кириллов, А.М. Гренькова; заявл.31.10.2006; опубл. 20.09.2008.

35. Пат. 2341358. Российская Федерация, МПК7 В23Н3/00, 7/00, 7/12. Способ разделения заготовки из токопроводящего материала / В.П. Смоленцев, О.Н. Кириллов, Е.В. Смоленцев, А.М. Гренькова, И.И. Хафизов; №2007111233/02; заявл. 27.03.2007; опубл. 20.12.2008, Бюл. № 35. 4 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
Глава 1. Технологические приемы с наложением электрического поля при малоотходном разделении материалов.....	6
1.1. Способы малоотходного разделения материалов .....	6
1.1.1. Основные схемы .....	6
1.1.2. Комбинированные методы обработки.....	10
1.1.3. Области применения процессов с наложением электрического поля .....	13
1.2. Технологические процессы .....	18
1.2.1. Порядок проектирования техпроцесса электроэрозивной обработки .....	18
1.2.2. Особенности проектирования технологического процесса ЭХО .....	22
1.2.3. Этапы построения процесса (на примере ЭХО).....	23
1.3. Анализ моделей процессов электрохимической и комбинированной обработки .....	27
1.3.1. С механической депассивацией поверхности.....	27
1.3.2. С абразивным удалением припуска .....	36
1.4. Технологические показатели процессов.....	39
1.4.1. Точность обработки.....	39
1.4.2. Качество поверхности .....	40
1.4.3. Производительность.....	41
1.5. Конструкции оборудования и средств автоматизации для электрических методов обработки.....	44
1.5.1. Силы, действующие на элементы конструкции .....	44
1.5.2. Защита от коррозии конструктивных элементов оборудования .....	47
1.5.3. Вспомогательное оборудование.....	49
1.5.4. Типовая структура оборудования [92].....	51

Глава 2. Пути снижения расхода материалов при их разделении комбинированными методами обработки.....	57
2.1. Основы выбора метода обработки .....	57
2.2. Способы управления стабильного резания при комбинированном разделении заготовок.....	61
Глава 3. Моделирование процесса чистового разделения материалов .....	71
3.1. Схемы разделения материалов электроабразивным кругом	71
3.2. Обоснование границ достижения заданных технологических показателей .....	76
3.2.1. Основные требования к технологическим режимам .....	76
3.2.2. Расчет предельных размеров инструмента .....	79
3.2.3. Не параллельность стенок паза за счет воздействия электрического поля .....	84
Глава 4. Разработка технологического процесса, оборудования, средств технологического оснащения для комбинированного малоотходного чистового разделения материалов .....	90
4.1. Технологический процесс .....	90
4.1.1. Исходная информация .....	90
4.1.2. Выбираемые параметры .....	90
4.1.3. Расчет режимов разделения .....	93
4.2. Гибкий автоматизированный модуль .....	99
4.2.1. Компановка .....	99
4.2.2. Средства автоматизации и адаптации .....	102
4.2.3. Защита от аварийных ситуаций .....	108
4.2.4. Варианты поставок модулей .....	109
4.3. Дисковый инструмент .....	111
4.3.1. Расчет размеров .....	111
4.3.2. Выбор характеристик.....	112
4.4. Влияние процесса комбинированного разделения материалов на эксплуатационные свойства изделий.....	113
4.4.1. Стабильность свойств материалов после комбинированных процессов.....	113
4.4.2. Технологическая наследственность при использовании комбинированных методов обработки.....	119
4.5. Перспективы применения комбинированного разделения	124
Заключение.....	127
Список литературы.....	130

ХАФИЗОВ Ильдaр Ильсурович  
ЗАКИРОВА Альфия Равильевна  
САДЫКОВ Зуфар Барыевич

МАЛООТХОДНОЕ ЧИСТОВОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ  
ДЕФИЦИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ КОМБИНИРОВАННЫМ  
МЕТОДОМ

*Монография*

Редактор О.П. Хабибуллина  
Технический редактор С.В. Фокеева  
Компьютерная верстка – С.В. Филаретов

---

Подписано к печати 29.01.14.  
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 7,90. Тираж 100. Заказ Г5.

---

Издательство Казанского государственного технического университета  
(КНИТУ-КАИ)

Копи-центр КНИТУ-КАИ. 420111, Казань, К.Маркса, 10