



**Министерство образования и науки
Российской Федерации
Рубцовский индустриальный институт (филиал)
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова»**

В.В. Попова

**ПОВЕРХНОСТНОЕ ПЛАСТИЧЕСКОЕ
ДЕФОРМИРОВАНИЕ
И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА**

Учебное пособие по дисциплине
«Процессы и операции формообразования»
для студентов всех форм обучения направления
подготовки 151900 «Конструкторско-технологическое
обеспечение машиностроительных производств»

Рубцовск 2013

Попова В.В. Поверхностное пластическое деформирование и физико-химическая обработка: Учебное пособие по дисциплине «Процессы и операции формообразования» для студентов всех форм обучения направления подготовки 151900 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2013. – 98 с.

Учебное пособие соответствует требованиям, предъявляемым к дисциплине ФГОС ВПО направления подготовки 151900 – «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», утвержденного приказом Министерства образования и науки РФ №827 от 24 декабря 2009 года. Учебное пособие предназначено для студентов всех форм обучения при изучении ими дисциплины «Процессы и операции формообразования». Пособие содержит теоретический материал по двум из трех разделов дисциплины, а также сведения по выбору режимов обработки, необходимые для практических работ по дисциплине. Пособие позволяет закрепить и углубить знания по дисциплине, а также подготовиться к выполнению контрольных и практических работ.

Рассмотрено и одобрено
на заседании НМС РИИ.
Протокол №7 от 24.10.13.

Рецензент: к.т.н.

А.С. Демидов

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Основные методы формообразования деталей машин	5
1.1 Методы формообразования деталей машин, изучаемые в курсе «Процессы и операции формообразования»	5
1.2 Принципы выбора метода и способа формообразования	6
2 Процессы и операции поверхностного пластического деформирования	6
2.1 Общие сведения о формообразовании давлением	6
2.2 Общие сведения о поверхностном пластическом деформировании	10
2.3 Понятие о поверхностном слое	11
2.4 Классификация и особенности применения поверхностного пластического деформирования	12
2.5 Основные способы поверхностного пластического деформирования	14
2.6 Обкатывание и раскатывание поверхностей	16
2.7 Калибрующее обкатывание и раскатывание роликами и шариками	19
2.8 Алмазное выглаживание	21
2.9 Калибрование отверстий шариком, дорном, деформирующей протяжкой	25
2.10 Вибронакатывание и вибровыглаживание поверхностей	26
2.11 Обработка дробью	30
2.12 Центробежная ударная обработка	32
2.13 Упрочнение чеканкой	33
2.14 Обработка проволочным инструментом (щетками)	34
2.15 Формообразование фасонных профилей методом поверхностного пластического деформирования	36
2.16 Материалы, применяемые для изготовления инструментов, работающих методом поверхностного пластического деформирования	38
2.17 Выбор параметров процессов поверхностного пластического деформирования	38
2.18 Вопросы для самоконтроля	43
3 Физико-химические методы обработки	44
3.1 Классификация физико-химических методов обработки	44
3.2 Общие сведения об электрической эрозии	46
3.3 Электроэрозионная обработка	50
3.4 Лучевая обработка	60
3.5 Ультразвуковая обработка	71
3.6 Электрохимическая обработка	78
3.7 Выбор параметров процессов физико-химической обработки	87
3.8 Вопросы для самоконтроля	96
Список литературы	98

ВВЕДЕНИЕ

Согласно ФГОС ВПО и утвержденной Примерной основной образовательной программе целью преподавания дисциплины «Процессы и операции формообразования» является формирование у студентов знаний о процессах и операциях формообразования, закономерностях физико-механических процессов при формообразовании с обеспечением заданного качества обработанных поверхностей на деталях машин.

Поэтому задачами изучения дисциплины «Процессы и операции формообразования» являются:

- физические и кинематические особенности таких процессов обработки материалов, как резание, пластическое деформирование, электроэрозионная, электрохимическая, ультразвуковая, лучевая и некоторые другие методы обработки;

- требования, предъявляемые к рабочей части инструментов, к механическим и физико-химическим свойствам инструментальных материалов;

- геометрические параметры рабочей части типовых инструментов;

- основные принципы проектирования операций механической и физико-химической обработки с обеспечением заданного качества обработанных поверхностей на деталях машин при максимальной технико-экономической эффективности;

- основные методы формообразования поверхностей деталей машин, анализ методов формообразования поверхностей, область их применения;

- технико-экономические показатели методов лезвийной, абразивной, электрофизической и электрохимической обработки.

1 ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

1.1 Методы формообразования деталей машин, рассматриваемые в курсе «Процессы и операции формообразования»

Основная часть деталей машин в машиностроении изготавливается из металла. Поэтому основные методы формообразования деталей и заготовок в машиностроении – это обработка давлением, обработка литьем, сварка, физико-химическая обработка и обработка резанием. В рамках каждого метода формообразования существует множество способов формообразования, часть из которых рассматривается в процессе изучения дисциплины «Процессы и операции формообразования».

В машиностроении при изготовлении деталей машин значительная их часть (80-95%) подвергается обработке резанием. Причем, как правило, обработка резанием является завершающей обработкой. Поэтому основное внимание при изучении дисциплины должно быть уделено обработке резанием, ведь во многом качество деталей машин определяется именно этим методом формообразования.

Согласно ФГОС ВПО и утвержденной Примерной основной образовательной программе в рабочую программу дисциплины «Процессы и операции формообразования» включено изучение не всех методов формообразования, а только – *механической обработки* и *физико-химической обработки*. При этом механическая обработка – это обработка давлением (пластическое деформирование) и обработка резанием. А к физико-химической обработке принято относить *электроэрозионную, лучевую, ультразвуковую и электрохимическую обработку*. При этом рассматриваются только те способы формообразования, которые обеспечивают заданное качество обработанных поверхностей на деталях, то есть, в первую очередь, требуемый размер и шероховатость – это так называемая *размерная обработка*.

Механические и физико-химические методы обработки позволяют комбинировать их друг с другом в различных сочетаниях, тем самым обеспечивая дополнительные эффекты. Таким образом, появляются все новые и новые способы обработки деталей машин. Правда, комбинированные способы обработки имеют узкоспециальное назначение. Примером комбинированных способов обработки является электроабразивная обработка, одна из разновидностей анодно-механической обработки, в этом случае в одном формообразовании комбинируются процессы электрохимической обработки и обработки резанием. Или электромеханическое точение, разновидность электроконтактной обработки, где резание комбинируется с электроэрозионной обработкой. В процессе изучения дисциплины будут рассматриваться только те комбинированные способы обработки деталей машин, которые достаточно широко применяются в машиностроении. Остальных способов касаться не

будем ввиду их многочисленности, недостаточной изученности и узкоспециального применения.

1.2 Принципы выбора метода и способа формообразования

В машиностроении, как правило, заготовку или деталь машины можно изготовить, применяя разные методы и способы формообразования. Поэтому очень остро стоит вопрос о принципах выбора и технико-экономической оценки выбора. Обычно для выбора оптимального технологического варианта изготовления той или иной детали машин сравнивают технологическую себестоимость разных вариантов изготовления. Себестоимость формообразования детали, в рублях, где комплексно учитываются все затраты, можно представить в общем виде как:

$$C=M+З+И+О,$$

где М – стоимость расходуемых материалов;

З – зарплата производственных рабочих;

И – расходы, связанные с эксплуатацией технологической оснастки;

О – затраты, связанные с содержанием и эксплуатацией оборудования.

Но при выборе метода и способа формообразования необходимо учитывать физико-химические и механические характеристики обрабатываемого материала, требования по точности и качеству обрабатываемых поверхностей детали, а также определенные ограничения, присущие тому или иному методу и способу формообразования. Так, например, метод формообразования давлением предполагает у обрабатываемого материала наличие такого свойства, как пластичность. При горячей деформации точность получаемых поверхностей не выше 12 квалитета с параметром шероховатости Ra не выше 6,3 мкм. При этом на получаемом изделии обязательно будет присутствовать дефектный слой, который будет ухудшать эксплуатационные показатели изделия.

Физико-химические методы обработки характеризуются высокой энергонасыщенностью происходящих процессов при обработке поверхностей деталей, поэтому во многих случаях технологическая себестоимость обработки очень высока. Кроме того, например, для применения электроэрозионной обработки необходимо, чтобы обрабатываемый материал был токопроводящим, а для возможности применения ультразвуковой размерной обработки обрабатываемый материал должен быть хрупким.

2 ПРОЦЕССЫ И ОПЕРАЦИИ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

2.1 Общие сведения о формообразовании давлением

Обработкой металлов давлением называют технологические процессы получения изделий за счет необратимого изменения формы и размеров деформируемого тела в результате воздействия на него внешних сил.

Формообразование изделия осуществляется без нарушения его целостности, за счет перераспределения объема заготовки. Формообразование давлением основано на использовании одного из основных свойств металла – *пластичности*.

Обработка металлов давлением является одним из методов получения заготовок в машиностроении под последующую обработку резанием или обработку одним из способов физико-химической обработки, но в ряде случаев этим методом изготавливают и детали.

Обработке давлением подвергается около 90% всей выплавляемой стали и около 50% цветных металлов.

Процессы обработки металлов давлением по назначению подразделяются на три вида:

а) для получения заготовок постоянного поперечного сечения по длине: прутков, проволоки, лент, листов и т.п.; основные разновидности таких процессов – прокатка, волочение, прессование;

б) для получения штучных заготовок, имеющих приближенные к готовым деталям форму и размеры; основные разновидности таких процессов – ковка и штамповка;

в) для выполнения операций поверхностного пластического деформирования деталей машин с целью получения резьбового или зубчатого профиля, калибрования или упрочнения поверхности.

В результате пластических деформаций изменяется не только форма и размеры, но и структура и свойства исходного металла. Причем изменение структуры и свойств происходит в благоприятную сторону: повышаются механические характеристики (повышается прочность и твердость, увеличиваются пределы текучести и упругости), уменьшаются показатели пластичности (относительное удлинение и сужение, ударная вязкость).

Изменение механических характеристик объясняется искажением пространственных кристаллических решеток металла, искажением плоскостей скольжения при сдвиговых деформациях и концентрацией обломков зерен на плоскостях скольжения.

Деформация приводит и к тому, что зерна получают вытянутую форму в направлении течения металла. Определенная ориентировка вытянутых при пластической деформации зерен называется *полосчатостью микроструктуры*. Одновременно с изменением формы зерен происходит поворот кристаллографических осей отдельных зерен металла. И по мере протекания пластических деформаций разница в направлениях кристаллографических осей зерен уменьшается. Возникает *текстура*, т.е. преимущественная ориентировка кристаллических осей зерен поликристалла. Реальный металл имеет неметаллические включения, обычно располагающиеся по границам кристаллитов, при обработке давлением эти неметаллические включения вытягиваются в виде волокон по направлению наиболее интенсивного течения металла. Эти волокна выявляются травлением и видны невооруженным глазом в форме так называемой *волокнистой макроструктуры*. Металл с явно выраженной волокнистой макроструктурой характеризуется анизотропией

механических свойств. При этом характеристики прочности (предел текучести, временное сопротивление и др.) в разных направлениях отличаются незначительно, а характеристики пластичности (относительное удлинение, ударная вязкость и др.) вдоль волокон выше, чем поперек их. То есть *волоконистая макроструктура реального металла – качественный показатель пластической деформации.*

Так как направление волокон зависит от характера деформирования заготовки, то в готовой детали желательно получить такое расположение волокон, при котором она бы имела наилучшие эксплуатационные показатели. При этом общие рекомендации следующие: необходимо, чтобы наибольшие растягивающие напряжения, возникающие в деталях в процессе работы, были направлены вдоль волокон, а если какой-либо элемент этой детали работает на срез, то желательно, чтобы перерезывающие силы действовали поперек волокон. При этом необходимо, чтобы волокна подходили к наружным поверхностям детали по касательной и не перерезались наружными поверхностями детали.

Выполнение этих требований не только повышает надежность детали (в том числе и при динамическом нагружении), но и улучшает, например, сопротивление истиранию.

На эти процессы сильно влияет температура нагрева и скорость протекания пластических деформаций. Нагрев всегда способствует повышению пластичности, а чем меньше скорость деформирования, тем выше пластические свойства металла при прочих равных условиях.

В зависимости от температурно-скоростных условий деформирования различают холодную и горячую деформацию.

Холодная деформация характеризуется тем, что формоизменение сопровождается возрастанием прочности и снижением пластичности металла, то есть повышаются эксплуатационные показатели изделия, такие как износостойкость, долговременная и усталостная прочность.

Упрочнение не является необратимым: оно может быть устранено термической обработкой (отжигом). При нагреве в металле твердого тела происходит внутренняя перестройка структуры, при которой за счет дополнительной тепловой энергии, увеличивающей подвижность атомов, без фазовых превращений из множества центров начинают расти новые зерна, заменяющие собой вытянутые, деформированные зерна. То есть происходит процесс, обратный упрочнению.

Явление замены деформированных, вытянутых зерен металла новыми равноосными, происходящее во времени и при определенных температурах (для технически чистых металлов при температуре, равной 0,4 от температуры плавления), называется *рекристаллизацией*.

Это значит, что при обработке металлов давлением в твердом теле происходят два процесса: упрочнение и рекристаллизация.

Рекристаллизация – это явление зарождения и роста новых зерен, имеющих примерно одинаковые размеры по всем направлениям, взамен

деформированных, вытянутых, происходящее при определенных температурах.

При холодной деформации металла может осуществляться нагрев для повышения пластичности и уменьшения усилий деформирования, но всегда нагрев – ниже температуры рекристаллизации (обычно нагрев до температуры около 0,25 от температуры плавления технически чистого металла). Для стальных сплавов в производственных условиях получения заготовок эта температура составляет обычно от 600 до 800°C.

Если в металле твердого тела произошло только упрочнение, то наблюдается анизотропия механических свойств, в случае разупрочнения (рекристаллизации) анизотропия менее выражена, в этом случае микроструктура – равноосная и мелкозернистая, но макроструктура – волокнистая. Напоминаем, волокнистая макроструктура при обработке металлов давлением – полезное явление, особенно при изготовлении ответственных деталей. Ведь если получить макроструктуру, совпадающую с направлениями максимальных напряжений в детали при ее эксплуатации, то ее долговечность и износостойкость возрастет.

В последние годы для изготовления деталей машин стали широко применять процессы деформирования с небольшим нагревом для повышения пластичности металла либо вообще деформирование осуществляют при комнатной температуре. В этом случае либо происходит перераспределение небольших объемов металла при получении резьбовых или зубчатых поверхностей, либо осуществляют поверхностное деформирование (обкатывание, выглаживание, калибрование, дорнование и др.). Поскольку данные процессы происходят без стружкообразования, то в некоторых случаях им отдается предпочтение над обработкой резанием. Кроме того процесс сопровождается упрочнением поверхностного слоя. Это способствует повышению износостойкости, усталостной прочности и коррозионной стойкости, а также удаляются риски и микротрещины, оставшиеся от предшествующей обработки. В зоне обработки не возникает высокая температура, поэтому в поверхностных слоях не происходят фазовые превращения. Такую обработку можно проводить на обычных металлорежущих станках, используя специальные инструменты или применяя специальные станки и специальные инструменты. Для некоторых изделий машиностроения, таких как винты, болты, шпильки, шурупы, накатывание резьбы (формирование резьбы пластическим деформированием при комнатной температуре) является основным способом получения.

Горячая деформация характеризуется таким соотношением скоростей деформирования и рекристаллизации, при котором рекристаллизация успевает произойти во всем объеме заготовки и микроструктура остается равноосной. В этом случае эксплуатационные показатели изделия также повышаются, но в меньшей степени, чем при холодной деформации. При горячей деформации сопротивление деформированию примерно в 10 раз меньше, чем при холодной деформации, поэтому ее целесообразно применять при глубоком деформировании, при обработке труднодеформируемых, малопластичных

материалов, а также при изготовлении крупных изделий. В то же время при горячей деформации окисление поверхности заготовки идет более интенсивно, следовательно, дефектный слой на поверхности заготовки больше, больше должны быть и припуски под обработку резанием. Процессы пластического деформирования в условиях горячей деформации для стальных сплавов в производственных условиях получения заготовок осуществляют при нагреве примерно до температуры от 1100 до 1200°С.

2.2 Общие сведения о поверхностном пластическом деформировании

Получение заготовок методом пластического деформирования Вы рассматривали в курсе «Технологические процессы в машиностроении», поэтому будем рассматривать в основном способы поверхностного пластического деформирования при комнатной температуре (холодная деформация), которые применяют в качестве операций или переходов в технологических процессах механической обработки деталей машин.

Поверхностное пластическое деформирование основано на способности металлической поверхности воспринимать остаточные пластические деформации без нарушения целостности металла. Поверхностное пластическое деформирование – один из наиболее простых и эффективных технологических путей повышения работоспособности и надежности деталей машин. В результате поверхностного пластического деформирования повышаются твердость и прочность поверхностного слоя, формируются благоприятные остаточные напряжения сжатия, уменьшается параметр шероховатости Ra, увеличивается радиус закругления вершин микровыступов, относительная опорная длина профиля микронеровностей и т.п. Поверхностное пластическое деформирование деталей применяется во всех типах производства. Формирование поверхностного слоя с заданными свойствами должно обеспечиваться технологией упрочнения.

Обработка поверхностным пластическим деформированием выполняется на многих металлорежущих станках, например, на токарных, строгальных или протяжных и может быть выполнена как самостоятельная технологическая операция или как один из переходов операции.

Обработка методом поверхностного пластического деформирования деталей машин может быть применена для любых металлов и сплавов, способных пластически деформироваться.

Поверхностное пластическое деформирование может быть:

а) отделочно-упрочняющей операцией, в результате чего упрочняется поверхностный слой и улучшается шероховатость обработанной поверхности;

б) отделочно-упрочняющей и калибрующей операцией, в результате которой не только упрочняется поверхностный слой, но и повышается точность и качество обработанной поверхности;

в) отделочно-калибрующей операцией, в результате которой повышается точность и качество обработанной поверхности, но заметного упрочнения не происходит.

При этом калибрующее поверхностное пластическое деформирование изменяет размеры заготовки до допускаемых.

2.3 Понятие о поверхностном слое

При изготовлении и эксплуатации деталей машин на их поверхностях образуются неровности и микронеровности, а слой металла, непосредственно прилегающий к поверхности, изменяет структуру, фазовый и химический состав, в нем возникают остаточные напряжения.

Слой металла, имеющий отличающиеся от основной массы детали структуру, фазовый или химический состав, называют поверхностным.

В условиях эксплуатации поверхностный слой детали подвергается наиболее сильному физико-химическому воздействию: механическому, тепловому, магнитоэлектрическому, световому, химическому и др. В большинстве случаев у детали начинают ухудшаться служебные свойства поверхности, например, износ, эрозия, кавитация, коррозия, усталостные трещины и другие разрушения развиваются вначале на поверхности. Поэтому к поверхностному слою предъявляются более высокие требования, чем к основной массе детали. А обработка поверхностным пластическим деформированием является одним из наиболее простых и эффективных способов повышения эксплуатационных показателей детали и ее поверхностного слоя в частности.

Поверхностное пластическое деформирование обеспечивает повышение усталостной прочности и выносливости детали в процессе эксплуатации в 1,5...2,3 раза. Особенно эффективен процесс поверхностного пластического деформирования для деталей, имеющих концентраторы напряжений (выточки, галтели и др.). Но помимо этого обеспечиваются и другие эффекты.

Поверхностное пластическое деформирование обеспечивает изменение структуры металла, но без его полной рекристаллизации. Важной характеристикой состояния поверхностного слоя являются *остаточные напряжения*.

Остаточные напряжения – это упругие напряжения, которые остались в детали или заготовке после обработки.

В зависимости от характера и интенсивности физико-механических процессов, происходящих при обработке, остаточные напряжения могут иметь различный знак:

- (+) – растягивание;
- (-) – сжимание.

Условие равновесия требует, чтобы в объеме детали или заготовки сумма проекций всех сил была равна нулю. Поэтому в детали есть области со сжимающими и растягивающими остаточными напряжениями.

Остаточные напряжения оказывают существенное влияние на прочность и долговечность деталей машин и конструкций. *Вследствие поверхностной пластической деформации в поверхностном слое возникают сжимающие остаточные напряжения.* Остаточные сжимающие напряжения, возникающие

в поверхностном слое, повышают циклическую прочность деталей, так как они разгружают поверхностные слои от напряжений, вызванных нагрузками, и, наоборот, растягивающие остаточные напряжения уменьшают прочность деталей вследствие повышения напряженности поверхностного слоя. Растягивающие остаточные напряжения могут привести к растрескиванию поверхности детали или заготовки.

При поверхностном пластическом деформировании вследствие изменения структуры материала поверхностного слоя создаются полезные сжимающие остаточные напряжения. В ходе обработки форма зерен (кристаллитов) поверхностных слоев металлической заготовки изменяется. Они вытягиваются в направлении деформации, образуется упорядоченная структура волокнистого характера. Детали, обработанные поверхностным пластическим деформированием, становятся менее чувствительными к усталостному разрушению.

Следовательно, главные цели, достигаемые обработкой поверхностным пластическим деформированием, – это изменение размеров заготовки до допускаемых (калибрование), уменьшение шероховатости поверхности (сглаживание) и деформационное упрочнение с созданием полезных сжимающих напряжений.

2.4 Классификация и особенности применения поверхностного пластического деформирования

Согласно классификации и особенностям применения поверхностного пластического деформирования в соответствии с ГОСТ 18296-72 «Обработка поверхностным пластическим деформированием. Термины и определения» все методы поверхностного пластического деформирования подразделяют на *статические* и *ударные*. При статических методах обработки инструмент воздействует на обрабатываемую поверхность с определенной постоянной силой P , происходит плавное перемещение очага воздействия, который последовательно проходит всю поверхность, подлежащую обработке. При этом инерционные силы не оказывают существенного влияния на поверхностное пластическое деформирование. К таким методам относят различные выглаживания, обкатывания и раскатывания.

При ударных методах инструмент многократно воздействует на всю обрабатываемую поверхность или ее часть, при этом сила воздействия P в каждом цикле изменяется от нуля или от некоторого минимального значения до максимума, а в случае локального ударного воздействия очаг деформирования может последовательно и равномерно проходить всю обрабатываемую поверхность, как и в статических методах.

При этом различают:

- *накатывание* – поверхностное пластическое деформирование при качении инструмента по поверхности деформируемого материала. Различают частные случаи накатывания – *обкатывание* и *раскатывание*. Поверхностное обкатывание – это накатывание по выпуклой или плоской поверхности

деформируемого материала. Поверхностное раскатывание – это накатывание по вогнутой поверхности деформируемого материала;

- *выглаживание* – поверхностное пластическое деформирование при скольжении инструмента по локально контактирующей с ним поверхности деформируемого материала;

- *калибрующее накатывание (калибровка)* – накатывание, при котором происходит калибрование;

- *дорнование* – поверхностное пластическое деформирование при поступательном скольжении инструмента (дорна или деформирующей протяжки) по охватывающей его поверхности.

Основные группы методов поверхностного пластического деформирования представлены на рисунке 1, где обозначено: *а, б, в* – статические методы (соответственно выглаживание, обкатывание, однократное деформирование); *г* – ударные методы (многократные воздействия инструментом или рабочими телами инструмента); *D* – направление перемещения инструмента или заготовки; *P* – сила воздействия поверхностного пластического деформирования.

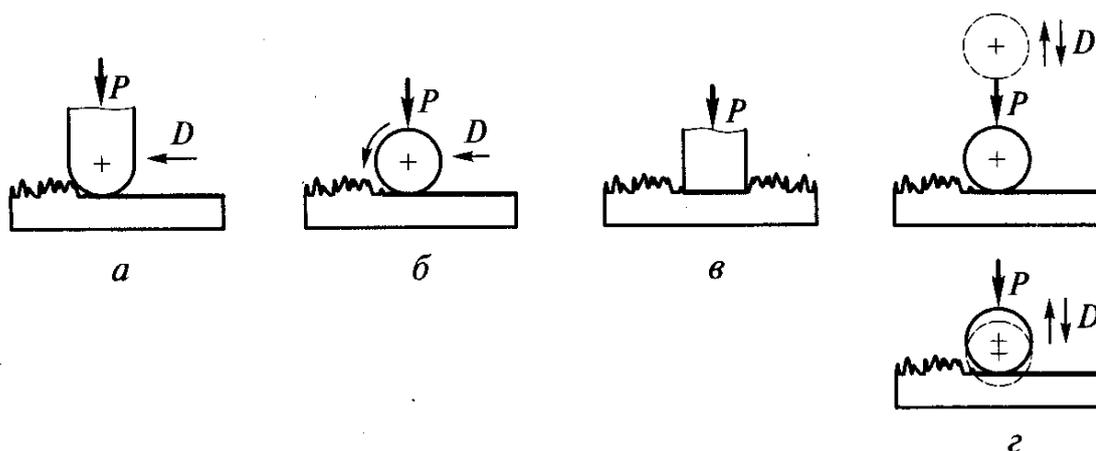


Рисунок 1 – Основные группы методов поверхностного пластического деформирования

Обычно в качестве инструментов при поверхностном пластическом деформировании применяют шарики, ролики, выглаживатели (гладилки), дорны, деформирующие протяжки. При этом, применяя статические методы поверхностного пластического деформирования, получают меньшую толщину деформированного слоя со всеми вытекающими последствиями. Однако эти методы, как правило, обеспечивают меньшую шероховатость поверхностей с благоприятной формой микронеровностей. При применении ударных методов поверхностного пластического деформирования можно достичь большей степени упрочнения, которая характеризуется степенью повышения поверхностной микротвердости, значениями полезных сжимающих остаточных напряжений и толщиной упрочненного слоя.

При проектировании операций поверхностного пластического деформирования, заменяющих, например, операции точения, шлифования,

полирования или доводки, необходимо помнить о следующих преимуществах поверхностного пластического деформирования:

а) сохраняется целостность волокон металла и образуется мелкозернистая структура-текстура в поверхностном слое;

б) отсутствует шаржирование обрабатываемой поверхности частичками шлифовальных кругов, полировочных паст;

в) отсутствуют термические дефекты;

г) стабильны процессы обработки, обеспечивающие стабильное качество поверхности;

д) можно достигать минимального параметра шероховатости поверхности $Ra = 0,1 \dots 0,05$ мкм и даже менее. При этом как на термически необрабатываемых сталях, цветных сплавах, так и на высокопрочных и закаленных сталях, сохраняя исходную форму заготовок;

е) можно уменьшить шероховатость поверхности в несколько раз за один технологический переход или операцию;

ж) создается благоприятная форма микронеровностей с большой долей опорной площади;

и) можно образовывать регулярные микрорельефы с заданной площадью углублений для задержания смазочного материала;

к) создаются благоприятные сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое;

л) плавно и стабильно повышается микротвердость в поверхностном слое.

Однако необходимо учесть и следующие соображения:

а) значительная часть способов поверхностного пластического деформирования не повышает геометрической точности поверхности, обычно сохраняется точность, достигнутая на предшествующей операции;

б) в связи с созданием полезных сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое при обработке тонкостенных и неравножестких деталей (толщиной от 3 до 5 мм) может происходить деформация поверхности в пределах от 5 до 10 мкм и даже более;

в) в связи с пластическим течением металла при использовании способов обработки поверхностным пластическим деформированием на кромках обрабатываемых поверхностей образуются равномерные наплывы металла толщиной от 0,03 до 0,3 мм.

2.5 Основные способы поверхностного пластического деформирования

Сочетанием вращательного и поступательного перемещений деталей и деформирующих элементов инструмента способами поверхностного пластического деформирования обрабатывают плоские, цилиндрические, переходные поверхности, фасонные поверхности и канавки. Основные способы поверхностного пластического деформирования представлены на рисунке 2, где обозначено: *a*, *б* – упрочняющее раскатывание и обкатывание; *в* – выглаживание; *г* – вибрационное накатывание и выглаживание; *д* –

поверхностное дорнование; *e* – дробеструйная обработка; *ж* – дробеметная обработка; *з* – ультразвуковая обработка дробью; *и* – центробежная обработка; *к* – ударное раскатывание; *л* – упрочняющая чеканка; *м* – вибрационная ударная обработка; *н* – обработка механической щеткой. *1* – заготовка; *2* – дробь; *3* – струя газа и (или) жидкости; *4* – дробемет (турбинка); *5* – ультразвуковой генератор; *б* – опора; *7* – ролики; *n* – вращение заготовки и (или) инструмента; *s* – перемещение заготовки и (или) инструмента; *P* – усилие деформирования; \rightarrow – направление разного вида движений.

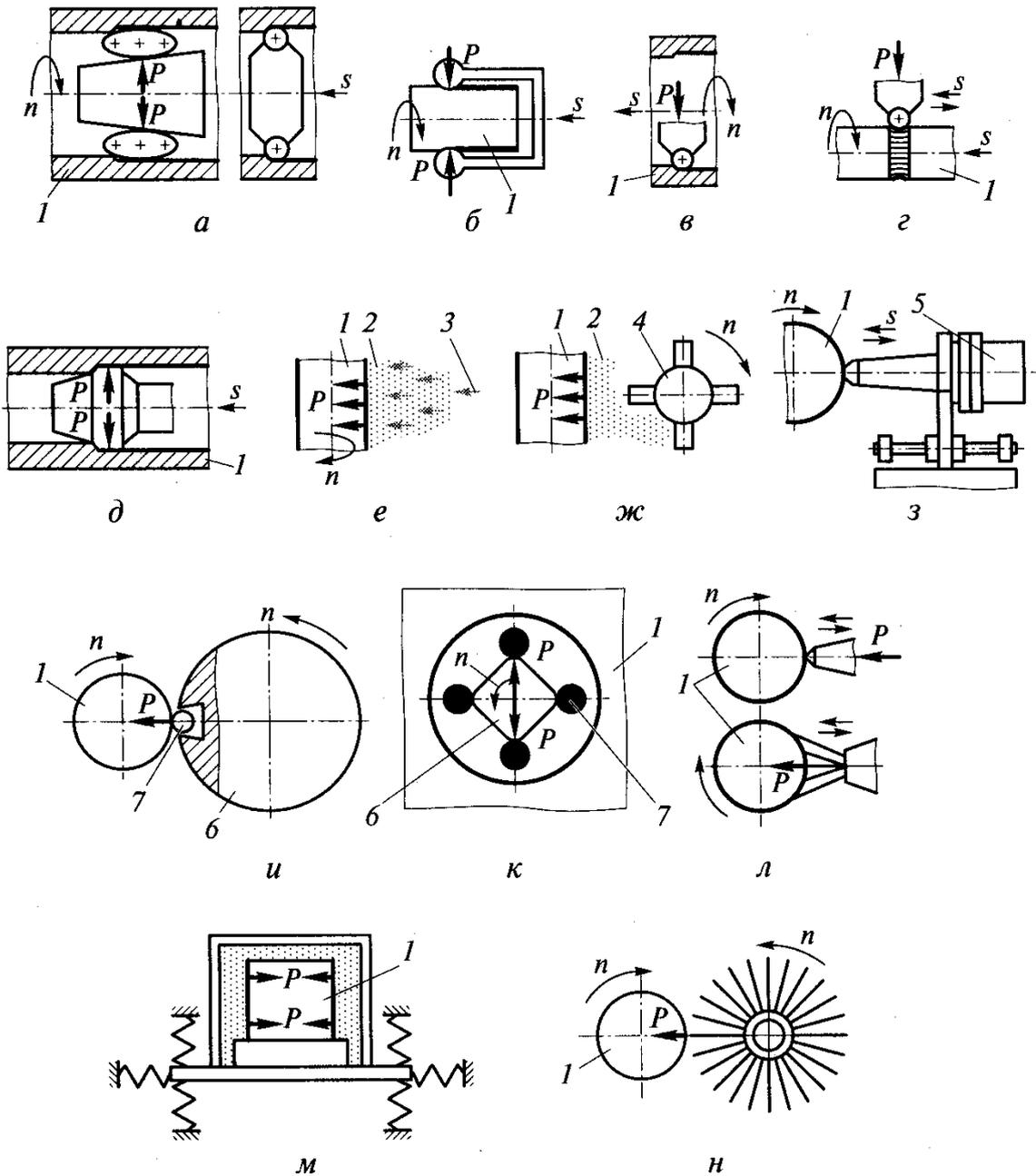


Рисунок 2 – Основные способы поверхностного пластического деформирования

Достижимая точность и качество поверхностей при поверхностном пластическом деформировании некоторыми способами представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Достижимая точность и качество поверхностей при поверхностном пластическом деформировании

Поверхности															
Наружные цилиндрические				Внутренние цилиндрические				Плоские				Фасонные			
Обкатывание роликами		Обкатывание шариками		Калибрующее обкатывание роликами		Алмазное выглаживание		Центробежная обработка		Раскатывание роликами		Деформирующее протягивание, дорнование		Калибрование шариками	
Алмазное выглаживание		Центробежная обработка		Раскатывание роликами		Деформирующее протягивание, дорнование		Калибрование шариками		Алмазное выглаживание		Обкатывание роликами		Многороликовое обкатывание	
Вибрационное обкатывание		Обкатывание шариками		Центробежная обработка		Алмазное выглаживание		Обработка дробью							
10...7 квалитет	Ra=1,60...0,05мкм	10...7 квалитет	Ra=1,60...0,05мкм	8...7 квалитет	Ra=0,40...0,025мкм	7...5 квалитет	Ra=0,10...0,025мкм	9...7 квалитет	Ra=0,40...0,10мкм	8...7 квалитет	Ra=1,60...0,05мкм	7...6 квалитет	Ra=0,40...0,10мкм	9...6 квалитет	Ra=1,60...0,05мкм
7...5 квалитет	Ra=0,10...0,025мкм	9...7 квалитет	Ra=0,40...0,10мкм	8...7 квалитет	Ra=1,60...0,05мкм	7...6 квалитет	Ra=0,40...0,10мкм	9...6 квалитет	Ra=1,60...0,05мкм	7...5 квалитет	Ra=0,10...0,025мкм	10...7 квалитет	Ra=1,60...0,10мкм	10...7 квалитет	Ra=1,60...0,10мкм
10...7 квалитет	Ra=1,60...0,025мкм	9...8 квалитет	Ra=3,20...0,20мкм	10...8 квалитет	Ra=1,60...0,10мкм	9...8 квалитет	Ra=0,40...0,10мкм	12...8 квалитет	Ra=6,30...0,20мкм						

2.6 Обкатывание и раскатывание поверхностей

Обкатывание и раскатывание поверхностей являются наиболее широко применяемыми способами поверхностного пластического деформирования деталей машин. Обкатыванием и раскатыванием отделяют и упрочняют цилиндрические, конические, плоские, фасонные наружные и внутренние поверхности. В качестве станочного оборудования обычно применяются станки токарной группы, строгальные или специальные станки. В качестве рабочих элементов инструмента применяют шарики и ролики. При этом в зависимости от решаемой задачи инструмент может быть оснащен одним рабочим элементом или несколькими.

В качестве рабочих элементов накатника, представленного на рисунке 3, применены ролики, на рисунке 4 – шарик. Для раскатывания внутренней цилиндрической поверхности по схеме в) применен один ролик, а по схеме з) – два ролика.

На рисунке 4 представлена простейшая схема обкатывания. Она состоит в следующем: к вращающейся цилиндрической заготовке подводят инструмент, на котором закреплен закаленный гладкий шарик.

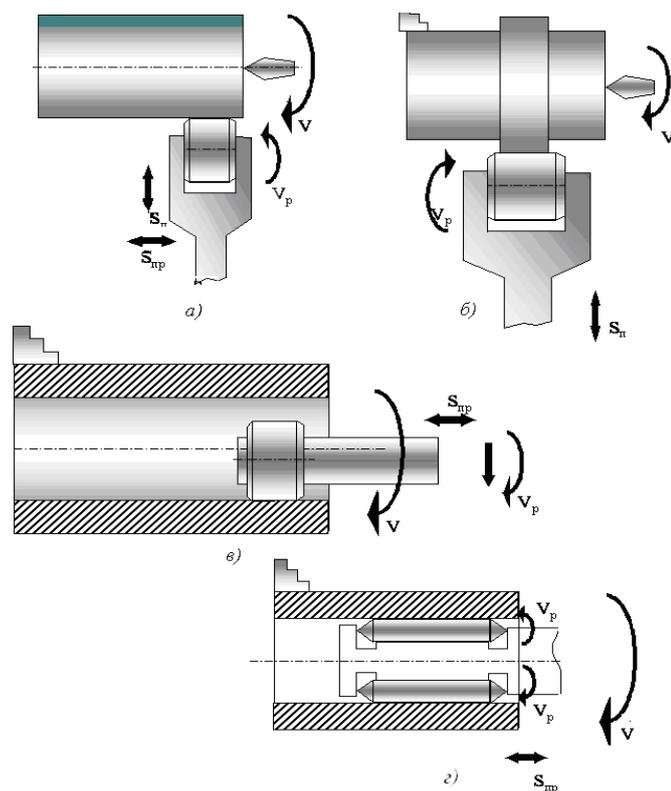


Рисунок 3 – Наружное обкатывание и раскатывание внутренней цилиндрической поверхности

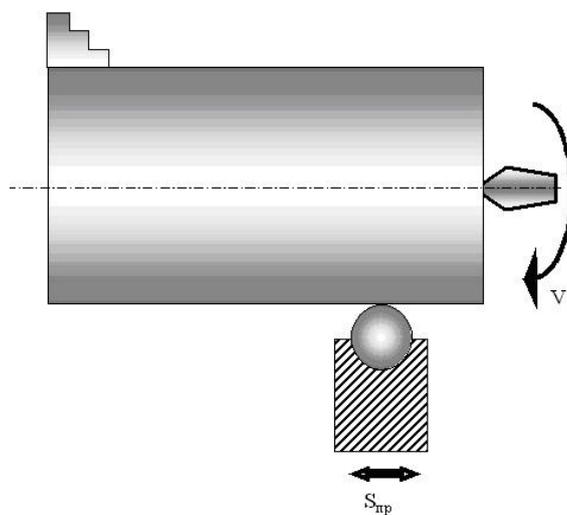


Рисунок 4 – Обкатывание одним шариком

Шарики чаще изготавливают из подшипниковой стали, реже – из других высокопрочных материалов, например, из твердого сплава. Размеры шариков, их точность и другие требования, предъявляемые к ним, стандартизованы. Шарики изготавливают номинальными диаметрами от 0,25 до 150 мм. Шарик с требуемым усилием поджимают к обрабатываемой поверхности. Поджим шарика осуществляется с помощью пружины или с помощью пневматического или гидравлического силового механизма. В процессе обработки заготовка

вращается, а инструмент имеет продольную подачу. Благодаря самоустанавливаемости шарика во время обкатывания обеспечивается его свободное вращение при трении качения между шариком и обрабатываемой поверхностью заготовки. В силу этого и создаются более благоприятные условия для пластического деформирования, обеспечивающие получение менее шероховатой поверхности при небольшом давлении со стороны шара. С увеличением диаметра шарика глубина залегания остаточных напряжений возрастает, но градиент и абсолютные значения уменьшаются. Шероховатость поверхности наиболее интенсивно уменьшается при удельных нагрузках 1000...1400 МПа. При этом оптимальное значение удельной нагрузки возрастает для более твердых и менее пластичных материалов.

Параметр шероховатости обработанной поверхности прямо пропорционален подаче и обратно пропорционален радиусу шарика. Скорость обкатывания и число рабочих ходов практически не влияют на шероховатость поверхности.

Твердость поверхности при обкатывании повышается для всех металлов. Обычно до глубины от 1 до 1,5 мм повышение твердости значительно, а на большей глубине (≈ 2 мм) обычно наблюдается незначительное повышение твердости. Число рабочих ходов, а также скорость обкатывания практически не влияют на поверхностную твердость.

Важной особенностью накатников является использование стандартных шариков с высокой точностью обработки и качеством поверхности. Отсутствие материальной оси вращения шариков и их самоустанавливаемость относительно обрабатываемой поверхности под действием сил обкатывания и трения, отсутствие или незначительное проскальзывание шариков, незначительные силы обработки (точечный контакт с обрабатываемой заготовкой) позволяют обрабатывать маложесткие и неравножесткие детали, в том числе и детали с высокой поверхностной твердостью. Меньшие подачи и меньшая производительность обработки, чем при использовании роликовых устройств, определяют основную область применения шариковых устройств – обработку маложестких и неравножестких деталей.

Применение многошариковых обкатников и раскатников не только обеспечивает повышение производительности, но и позволяет избежать одностороннего давления деформирующего элемента на обрабатываемую деталь. Особенно широкое применение многошариковых обкатников и раскатников в машиностроении в настоящий момент наблюдается для обработки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей.

Обкатывание шариком или шариками обычно осуществляется со скоростями от 15 до 100 м/мин. Скорость в основном определяется конструкцией инструмента. Фасонные поверхности обрабатываются только с применением копира.

Для обкатывания и раскатывания также используются ролики различной конфигурации. Ролики бывают двух видов – стержневые и кольцевые, а их, в свою очередь, подразделяют на 15 типов, причем некоторые типы имеют по несколько исполнений. Стержневые ролики следует выполнять диаметром не

более 18 мм, кольцевые – диаметром не более 160 мм. Чаще ролики изготавливают из подшипниковой стали, то есть используют ролики от стандартных подшипников.

Обкатывание и раскатывание роликами наиболее целесообразно проводить за один рабочий ход, максимум – за 2-3. Больше число проходов недопустимо, так как может привести к перенаклепу поверхности и ее отслаиванию.

Применение роликов для обкатки ограничивается, главным образом, случаями, когда требуется получить более глубокий упрочненный слой. Но процесс обкатывания и раскатывания роликами дороже, так как часто требует применения специальных роликов, а конструкция инструмента более сложная. Скорость обкатывания и раскатывания с помощью роликов составляет от 20 до 200 м/мин. Скорость обкатывания почти не оказывает влияния на получаемую шероховатость и другие характеристики поверхностного слоя, она влияет в основном на производительность процесса.

На шероховатость обрабатываемой поверхности в наибольшей степени оказывает влияние сила накатывания, следующим по значению параметром накатывания является подача. Подача может быть радиальной и осевой. Наилучшее качество поверхности достигается при обработке с радиальной подачей. На практике же обычно работают с осевой подачей, так как это более технологично. На качество получаемой поверхности оказывает влияние и шероховатость исходной поверхности. Оптимальный параметр шероховатости исходной поверхности $Ra=3,2...0,80$ мкм. На упрочнение и параметр шероховатости оказывает влияние также конфигурация и размеры роликов. При роликах малых диаметров достигается большее упрочнение и снижение шероховатости. При раскатывании отверстий ролики диаметром более 20 мм практически не применяют.

Обкатывание и раскатывание шариками и роликами деталей-тел вращения обычно осуществляют на токарных станках, других форм – на фрезерных, строгальных, расточных станках, существуют и специальные станки.

Обкатыванием и раскатыванием лишь в незначительной степени исправляют погрешности предшествующей обработки. Поэтому предварительная обработка заготовок должна быть точной с учетом смятия микронеровностей и изменения окончательного размера детали. Процессы обкатывания и раскатывания рекомендуется производить с применением смазочно-охлаждающих технологических средств, обычно это масла или смесь масла с керосином, обработку чугуна осуществляют всухую.

Как правило, припуск на обработку поверхностным пластическим деформированием с помощью шариков и роликов рекомендуется выбирать в пределах от 0,005 до 0,02 мм.

2.7 Калибрующее обкатывание и раскатывание роликами и шариками

Калибрующее обкатывание и раскатывание роликами и шариками применяют в случае необходимости повышения точности обрабатываемой поверхности, при этом не требуется повышение качества и значительного

упрочнения поверхности (качество поверхности лишь немного повышается за счет смятия микронеровностей). Для этого применяют многороликовые или многошариковые инструменты. Инструменты имеют жесткую конструкцию, в которой положение роликов или шариков обеспечивает необходимый *небольшой натяг* при обработке, благодаря чему и обеспечивается повышение точности формы и размера обрабатываемой поверхности. *Натяг* – это *небольшое превышение диаметрального размера инструмента по отношению к обрабатываемому диаметральному размеру детали при обработке отверстий, а при обработке наружных поверхностей – наоборот*. При этом для обработки наружных поверхностей деталей-тел вращения применяют инструмент, который является охватывающим по отношению к обрабатываемой поверхности.

На рисунке 5 представлен жесткий роликовый накатник. У инструмента конические ролики 1 равномерно, с помощью сепаратора 3, расположены по окружности обрабатываемой детали 8, а для передачи усилия деформирования на обрабатываемую поверхность они опираются на нажимной конус 2, запрессованный в корпус инструмента 4. Настройка инструмента на размер производится с помощью гаек 5. В конструкцию инструмента также входит подпятник 6 и крышка 7.

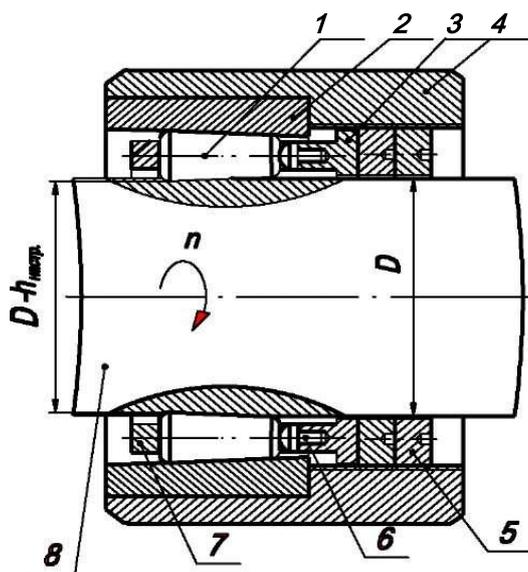


Рисунок 5 – Конструкция жесткого роликового накатника для обработки валов

Сравнительно несложная конструкция инструмента, удобство в эксплуатации, возможность применения роликов относительно малых диаметров (до 20 мм), создающих при обработке каплевидный контакт с обрабатываемой поверхностью, обеспечивающий тем самым высокую производительность при низкой шероховатости, высокой точности формы обработанной поверхности, предотвращении волнистости и достижении

требуемой глубины упрочнения способствуют широкому применению данной конструкции.

Изменение размера при калибрующем обкатывании и раскатывании связано со смятием микронеровностей и пластической деформацией в поверхностном слое. Таким образом, точность обработанной детали будет зависеть от ее конструкции, конструкции инструмента, режимов обработки, а также от точности размеров, формы и качества обрабатываемой поверхности, полученных при обработке на предыдущей операции.

Наиболее целесообразным считается калибрующее обкатывание и раскатывание поверхностей заготовок, предварительно обработанных точением, шлифованием или другими способами, обеспечивающими точность поверхностей по 7...10 квалитету и шероховатостью с параметром $Ra=0,8...6,3$ мкм.

2.8 Алмазное выглаживание

Алмазное выглаживание применяется для поверхностного упрочнения и достижения малой шероховатости обработанной поверхности заготовки. Алмазное выглаживание наружных, внутренних и фасонных поверхностей аналогично обработке роликами и шариками. Но при алмазном выглаживании обработка поверхностным пластическим деформированием проводится в условиях трения скольжения (с весьма малым коэффициентом трения, т.к. алмаз имеет очень малый коэффициент трения в паре с любым металлом), а при накатывании роликами и шариками – в условиях трения качения.

Алмазным выглаживанием можно обрабатывать почти все применяемые в промышленности металлы и сплавы, за исключением титана, циркония и ниобия, т.к. они налипают на рабочую часть инструмента. При этом возможна обработка как мягких металлов, так и закаленных до твердости 65HRC. Возможна также обработка поверхностей деталей с нанесенными покрытиями. Можно обрабатывать тонкостенные детали и детали сложной конструкции, а конструкция самого алмазного выглаживателя проста и компактна.

При выглаживании поверхности обрабатываемой заготовки инструмент (алмаз или композит, смонтированный в державке) прижимается с определенной силой к обрабатываемой поверхности. Для изготовления выглаживателей одинаково широко применяются природные и синтетические алмазы, а также композиты. Стойкость природных и искусственных алмазов, композитов примерно одинакова. Для обработки железоуглеродистых сплавов более предпочтительным является применение в качестве деформирующих элементов композитов.

В процессе выглаживания поверхности заготовки в месте контакта с деформирующим элементом возникают значительные контактные напряжения. При определенном усилии выглаживания происходит пластическая деформация поверхностного слоя, в результате чего сминаются микронеровности и изменяются физико-механические свойства поверхностного слоя. Выглаживанием обычно обрабатывают наружные и внутренние

поверхности деталей-тел вращения, а также их торцовые поверхности, на станках токарной группы, сверлильных и расточных станках.

Наиболее часто алмазное выглаживание осуществляют на токарных станках. Инструмент для выглаживания состоит из наконечника с алмазом или композитом и державки. Державка крепится на суппорте или в пиноли задней бабки. Выглаживатели могут быть жесткой конструкции, но чаще выполняются нежесткие (подпружиненные) инструменты. Нагружающие механизмы державок имеют упругие элементы (пружины), обеспечивающие непрерывный контакт алмаза с обрабатываемой поверхностью и примерно одинаковую силу выглаживания. Конструкция алмазного выглаживателя представлена на рисунке 6, где *a*) – конструкция с цилиндрической пружиной; *б*) – конструкция с пружинящим корпусом. На рисунке обозначено: 1 – регулировочный винт; 2 – тарированная пружина; 3 – индикатор; 4 – наконечник с алмазом или композитом.

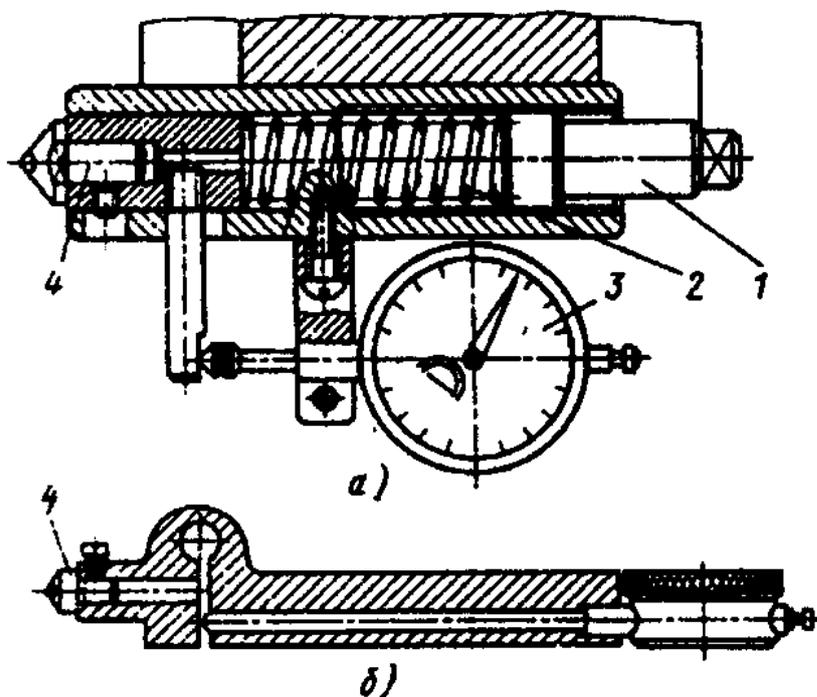


Рисунок 6 – Алмазный выглаживатель

Алмаз или композит, закрепленный в державке, не вращается, а скользит с весьма малым коэффициентом трения. Рабочий элемент (алмаз или композит) выполнен в виде полусферы, цилиндра (применяется только для обработки наружных цилиндрических поверхностей) или конуса с тем или иным радиусом скругления рабочей части. Рабочий элемент, выполненный в виде полусферы, применяется наиболее широко. Чем тверже обрабатываемый металл заготовки, тем меньше должен быть радиус скругления рабочей части алмаза или композита. Как правило, на практике применяются выглаживатели с радиусом скругления рабочей части алмаза или композита от 0,5 до 3,5 мм. Так как поверхность контакта выглаживателя с обрабатываемой поверхностью

оказывается незначительной, то это обуславливает создание высоких контактных давлений, необходимых для совершения пластической деформации при небольших нормальных силах, передаваемых со стороны инструмента на обрабатываемую поверхность. Нормальная сила при алмазном выглаживании (50...300 Н) примерно в 10 раз меньше, чем при обкатывании или раскатывании шариком.

Учитывая повышенную хрупкость алмаза или композита, не следует обрабатывать выглаживанием прерывистые поверхности. Из-за нестабильности качества при обработке выглаживанием нельзя обрабатывать заготовки со значительными отклонениями формы в поперечном сечении или неравномерной твердостью поверхности (разброс значений твердости не более 4 HRC). Поэтому предварительная обработка поверхности заготовки под алмазное выглаживание должна выполняться шлифованием, тонким точением или растачиванием, то есть точность размеров должна быть не ниже 7 квалитета с параметром шероховатости $Ra \leq 0,80$ мкм. Алмазное выглаживание проводится копирующим инструментом, поэтому отклонения формы в продольном и поперечном сечениях обрабатываемой заготовки изменяются незначительно (только за счет смятия микронеровностей). А это, как свидетельствует производственный опыт, обычно изменяет размер обрабатываемой поверхности примерно от 10 до 15 мкм. То есть точность обработки может несколько снизиться. В связи с этим целесообразно на предшествующей операции обеспечивать точность размеров на 20...30% выше заданной точности для окончательно обработанной поверхности заготовки.

Следовательно, выглаживание может производиться:

- для уменьшения шероховатости поверхности (отделка);
- для упрочнения поверхностного слоя;
- для повышения точности размеров и формы деталей (калибрование), в случае применения жесткого инструмента.

При выглаживании наружной поверхности детали-тела вращения на токарном станке и при установке выглаживателя в резцедержатель механизм выглаживания заключается в следующем. Прижатый к обрабатываемой поверхности с некоторой силой инструмент внедряется в нее на некоторую глубину и при своем движении сглаживает исходные неровности. Высота шероховатости в направлении скорости (продольная шероховатость) обычно значительно меньше, чем высота поперечной шероховатости (в направлении подачи). После прохода инструмента происходит частичное упругое восстановление поверхности. Впереди выглаживателя образуется валик пластически деформированного металла, передняя поверхность выглаживателя нагружается гораздо больше, чем задняя поверхность. По этой причине, а также вследствие адгезионного взаимодействия между деталью и инструментом в процессе выглаживания возникает тангенциальная составляющая силы.

Рассмотрим теперь деформацию поверхностного слоя в направлении подачи. При продольном перемещении выглаживатель раздвигает металл деформируемых поверхностных неровностей в стороны. При этом со стороны исходной поверхности образуется валик деформированного металла, а со

стороны выглаженной поверхности происходит искажение профиля канавок, образовавшихся при предыдущих оборотах детали в результате пластического течения металла, выдавливаемого из-под выглаживателя в сторону выглаженной поверхности. В наибольшей степени искажается профиль канавки, образованной на предыдущем обороте.

После каждого оборота обрабатываемой детали канавка-след выглаживателя перемещается в осевом направлении на величину подачи. При этом происходит многократное перекрытие ее при последующих оборотах обрабатываемой детали, т.к. ширина канавки больше величины подачи. Со стороны невыглаженной поверхности образуется валик деформированного металла, правая полуповерхность (в направлении подачи) нагружена гораздо больше, чем левая полуповерхность. Поэтому в процессе выглаживания возникает осевая сила.

В результате пластического деформирования обрабатываемой поверхности происходит сглаживание исходных неровностей и образование нового микрорельефа поверхности со значительно меньшей высотой неровностей. Размер детали уменьшается на величину остаточной деформации.

На величину и форму образующихся неровностей влияет также неоднородность шероховатости исходной поверхности и твердость обрабатываемой поверхности, колебания силы выглаживания, вызванные радиальным биением детали и др. Все это вызывает отклонение микрорельефа, полученного при деформации поверхности от исходного микрорельефа. Но основные факторы, влияющие на образующийся в результате алмазного выглаживания микрорельеф поверхности, это:

- кинематика процесса (направлением взаимного перемещения инструмента и обрабатываемой детали);
- величина исходной шероховатости;
- форма и размер рабочей части алмаза или композита;
- величина внедрения алмаза или композита в обрабатываемую поверхность;
- пластическое течение материала, обуславливающее появление вторичной шероховатости;
- шероховатость рабочей части алмаза или композита;
- величина упругого восстановления поверхности детали после выглаживания.

Формирование поверхностного слоя при алмазном выглаживании происходит вследствие пластического деформирования обрабатываемой поверхности. Под действием радиальной силы, действующей на поверхности контакта алмаза с деталью, возникают контактные давления. Если их величина превышает предел текучести, возникает пластическая деформация тонких поверхностных слоев. При этом при пластической деформации поверхностный слой имеет специфическое волокнистое строение, исходная кристаллическая решетка искажается.

Эффективность алмазного выглаживания различных материалов в значительной мере определяется их исходной структурой.

Исследованиями установлено, что при выглаживании наиболее интенсивно возникает деформация в феррите, менее интенсивно – в перлите и мартенсите.

Высокая эффективность упрочнения объясняется более высокой плотностью дефектов, образующихся в поверхностном слое, за счет концентрации дислокаций. При этом создается тонкое структурное состояние металла, которое обеспечивало бы максимальную задержку дислокаций и минимальный их выход на поверхность. При алмазном выглаживании плотность дислокаций в поверхностном слое близка к предельному значению. С увеличением расстояния от поверхности плотность дислокаций уменьшается.

Особенностью процесса алмазного выглаживания является то, что если при других видах упрочнения полностью или частично удаляется слой металла, деформированный на предыдущей операции, то при алмазном выглаживании тот слой не удаляется, а претерпевает дополнительную упругопластическую деформацию.

Исследованиями установлено, что основной силой, создающей необходимое давление в зоне контакта инструмента с деталью, является нормальная составляющая. Тангенциальная и осевая составляющие силы в 10...20 раз меньше нормальной составляющей. Поэтому в качестве силы выглаживания принимают нормальную составляющую силы.

Производственный опыт свидетельствует, что оптимальная нормальная сила при алмазном выглаживании конструкционных сталей от 100 до 200 Н. При больших силах, как правило, возрастает глубина упрочненного слоя, увеличивается микротвердость в нижних слоях, однако происходит уменьшение микротвердости в верхнем тонком поверхностном слое.

Качество обработанной поверхности заготовки алмазным выглаживанием существенно зависит от режимов выглаживания: усилия и подачи. Число проходов, скорость выглаживания влияют на шероховатость и микротвердость обработанной поверхности в значительно меньшей степени. На качество обработанной поверхности заготовки не оказывают влияние применяемые смазочно-охлаждающие технологические средства (масла), но они способствуют повышению стойкости инструмента.

При правильно подобранных режимах выглаживания микронеровности на поверхности могут быть уменьшены в несколько раз (до $R_a=0,025$ мкм), микротвердость увеличивается до 60%, при глубине упрочненного слоя до 400 мкм. Кроме того, на выглаженной поверхности возникают значительные остаточные напряжения сжатия. Например, величина наибольших остаточных напряжений образцов из стали 45 после нормализации составляет от 200 до 350 МПа, после закалки – от 700 до 1000 МПа. Поэтому детали с поверхностью, обработанной алмазным выглаживанием, обладают высокой износостойкостью и усталостной прочностью. Например, после 43000 км пробега износ поршневых пальцев, обработанных алмазным выглаживанием, на 60...93% меньше необработанных образцов.

2.9 Калибрование отверстий шариком, дорном, деформирующей протяжкой

Калибрование отверстий методом поверхностного пластического деформирования *при поступательном скольжении инструмента по охватывающей его поверхности* деформируемого материала осуществляют в основном для повышения точности отверстий и качества их поверхностей. При калибровании жесткий инструмент (шарик, дорн или деформирующая протяжка) *с натягом* перемещаются в отверстия заготовки. Размеры поперечного сечения инструмента несколько больше размеров поперечного сечения отверстия для обеспечения натяга. Калибруют обычно сквозные отверстия с прямолинейной осью. Но при применении для калибрования одного шарика или дорна с одним деформирующим элементом возможно калибрование глухих отверстий, правда, при этом останется необработанным поясok у дна отверстия. Калибровать шариком в некоторых случаях возможно отверстия с криволинейной осью, но в этом случае применяется гибкая тяга.

Калибрование с помощью шарика или шариков является наиболее дешевым процессом. Процесс легко поддается автоматизации, однако размерная стойкость шариков низкая. Дорны и деформирующие протяжки – дорогие инструменты, имеющие высокую стойкость, и поэтому применяются в основном в крупносерийном и массовом производстве.

Калибрование подразделяют на поверхностное и объемное. При поверхностном калибровании с помощью шарика или дорна деформируется только поверхностный слой. Количество деформирующих элементов у дорна может быть различным. В этом случае при обработке отверстий диаметром менее 80 мм суммарный натяг составляет обычно 0,1...0,25 мм. При объемном калибровании с помощью деформирующих протяжек пластическое деформирование захватывает большие объемы, иногда по всему поперечному сечению (например, если заготовка труба).

Деформирующие протяжки всегда имеют большое количество деформирующих элементов, благодаря этому обеспечивается высокая производительность обработки. Суммарный натяг в этом случае составляет до 2 мм.

Как правило, калибрование отверстий осуществляется со скоростями от 2 до 7 м/мин., но если инструмент оснащен несколькими рабочими элементами, то – производительность процесса высокая.

Схемы калибрования отверстий представлены на рисунке 7, где: *а)* – шарик проталкивается в отверстие штоком; *б)* – дорн перемещается в отверстия сжимающей силой; *в)* – дорн перемещается в отверстия растягивающей силой.

В процессе калибрования сглаживаются неровности, исправляются погрешности формы, упрочняется поверхность. Операцию калибрования производят за один проход, но количество шариков или зубьев у дорна или деформирующей протяжки может быть различным.

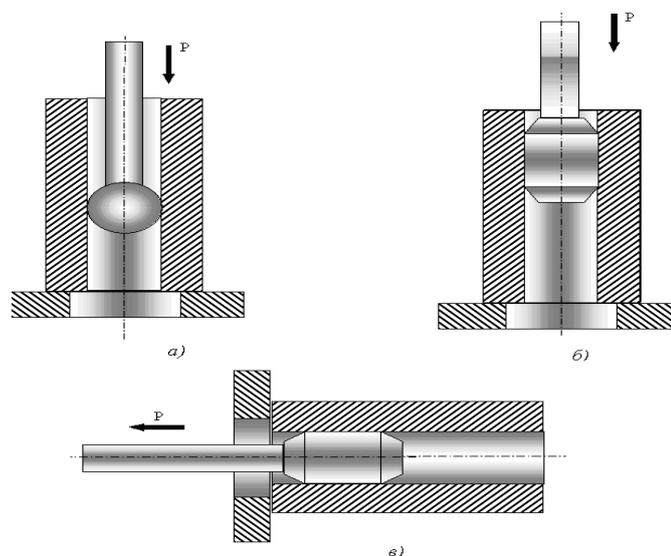


Рисунок 7 – Схемы калибрования отверстий

В автотракторостроении наиболее широко применяется дорнование (калибрование с помощью дорна). При дорновании точность предварительного отверстия может быть повышена на 30...60%. Обычно экономически целесообразной является точность не выше 7...8 квалитета. Качество обработанной поверхности при дорновании зависит от шероховатости предварительно обработанной поверхности отверстия, натяга дорнования, обрабатываемого материала, конструкции дорна, а также применяемой смазочно-охлаждающей жидкости. Деформирующее протягивание применяют реже, главная причина – деформирующие элементы только из твердого сплава. Особенно эффективно применение деформирующего протягивания при изготовлении деталей типа втулок из трубных заготовок. Например, деформирующе-режуще-выглаживающая протяжка обеспечивает за одну операцию получение из «черного» отверстия трубы отверстие 9...10 квалитета точности с параметром шероховатости R_a не ниже 1,6 мкм, при этом отклонение геометрической формы отверстия уменьшается в 10...20 раз.

Смазочный материал при дорновании и деформирующем протягивании имеет более существенное значение, чем при других статических методах поверхностного пластического деформирования. Поэтому применение смазочно-охлаждающих жидкостей обязательно, ведь они способствуют повышению стойкости инструмента, повышению точности размера и уменьшению шероховатости получаемой поверхности детали, а также снижают усилия деформирования.

Наивысшее качество обрабатываемой поверхности при дорновании обеспечивается в случае, если при предварительной обработке отверстия создаются поперечные риски микронеровностей (например, при предварительной обработке растачиванием, сверлением, зенкерованием, развертыванием), а не продольные (при протягивании). Дорнованием можно обрабатывать не только цилиндрические отверстия, но и фасонные, например, шлицевые.

Для калибрования отверстий в качестве оборудования используют прессы или протяжные станки. Для обеспечения правильного взаимного расположения инструмента и заготовки в процессе обработки часто применяют специальные самоустанавливающиеся приспособления с шаровой опорой. Заготовку в приспособлении не закрепляют.

Деформирующие элементы дорнов и протяжек часто выполняют симметричными для того, чтобы можно было работать с подачами вперед и назад (дорн с одним деформирующим элементом) или повернуть элемент при его износе. Чаще всего материал деформирующих элементов – это твердый сплав марок ВК15, ВК15М, ВК20-С.

Осевые силы при калибровании отверстий значительно больше, чем при раскатывании отверстий многороликовыми инструментами. Осевая сила зависит в первую очередь от величины натяга и количества деформирующих элементов инструмента. В среднем осевая сила при калибровании отверстий шариками, дорнами и деформирующими протяжками превосходит осевую силу при раскатывании отверстий многороликовыми раскатниками в $10^3 \dots 10^6$ раз.

2.10 Вибронакатывание и вибровыглаживание поверхностей

Вибронакатывание и вибровыглаживание применяют для повышения износостойкости деталей машин на поверхностях трения. В случае если деформирующий элемент инструмента шарик, то процесс называют вибронакатыванием, т.к. процесс происходит в условиях трения качения. Если деформирующий элемент алмаз, то процесс называют вибровыглаживанием, в этом случае процесс происходит в условиях трения скольжения. При вибронакатывании и вибровыглаживании на поверхностях трения деталей машин выдавливают слабо заметные, прилегающие друг к другу канавки. В канавках скапливаются смазочный материал и мелкие частицы, образующиеся в процессе износа. Канавки образуются вибронакатыванием, оптимальная площадь которых 35...45% от номинальной площади поверхности трения детали. В качестве деформирующего элемента обычно применяют шарик или алмаз. Радиус рабочей части инструмента обычно от 1 до 15 мм, который выбирают в зависимости от ширины и глубины канавок, жесткости детали и твердости обрабатываемого материала. Алмаз или композит рекомендован для материалов высокой твердости (≥ 50 HRC). Рабочая часть алмаза или композита выполняется только в виде полусферы. Для более мягких материалов применяют шарики в основном из подшипниковой стали, обычно диаметром от 4 до 10 мм. При этом сила поджатия инструмента до 1000 Н. При вибровыглаживании сила обычно от 50 до 200 Н, что позволяет обрабатывать мало жесткие и неравно жесткие детали.

Канавки можно формировать на плоских, цилиндрических, сферических и криволинейных поверхностях деталей машин. Для обработки тел вращения применяют токарные станки, на фрезерных и строгальных станках обрабатывают плоские поверхности. Кроме того, вибронакатывание и

вибровыглаживание может выполняться на станках с программным управлением.

В кинематическом отношении вибронакатывание и вибровыглаживание отличаются от обкатывания, раскатывания или алмазного выглаживания наличием дополнительного осциллирующего движения с малой амплитудой (до 4 мм). Частота колебаний от 900 до 3000 двойных ходов в минуту. Вибронакатывание и вибровыглаживание принято относить к статическим методам поверхностного пластического деформирования. Схема вибронакатывания шариком представлена на рисунке 8, шарикому сообщается дополнительное осциллирующее движение ΔS в направлении подачи.

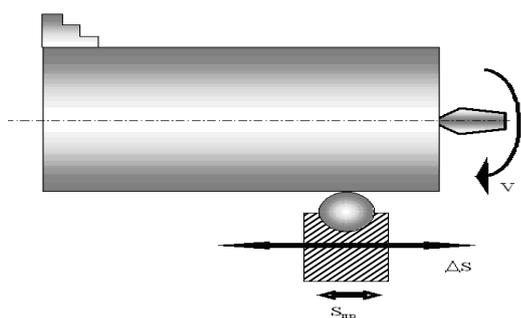


Рисунок 8 – Схема вибронакатывания шариком

Изменяя скорость, продольную подачу, амплитуду и частоту колебания, можно на обрабатываемой поверхности получать требуемый рисунок. Нанесение канавок одновременно упрочняет поверхность (микротвердость поверхности канавок и наплывов на 10...15% выше твердости исходного металла). Остаточные напряжения при вибронакатывании в 1,3...1,7 раза больше, чем при накатывании без вибраций. Вибронакатывание с образованием системы канавок на точность обработки практически не оказывает влияния. Изменение размера в данном случае происходит лишь за счет наплывов, образующихся у краев канавок, и составляет несколько микрометров. Изменение других параметров, характеризующих форму детали, не происходит. Примеры микрорельефа, полученного вибронакатыванием или вибровыглаживанием, представлены на рисунке 9.

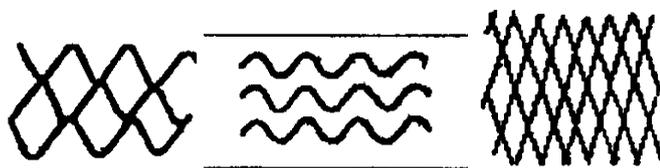


Рисунок 9 – Примеры микрорельефа, полученного вибронакатыванием или вибровыглаживанием

Вибронакатывание применяется в основном для обработки нетвердых материалов, например, металлов в состоянии поставки или нормализованных. Вибровыглаживание также можно применять для обработки мягких

материалов. Но детали из металлов высокой твердости (до 65 HRC) обрабатываются только вибровыглаживанием. Инструмент для вибровыглаживания имеет наконечник с алмазом или композитом небольшого размера, что позволяет обрабатывать углубления шириной более 5мм, а также обрабатывать поверхности непосредственно от торца или края углубления детали. То есть вибровыглаживание имеет более широкие технологические возможности по сравнению с вибронакатыванием, но во многих случаях уступает вибронакатыванию по производительности.

2.11 Обработка дробью

При обработке дробью поверхностное пластическое деформирование осуществляется за счет кинетической энергии потока дроби. Обработка дробью относится к ударным методам поверхностного пластического деформирования. При этом дробинки из чугуна, стали или других материалов (например, из специального стекла для тонкой отделки поверхности заготовки) потоком воздуха или смазочно-охлаждающей жидкости подаются на обрабатываемую поверхность заготовки. Этот процесс называется *дробеструйной обработкой*. Возможен и другой вариант подачи дроби – *дробеметная обработка*. В этом случае поток дроби формируется дробеметным аппаратом – вращающейся турбинкой. Дробеметный аппарат обеспечивает более высокую скорость потока дроби. Диаметр дробинки обычно от 0,02 до 0,8 мм, скорость полета дроби от 1 до 100 м/с, в зависимости от применяемой установки (дробеметной, дробеструйной), количество дроби, одновременно участвующей в обработке поверхности заготовки, составляет от 6 до 1400 кг/мин. Поэтому данный процесс осуществляют только в специальных установках. В процессе обработки, как правило, обрабатываемую деталь необходимо кантовать.

Обработка дробью применяется для увеличения сопротивления усталости металла деталей. Упрочнение основано на локальном воздействии дробинки на обрабатываемый металл детали. При этом возникают многочисленные зоны воздействия на весьма малых участках поверхности, в результате чего создаются очень большие контактные давления. Многочисленные контакты дробинки с материалом детали приводят к упрочнению поверхности, а в поверхностных слоях возникают напряжения сжатия. Упрочняющая обработка дробью приводит к повышению износостойкости, сопротивлению усталости на 15...70%, долговечности в 3...10 раз в зависимости от условий работы деталей, режимов и технологии упрочнения, а также материала заготовки, исходного состояния поверхности, предыдущей термообработки и некоторых других свойств.

К основным технологическим параметрам при обработке дробью относят: диаметр дроби, скорость полета дроби, время обработки и угол атаки. Именно от этих параметров в первую очередь зависят степень пластической деформации металла поверхностного слоя, глубина упрочненного слоя, величина остаточных напряжений сжатия и шероховатость обработанной поверхности.

При обработке дробью шероховатость обрабатываемой поверхности заготовки несколько ухудшается. Точность размеров обработанных поверхностей не повышается. А режим упрочнения характеризуется значительной нестабильностью, что объясняется следующими причинами: сравнительно большими допусками на диаметр дроби, ускоренным изнашиванием дроби, что приводит к уменьшению ее диаметра. Но обработка дробью очень производительна и недорога, поэтому применяется достаточно широко во всех типах производства, например, для обработки шестерен, листовых рессор, витых пружин, лопаток компрессоров и турбин, сварных швов, штамповой оснастки и др.

Имеется еще одна разновидность обработки дробью – это *ультразвуковая обработка дробью*. Данный процесс также принято относить к ударным методам обработки. Процесс заключается в следующем. В специальный контейнер загружают обрабатываемую деталь (детали) и дробь, которым сообщают ультразвуковые колебания с частотой от 18 до 24 кГц и амплитудой от 15 до 30 мкм. В процессе обработки необходимо периодически впрыскивать в контейнер небольшое количество жидкости (воды).

Под действием значительной ударной силы, создаваемой колебательной системой и множеством деформирующих элементов, пластически деформируется поверхностный слой обрабатываемой детали (деталей). Скорость деформирования – переменная, ее максимальное значение достигает 200 м/мин и более, что значительно превышает скорость при статических способах поверхностного пластического деформирования. Среднее давление, создаваемое в поверхностном слое детали под действием нормально направленной силы, в 3...9 раз больше, чем, например, при обкатывании шариком.

Ультразвуковая обработка дробью вследствие относительно больших напряжений и многократного приложения нагрузки создает специфичное напряженно-деформированное состояние в поверхностном слое. Множественное скольжение дробинок в процессе обработки дополнительно тормозит дислокации при пластическом деформировании. Плотность дислокаций и дисперсность блоков намного больше, чем при любых статических способах поверхностного пластического деформирования и степень наклепа, соответственно, в 1,2...1,5 раза выше. Уровень остаточных сжимающих напряжений также увеличивается.

Однако упрочнение ультразвуковой обработкой дробью не нашло достаточно широкого применения вследствие сложности применяемых устройств; необходимости использования ультразвуковых генераторов, которые занимают значительные производственные площади; большого расхода энергии; необходимости создания систем циркуляции охлаждающей воды и т.д. Дополнительный эффект упрочнения, создаваемый благодаря ультразвуковым колебаниям, не всегда окупает большие дополнительные затраты.

Применение ультразвуковой обработки дробью может быть эффективным только в условиях крупносерийного и массового производства для обработки деталей из термически и химико-термически обработанных сталей, а также

сталей аустенитного класса. Возможно применение для обработки деталей малой и неравномерной жесткости, так как процесс характеризуется небольшими статическими силами и малым временем деформирования.

2.12 Центробежная ударная обработка

При центробежной ударной обработке на обрабатываемую поверхность заготовки наносят последовательные удары рабочими элементами (шариками или роликами), свободно сидящими в радиальных отверстиях вращающегося диска. Рабочие элементы под действием центробежных сил занимают крайнее положение в радиальных отверстиях, а при ударе об обрабатываемую поверхность опускаются на глубину, равную натягу, отдавая энергию, создаваемую центробежной силой. Центробежная ударная обработка относится к ударным методам поверхностного пластического деформирования.

Способ применяют в основном для повышения сопротивления усталости металла деталей, работающих в тяжелых условиях эксплуатации. При правильно назначенных условиях и режимах упрочнения удается повысить сопротивление усталости обработанных деталей в 1,5...4 раза. Основные параметры центробежной ударной обработки: окружная скорость инструмента; число шариков или роликов; их натяг; диаметр шариков или роликов; окружная скорость обрабатываемой заготовки; продольная подача инструмента; число рабочих ходов; масса рабочего элемента. При правильно назначенных режимных параметрах обработки поверхности исходная шероховатость $Ra=20$ мкм уменьшается до $Ra=0,80$ мкм, а исходная шероховатость $Ra=0,80$ мкм уменьшается до $Ra=0,01$ мкм. Твердость поверхностного слоя повышается на 30...60%, а глубина упрочнения может достигать от 0,6 до 0,8 мм. Температура поверхности в момент деформирования может достигать 450°C , однако это, как правило, не вызывает структурных изменений в поверхностном слое. От точности установки шариков в сепараторе зависит нормальная работа инструмента. В связи с этим необходима его регулярная и тщательная балансировка.

Данным способом обрабатывают наружные и внутренние цилиндрические поверхности, плоские и фасонные поверхности. В качестве оборудования применяют обычно токарные, фрезерные, круглошлифовальные, плоскошлифовальные станки. При обработке фасонных поверхностей применение специальных копирных устройств обязательно.

Пример инструмента для центробежной ударной обработки деталей типа валов показан на рисунке 10. В качестве рабочих элементов применяются стальные шарики. На рисунке обозначено: 1 – токарный станок; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – инструмент; 4 – электропривод инструмента.

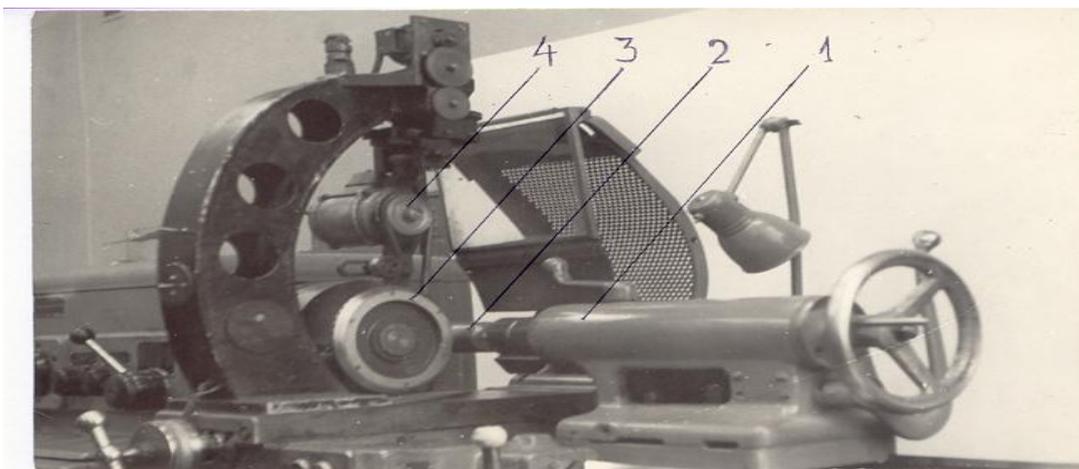


Рисунок 10 – Устройство для центробежной ударной обработки

2.13 Упрочнение чеканкой

Упрочнение чеканкой также относится к ударным методам поверхностного пластического деформирования. Этот способ поверхностного пластического деформирования применяется для упрочнения наружных и внутренних поверхностей. Упрочнение чеканкой состоит в упорядоченном ударном воздействии на упрочняемую поверхность специальными бойками механизированного инструмента – пневматического, электрического или механического. Инструмент для упрочнения чеканкой обычно называется чеканом.

Применяют инструменты с одним бойком и многобойковые. Форма бойков может быть сферической, эллипсной или иметь специальную фасонную форму. В качестве бойков могут быть применены ролики или шары из высокопрочной инструментальной стали или твердого сплава. Принцип чеканки напоминает принцип ультразвукового упрочнения, однако при чеканке частота колебаний инструмента на два порядка меньше, а его перемещение и энергия отдельных ударов – больше, чем при ультразвуковом упрочнении. Частота ударов при чеканке обычно от 10 до 50 Гц. Характер формирования упрочненной поверхности (в виде примыкающих друг к другу лунок) после чеканки тот же, что и после центробежного упрочнения.

Чеканка по сравнению с накатыванием, ультразвуковым упрочнением или центробежной ударной обработкой обеспечивает более значительную глубину (до 40 мм) и высокую степень упрочнения. В поверхностном слое формируются полезные сжимающие напряжения до 1000 МПа. Это объясняется тем, что при чеканке скорость деформирования во много раз меньше, чем, например, при ультразвуковом упрочнении. А энергия, прилагаемая к инструменту при единичном ударе, значительно больше. Однако после чеканки шероховатость обработанной поверхности обычно увеличивается, поэтому для ее уменьшения требуется дополнительная обработка.

Чеканку применяют в основном для упрочнения крупногабаритных деталей, когда необходимо обеспечить большую глубину и степень

упрочнения. Упрочнение чеканкой особенно эффективно для галтелей деталей. В этом случае вдоль образующей галтели наносят один или несколько рядов деформированных лунок (канавок), получающихся вследствие удара бойком. Если требуемое упрочнение достигается за один или несколько проходов в один ряд, то радиус сферической рабочей поверхности бойка должен быть равен радиусу галтели. При нанесении ударов в несколько рядов радиус сферической поверхности бойка должен быть меньше радиуса галтели; он обычно подбирается опытным путем.

Чеканку также применяют для упрочнения сварного шва и околошовной зоны у сварных деталей. В этом случае в качестве деформирующих элементов инструмента выступают ролики малого диаметра – иглы, а чеканы всегда многобойковые.

Одной из разновидностей чеканки является ударное раскатывание, которое применяют для обработки отверстий, в том числе и глубоких отверстий. В качестве деформирующих элементов инструмента применяют только ролики. В процессе обработки поверхность детали испытывает двойное воздействие: вследствие раскатывания и вследствие приложения ударной силы. В связи с мгновенным и кратковременным приложением нагрузки пластическое деформирование не успевает распространиться на большую глубину. Это позволяет обрабатывать отверстия в деталях малой и неравномерной жесткости. Для обеспечения нормальной работы ударных раскатников их необходимо устанавливать строго соосно с обрабатываемым отверстием детали, что достигается применением самоустанавливающихся (плавающих) устройств для крепления раскатника или детали. Некоторые конструкции раскатников позволяют обрабатывать глухие отверстия.

В процессе обработки ударными раскатниками необходимо обеспечить подачу смазочно-охлаждающих жидкостей, причем в достаточно больших объемах. Применение смазочно-охлаждающих жидкостей гарантирует стабильную работу инструмента при скоростях от 100 до 200 м/мин и выше, обеспечивая высокую стойкость инструмента. Обработку проводят как на универсальных станках (вертикально-сверлильных, радиально-сверлильных, токарных, фрезерных), так и на специальных установках.

2.14 Обработка проволочным инструментом (щетками)

Упрочняющая обработка поверхностей деталей машин осуществляется вращающимися металлическими щетками различных конструкций. Обработка щетками является ударным способом упрочнения. В качестве рабочих элементов щеток обычно применяется проволока диаметром от 0,1 до 1,0 мм. Используют проволоку из низкоуглеродистой, высокоуглеродистой стали, а также из пружинной, коррозионностойкой стали и цветных сплавов. Для придания большей жесткости проволоку обычно гофрируют. Иногда применяют нейлоновые щетки, на концах ворса которых закрепляют ударные элементы в виде шайб, звездочек или пластин.

Щетки различают по типам, размерам, материалу рабочей части, плотности набивки и длине проволочного ворса. Щетки с большой плотностью укладки ворса и малым его вылетом из корпуса, как правило, делают с большей толщиной проволоки. Такие щетки называют обычно иглофрезами. Их не применяют для упрочнения поверхности детали, но применяют для удаления заусенцев, очистки и зачистки; они обеспечивают съём металла толщиной до 3 мм.

Щетки с тонкой проволокой, меньшей плотностью набивки и большей длиной ворса применяют для упрочнения. Глубина упрочненного слоя от 0,05 до 0,1 мм. Микротвердость в поверхностном слое детали повышается на 20...50%. В поверхностном слое формируются полезные сжимающие напряжения. Исследования показывают, что даже в закаленных сталях повышается поверхностная микротвердость на 10...30%, в результате чего снижается износ на 30...40% по сравнению со шлифованными поверхностями, при этом в 1,5...2,2 раза уменьшается время обработки.

Щетки – дешевый инструмент, производительность обработки высокая, а в качестве оборудования обычно используются универсальные металлорежущие станки, поэтому обработка щетками применяется во всех типах производства. В случае обработки деталей на станках токарной группы необходимо установить дополнительный привод для вращения щетки, который вместе с инструментом помещают на суппорте станка.

Однако при обработке щетками на обрабатываемой поверхности имеют место сложные физико-механические и химические процессы. Это – скольжение ворса по обрабатываемой поверхности детали, разрушение окисных пленок, всегда имеющих на обрабатываемой поверхности, обусловленные этим адгезия металла ворса и поверхности детали и т.д.

В зоне контакта щетки с обрабатываемой поверхностью детали одновременно протекают два процесса – микрорезание металла проволочками ворса с образованием стружки и пластическое деформирование в поверхностном слое. Поэтому в общем случае при обработке щетками предусматривают припуск под обработку микрорезанием до 0,1 мм, а после его срезания получают упрочнение и полезные сжимающие напряжения в поверхностном слое. Тогда, как при обработке только резанием лезвийным инструментом, получают в поверхностном слое остаточные растягивающие напряжения.

Для повышения упрочняющего эффекта следует применять только длинноворсовые щетки с диаметром проволоки ворса не более 0,5 мм. При этом частота вращения щетки должна быть больше, чем при других видах обработки щетками.

Пластическое деформирование можно усилить и даже полностью исключить резание путем применения щеток с плоским ворсом, ориентированным относительно обрабатываемой поверхности детали.

2.15 Формообразование фасонных профилей методом поверхностного пластического деформирования

При поверхностном пластическом деформировании можно осуществлять перераспределение небольших объемов металла. Таким образом, можно формировать на поверхностях деталей рифления, резьбовые и зубчатые профили. Однако возможно формирование только остроугольных резьб, мелких шлицев и зубьев.

Формообразование фасонных поверхностей на деталях машин в холодном состоянии обычно называют *накатыванием*, а инструмент, применяемый для этого, – *накатным*. Профиль накатываемых деталей образуется в результате вдавливания инструмента в материал заготовки, что сопровождается выдавливанием части материала во впадины инструмента. Главные преимущества метода накатывания – это высокая производительность, сравнительно низкая себестоимость обработки из-за отсутствия стружки и высокое качество накатанных профилей. Накатанные детали имеют более высокие механическую и усталостную прочность, износостойкость. Это можно объяснить, в частности, тем, что при формообразовании накатыванием волокна исходной заготовки не перерезаются, как при обработке резанием, а "повторяют" профиль поверхности детали. Формообразование может выполняться как черновая, чистовая или отделочная обработка.

Накатывание резьбы производят обычно до термической обработки. Хотя точные резьбы можно накатывать и после неё. Распространённым методом является формирование резьбы плашками. Схема процесса накатывания плашками представлена на рисунке 11 а). Заготовка 2 помещается между подвижной 1 и неподвижной 3 плашками, на рабочих поверхностях которых фасонный профиль, соответствующий профилю и шагу формируемой резьбы. При перемещении подвижной плашки заготовка катится между плашками, а на ее поверхности образуется резьба. Резьбу можно также формировать роликами, как показано на рисунке 11 б). Ролики 1 и 3 получают принудительное вращение, заготовка 2 – свободно обкатывается между ними. Кроме этого ролику 3 сообщается радиальная подача для вдавливания в металл обрабатываемой заготовки на необходимую глубину. Обработка роликами требует меньших сил, чем обработка плашками. Обычно формирование резьбы с помощью плашек применяют для получения более мелких и менее точных резьб на мелких деталях. Для накатывания резьб применяют специальные накатные станки, работающие по одной из вышеуказанных схем. В условиях единичного и мелкосерийного производства в качестве оборудования для накатывания резьбы плашками применяют поперечно-строгальные станки.

Накатыванием получают также рифления различного профиля, шлицевые и зубчатые профили с модулем не более 4 мм. При этом накатывание производительнее зубонарезания от 15 до 20 раз. Для накатывания рифлений обычно применяют универсальные металлорежущие станки. Пример накатывания рифлений на токарном станке представлен на рисунке 12 в). Шлицевые и зубчатые профили получают накатыванием только на

специальном оборудовании, накатных станках. Пример одной из схем накатывания шлицевых и зубчатых профилей представлен на рисунке 12 *з*), где заготовка 2 прокатывается между двумя зубчатыми накатниками 1 и 3.

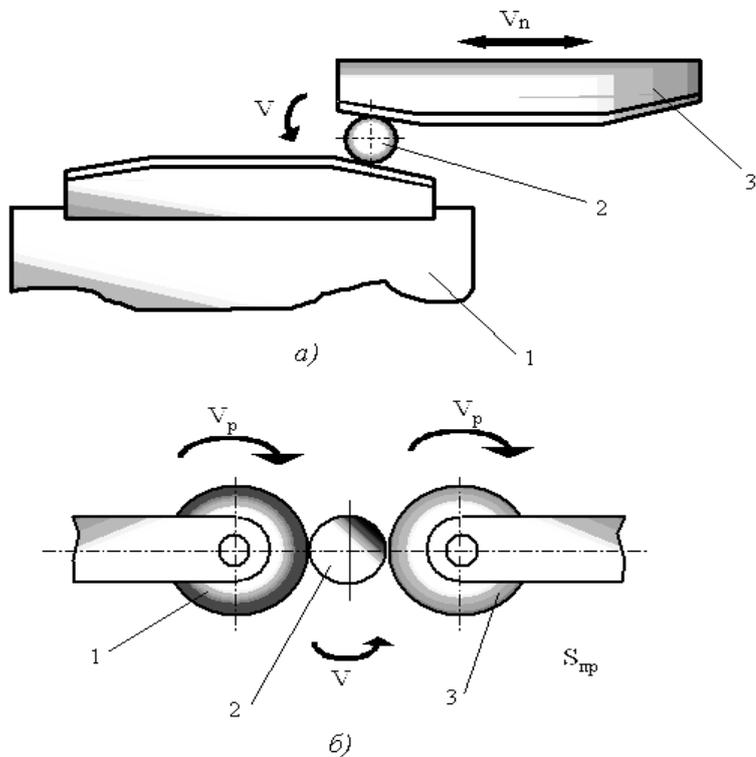


Рисунок 11 – Схемы накатывания резьбы

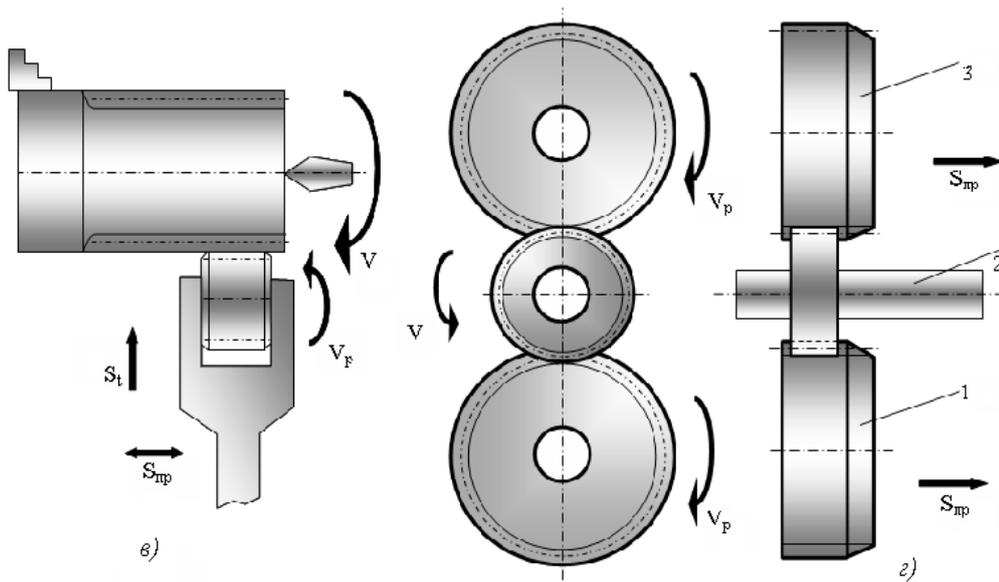


Рисунок 12 – Схемы накатывания рифлений, шлицевых и зубчатых профилей

2.16 Материалы, применяемые для изготовления инструментов, работающих методом поверхностного пластического деформирования

Материалы, применяемые для изготовления рабочих элементов и инструментов, работающих методом поверхностного пластического деформирования, должны иметь более высокие физико-механические свойства, чем материалы обрабатываемых деталей. Они должны обладать следующими основными свойствами: высокой твердостью; способностью сопротивляться истиранию и ударным воздействиям при обработке ударными методами поверхностного пластического деформирования; высоким пределом прочности на сжатие; малым коэффициентом трения по металлу; большой теплопроводностью и теплоемкостью; высокой антиадгезионной способностью. Кроме того, при некоторых способах поверхностного пластического деформирования температура в месте контакта с обрабатываемым металлом может достигать 500°С, поэтому материалы должны обладать теплоустойчивостью и теплостойкостью.

Для обработки пластическим деформированием в качестве инструментальных материалов применяют высокоуглеродистые стали, средне- и высокоуглеродистые легированные стали, в том числе и быстрорежущие, а также твердые сплавы, алмазы и композиты. Выбор материала деформирующих элементов инструментов зависит от многих факторов, важнейшими из которых являются:

- метод и способ поверхностного пластического деформирования;
- условия работы инструмента, в первую очередь – это усилия деформирования и тепловая обстановка в зоне деформирования;
- конструкция инструмента;
- серийность производства.

Примеры марок материалов, применяемых для изготовления инструмента для обработки поверхностным пластическим деформированием:

- высокоуглеродистые стали типа У10А, У12А;
- легированные стали типа 5ХНМ, 18ХГТ, ШХ15, ХВГ, 6Х4М2ФС, 6Х6В3МФС, 7Х3ВМФС, 11Х4В2МФ3С2, Х12М, Х12Ф1, Х12МФ, Х12ВМФ4, 8Х4В9Ф2;
- быстрорежущие стали типа Р6М5, Р9, Р9К5;
- твердые сплавы типа ВК15, ВК15М, ВК20-С, Т5К12, ТТ7К12;
- алмазы природные и синтетические марок АСПК (карбонадо) и АСПБ (баллас), а также композит 09 (ПТНБ) и композит 10 (гексанит-Р).

2.17 Выбор параметров процесса поверхностного пластического деформирования

2.17.1 При обкатывании и раскатывании поверхностей деформирующим инструментом с шариками и роликами основными режимными параметрами обработки являются:

- диаметр шариков или рабочей поверхности роликов;

- количество деформирующих элементов (шариков или роликов);
- усилие деформирования;
- скорость подачи деформирующих элементов относительно обрабатываемой поверхности;
- величина натяга при калибрующем обкатывании и раскатывании.

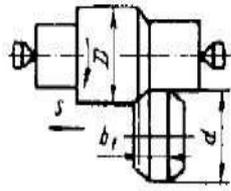
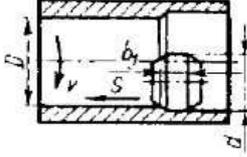
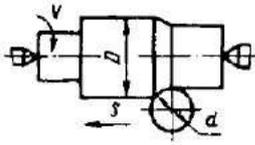
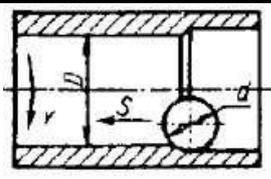
Выбор диаметра шариков и рабочего диаметра роликов определяется в первую очередь конструкцией применяемого деформирующего инструмента. При прочих равных условиях, чем меньше диаметр, тем компактнее инструмент, тем большее количество деформирующих элементов может быть у инструмента, размещаемого в ограниченном рабочем пространстве станка. При малых диаметрах деформирующих элементов достигается большее упрочнение и снижение шероховатости. Однако с увеличением диаметра шарика глубина залегания остаточных напряжений возрастает, но градиент и абсолютные значения уменьшаются. На упрочнение и параметр шероховатости оказывает влияние также конфигурация и размеры роликов. При роликах малых диаметров от 4 до 6 мм достигается большее упрочнение и снижение шероховатости. При раскатывании отверстий ролики диаметром более 20 мм практически не применяют. Поэтому диаметры шариков и роликов для деформирующих инструментов в производственных условиях подбирают опытным путем. Вначале опробуют инструменты с минимальными диаметрами рабочих элементов, но если на обработанной поверхности наблюдается шелушение вследствие перенаклепа, то диаметр увеличивают.

Количество деформирующих элементов у инструмента, в первую очередь, влияет на производительность обработки, чем больше количество – тем выше производительность. Но большое количество деформирующих элементов усложняет конструкцию инструмента и делает ее дороже.

Усилия при обкатывании и раскатывании поверхностей шариками и роликами зависят от многих факторов. На величину сил обкатывания и раскатывания влияют физико-механические свойства обрабатываемого материала. Для углеродистых и конструкционных сталей, имеющих хорошие пластические свойства, при обкатывании и раскатывании шариками оптимальная нормальная сила обычно от 500 до 1200 Н, при обработке менее пластичных сталей нормальная сила может возрасти до 2500 Н. При обкатывании и раскатывании роликами углеродистых и конструкционных сталей нормальная сила, как правило, от 1500 до 6000 Н. На начальных этапах выбора и проектирования деформирующего инструмента в качестве стартового значения контактное давление принимают равным $(1,8...2,1) \sigma_T$, где σ_T – предел текучести обрабатываемого материала, Па.

Формулы для расчета нормальных сил для режима упрочнения обкатыванием и раскатыванием шариками и роликами приведены в таблице 2. В формулах обозначено: P – нормальная сила обкатывания или раскатывания, Н; q – максимальное давление обкатывания, Па; D – диаметр обкатываемой или раскатываемой поверхности, мм; d – диаметр шарика или рабочей поверхности ролика, мм; b_l – ширина контакта ролика с обрабатываемой поверхностью, мм; E – модуль упругости обрабатываемого материала, Па.

Таблица 2 – Формулы для расчета нормальных сил при обкатывании и раскатывании

Деформирующий элемент	Схема обработки	Формула
Ролик		$P = \frac{Db_1q^2}{0,126E\left(\frac{D}{d} + 1\right)}$
Ролик		$P = \frac{Db_1q^2}{0,18E\left(\frac{D}{d} - 1\right)}$
Шарик		$P = \left(\frac{dq}{0,045E}\right)^2 q$ при $D/d \geq 10$
Шарик		$P = \left[\frac{Dq}{0,054E\left(\frac{D}{d} - 1\right)} \right]^2 q$

Данные для выбора подачи при обкатывании и раскатывании шариком (шариками) приведены в таблице 3.

Данные для выбора подачи в зависимости от профильного радиуса (радиуса рабочей части) ролика приведены в таблице 4.

При калибрующем обкатывании и раскатывании деформирующим инструментом с шариками оптимальный натяг обычно от 0,07 до 0,09 мм для сталей невысокой и средней твердости, натяг от 0,08 до 1,2 мм для высокопрочных сталей. Рекомендуемые диаметры шариков от 10 до 30 мм. С увеличением диаметра шариков натяг следует увеличивать. Скорость обработки сталей от 20 до 180 м/мин при подаче на один шарик инструмента от 0,02 до 0,11 мм/об.

При калибрующем обкатывании и раскатывании деформирующим инструментом с роликами оптимальные натяги от 0,01 до 0,24 мм. Скорость обработки сталей от 10 до 100 м/мин при подаче инструмента от 0,1 до 0,5 мм/об.

Таблица 3 – Рекомендуемые подачи при обкатывании и раскатывании поверхностей с шаровыми рабочими элементами

Параметр шероховатости Ra, мкм		Число шариков в инструменте	Подача (мм/об) при диаметре шарика, мм				
требуемый	исходный		6	10	22	40	100
0,4	3,2	1	0,20	0,25	0,35	0,50	0,80
		2	0,40	0,50	0,70	1,10	1,60
		3	0,60	0,75	1,10	1,50	2,50
0,2	1,6	1	0,14	0,20	0,25	0,35	0,60
		2	0,30	0,40	0,50	0,70	1,20
		3	0,35	0,60	0,75	1,00	1,80
0,1	1,6	1	0,10	0,15	0,20	0,25	0,40
		2	0,20	0,30	0,40	0,50	0,80
		3	0,30	0,45	0,60	0,75	1,20
0,05	0,8	1	0,07	0,10	0,12	0,20	0,30
		2	0,15	0,20	0,25	0,40	0,60
		3	0,20	0,30	0,40	0,60	0,90
0,025	0,8	1	0,05	0,06	0,09	0,12	0,12
		2	0,10	0,15	0,20	0,25	0,40
		3	0,15	0,20	0,30	0,40	0,60

Таблица 4 – Рекомендуемые подачи (мм/об) при обкатывании и раскатывании роликовым инструментом

Профильный радиус ролика, мм	Требуемый параметр шероховатости Ra, мкм								
	0,8		0,4		0,2				
	Исходный параметр шероховатости Ra, мкм								
	6,3	3,2	1,6	3,2	1,6	0,8			
	Число роликов в инструменте								
	1; 2; 3	1	2; 3	1; 2; 3	1	2; 3	1; 2; 3	1	2; 3
5	0,07	0,15	0,30	0,07	0,15	0,07	0,15		
6,3	0,09	0,18	0,36	0,09	0,18	0,09	0,17		
8	0,12	0,23	0,46	0,12	0,23	0,12	0,19		
10	0,15	0,29	0,56	0,15	0,29	0,15	0,21		
12,5	0,18	0,37	0,64	0,18	0,34	0,18	0,24		
16	0,23	0,47	0,72	0,23	0,39	0,23	0,27		
20	0,29	0,58	0,80	0,29	0,42	0,29	0,30		
25	0,37	0,83	0,88	0,37	0,48	0,35	0,35		
32	0,47	0,94	1,00	0,47	0,54	0,39	0,39		
40	0,58	1,12	1,12	0,58	0,60	0,43	0,43		
50	0,74	1,24	1,24	0,66	0,66	0,48	0,48		
63	0,92	1,40	1,40	0,72	0,72	0,54	0,54		
80	1,17	1,60	1,60	0,84	0,84	0,60	0,60		
100	1,45	1,80	1,80	0,96	0,96	0,66	0,66		

2.17.2 При алмазном выглаживании основными режимными параметрами обработки являются:

- сила выглаживания;
- подача;
- радиус рабочей части алмаза или композита.

Данные по выбору оптимальных режимов выглаживания приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Оптимальные режимы выглаживания

Твердость обрабатываемого материала	Параметр шероховатости исходной поверхности Ra, мкм	Радиус рабочей части алмаза или композита, мм	Режим обработки			Параметр шероховатости обработанной поверхности Ra, мкм
			нормальная сила, Н	подача, мм/об	скорость, м/мин	
50...65HRC	0,20	1,3...2,0	200–250	0,02–0,04	50-100	0,050
	0,10		150–200			0,050
	0,050		120-150			0,025
30...50HRC	0,40	1,5...2,0	120-150	0,03-0,05	50-100	0,10
	0,20		120-150			0,025-0,050
	0,10		100-120			0,025
20...30HRC	1,60	2,0...2,5	120-150	0,03-0,08	50-200	0,20-0,40
	0,80		100-120			0,10-0,20
	0,40		80-100			0,050-0,10
менее 300HB	0,80	2,5...3,5	120-150	0,06-0,10	50-200	0,20
	0,40		100-120			0,10
	0,20		80-100			0,050-0,10
	0,10		80-100			0,025-0,050
	0,005		60-80			0,025

Применение указанных в таблице 5 режимов выглаживания обеспечивает наивысшее качество поверхности. Но если целью выглаживания является достижение максимального упрочнения при снижении требований к качеству поверхности, то необходимо увеличить силу выглаживания от 15 до 40% или же уменьшить радиус рабочей части инструмента от 10 до 30%, можно также одновременно «ужесточить» оба эти параметра.

2.17.3 При калибровании отверстий шариком (шариками), дорном или деформирующей протяжкой основными режимными параметрами обработки являются:

- натяг на один деформирующий элемент;
- общий натяг;
- распределение величины натяга между всеми деформирующими элементами дорна или протяжки.

Так, например, для достижения точности по 11...13 качеству нужна обработка с большими и одинаковыми для всех деформирующих элементов натягами. Относительная деформация, осуществляемая каждым элементом, приблизительно 2...4%. При этом количество деформирующих элементов минимально. Для достижения точности по 8...11 качествам при обработке отверстий в жестких деталях с постоянной жесткостью по длине следует применять средние натяги (от 0,5 до 1,0 мм), одинаковые для всех деформирующих элементов, количество которых значительно. Для обработки отверстий с точностью размеров по 8...11 качествам в деталях с переменной толщиной стенки следует применять инструменты с уменьшающимися натягами от первого к последнему деформирующему элементу (натяги на последних элементах от 0,02 до 0,1 мм). Для получения точности по 5...6 качествам необходима предварительная точная обработка резанием, после чего производят деформирование с малыми натягами и с суммарной деформацией 0,5...1,0%.

Для получения параметра шероховатости обработанной поверхности $Ra \leq 0,80$ мкм необходимо, чтобы исходная шероховатость поверхности была $Ra \leq 6,3$ мкм. Шероховатость обработанных поверхностей тонкостенных деталей получается в 2...4 раза больше, чем при обработке толстостенных.

2.18 Вопросы для самоконтроля

1. Какие количественные характеристики пластических свойств металла Вы знаете?
2. Почему физико-механические характеристики металла детали или заготовки, полученной холодной деформацией, выше, чем полученные горячей деформацией?
3. Каковы основные цели обработки поверхностным пластическим деформированием деталей машин?
4. Перечислите основные способы поверхностного пластического деформирования, относящиеся к статическим методам.
5. Перечислите основные способы поверхностного пластического деформирования, относящиеся к ударным методам.
6. Более глубокий упрочненный слой достигается при прочих равных условиях при обкатывании и раскатывании поверхности шариком или роликом?
7. Как влияет диаметр шарика или ролика при обкатывании или раскатывании поверхности на величину, глубину и шероховатость обработанной поверхности?
8. Что такое натяг инструмента при калибрующей обработке?
9. Какая форма рабочей части инструмента при алмазном выглаживании применяется наиболее широко?
10. Из каких материалов изготавливается рабочая часть инструментов для алмазного выглаживания?

11. Какие инструменты применяются для калибрования сквозных отверстий с прямолинейной осью?
12. Какие инструменты могут быть применены для калибрования глухих отверстий с прямолинейной осью?
13. Можно ли калибровать сквозное отверстие с криволинейной осью? Если можно, то каким инструментом?
14. Чем деформирующая протяжка отличается от дорна?
15. Какой деформирующий элемент применяется у инструмента для вибронакатывания?
16. Какие деформирующие элементы применяются у инструмента для вибровыглаживания?
17. Для обработки детали из стального сплава с твердостью не менее 56 HRC следует применять вибронакатывание или вибровыглаживание?
18. Какой способ обработки дробью обеспечивает максимальное упрочнение поверхностного слоя обработанной детали?
19. Какой способ обработки дробью обеспечивает максимальную глубину упрочнения в поверхностном слое обработанной детали?
20. Каким образом можно повысить упрочняющий эффект на обрабатываемую поверхность детали при обработке проволочным инструментом (щетками)?

3 ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

3.1 Классификация физико-химических методов обработки

К физико-химическим методам обработки деталей машин относят *электроэрозионную, лучевую, ультразвуковую, электрохимическую обработку*. На долю физико-химической обработки приходится не более 1,5% объема механообрабатывающего производства. То есть по сравнению с обработкой давлением и резанием физико-химическая обработка применяется не очень широко.

В зависимости от используемого физического или химического процесса эти методы можно разделить на четыре группы.

Первая группа – метод *электроэрозионной обработки токопроводящих материалов*, основанный на энергии электрических кратковременных разрядов, возбуждаемых между инструментом и заготовкой, и преобразуемой в тепло, расплавляющее обрабатываемый материал. В зависимости от параметров и вида электрического разряда электроэрозионная обработка подразделяется на следующие основные способы: *электроискровая, электроимпульсная, высокочастотная электроимпульсная и электроконтактная* обработка. Каждый из способов отличается выходными технологическими характеристиками, оборудованиением и имеет свою область применения.

Вторая группа – *лучевой метод*, способы которого применяют для обработки как токопроводящих, так и токонепроводящих материалов. Метод основан на воздействии на обрабатываемый материал лучистой энергии с

высокой плотностью. Съем металла производится путем расплавления его теплом, выделяющимся при преобразовании лучистой энергии в тепловую энергию на обрабатываемой поверхности заготовки. Сюда относится обработка сфокусированными *электронными, световыми и ионными лучами*.

Третья группа – *метод, основанный на импульсном ударном механическом воздействии инструмента на обрабатываемую заготовку*. Частота импульса относится к ультразвуковой, поэтому метод называют *ультразвуковым*. Ультразвуковой метод эффективен при обработке хрупких материалов, частицы которых могут откалываться при ударе инструментом.

Методы 1-3 групп называются **электрофизической обработкой**. *Электрофизическая обработка – это обработка, заключающаяся в изменении формы, размеров и (или) шероховатости поверхности заготовки с применением электрических разрядов, магнитострикционного эффекта, электронного или оптического излучения, плазменной струи*.

Четвертая группа – это **электрохимическая обработка**. *Электрохимическая обработка – это метод обработки, основанный на преобразовании электрической энергии в энергию химических связей, то есть на образование легкоудаляемых из зоны обработки химических соединений (анодное растворение)*. Метод реализуется в среде электролита. Метод имеет несколько способов, которые различаются между собой, в первую очередь, по способу подвода электролита в зону обработки (в среде проточного электролита, в среде неподвижного электролита). Основные способы электрохимической обработки – это *электрохимическое полирование, электрохимическая размерная обработка*. К этой группе обычно относят и *анодно-механическую обработку*. Хотя с точки зрения физической сущности процессов анодно-механическая обработка занимает промежуточное положение между электрофизическим и электрохимическим методами обработки.

Как видно из вышеизложенного, все методы физико-химической обработки основаны на трех эффектах: **тепловом, механическом и химическом либо на их различных комбинациях**.

Методы физико-химической обработки характеризуются более высокой энергонасыщенностью, по сравнению с традиционными методами – обработкой давлением или обработкой резанием. Это обусловлено тем, что снятие слоя металла при физико-химической обработке происходит в виде жидкой, парообразной или частично ионизированной фазы, а не в виде твердофазной макроскопической стружки, как при обработке резанием.

Основные характеристики различных методов обработки для сравнения приведены в таблице 6.

Как видно из таблицы, обработка резанием более чем в пятьдесят раз превосходит все остальные методы по производительности (скорости съема металла), более чем в пятьдесят раз по экономии энергии и точности обработки.

Однако в машиностроении возникают проблемы, связанные с обработкой металлов, когда традиционные методы (литье, обработка давлением, обработка резанием) либо неэффективны, либо вообще не могут быть применены.

Таблица 6 – Основные характеристики различных методов обработки

Метод обработки	Максимальная скорость съема металла, мм ³ /мин	Достижимая точность, мм	Удельный расход энергии, Вт/мм ³
Резание	10 ⁷	0,002	0,02
Электроэрозионный	10 ⁴	0,01	1
Лучевой	5	0,005	1000
Ультразвуковой	600	0,005	13
Электрохимический	4·10 ⁴	0,05	3

К таким проблемам относятся:

- а) обработка труднообрабатываемых, высокопрочных и закаленных сталей;
- б) обработка вязких сталей (жаропрочные и нержавеющей стали);
- в) обработка хрупких материалов, относящихся к неметаллическим (например, керамики);
- г) обработка сложных по форме фасонных поверхностей;
- д) обработка отверстий малого диаметра и прорезка узких и глубоких пазов (менее 1 мм);
- е) получение поверхностей с малой шероховатостью ($Ra \leq 0,01$ мкм);
- ж) получение поверхностей с малой толщиной дефектного слоя и наклепа;
- и) снятие заусенцев на фасонных поверхностях.

Эти проблемы могут быть решены применением физико-химической обработки, которая имеет ряд несомненных преимуществ и достоинств, к которым относят:

- а) возможность обработки любых материалов независимо от их твердости и прочности; при этом производительность обработки не зависит от прочности и твердости обрабатываемого материала;
- б) возможность обработки поверхностей сложной формы одновременно по всей поверхности при простом поступательном движении инструмента;
- в) возможность обработки поверхности без силового воздействия на обрабатываемую заготовку;
- г) простота автоматизации технологического процесса обработки.

Удельный вес физико-химической обработки в машиностроении невелик, он составляет около 1,5%. При этом в основном применяется электроэрозионная обработка, на ее долю приходится 65%, ультразвуковая обработка – 15%, электрохимическая обработка – 13%, все остальные – 7%.

3.2 Общие сведения об электрической эрозии

Эрозия – это процесс разрушения. *Электроэрозия – разрушение, происходящее на поверхности одного из проводников, разделенных*

диэлектриком, в период электрического разряда между ними. Разряд между электродами происходит в газовой среде или при заполнении межэлектродного промежутка диэлектрической жидкостью. В жидкой среде процесс эрозии протекает интенсивнее. С увеличением вязкости рабочей среды ухудшаются условия эвакуации продуктов эрозии из межэлектродного промежутка, поэтому производительность обработки снижается.

Для обеспечения непрерывности процесса необходимо, чтобы зазор между электродом-инструментом и электродом-заготовкой был бы постоянным. Межэлектродный промежуток, как правило, составляет от 0,01 до 0,05 мм. Требуемый межэлектродный промежуток обеспечивается механизмом автоматической подачи инструмента электроэрозионных станков.

При наличии потенциала на электродах межэлектродное пространство ионизируется. Когда разность потенциалов достигнет определенной величины, в среде между электродами образуется канал проводимости, по которому устремляется электрическая энергия в виде импульсного или дугового разряда. Температура в канале разряда достигает от 30000 до 40000°C. Благодаря высокой концентрации энергии, реализуемой во времени от 10^{-5} до 10^{-8} сек., мгновенная плотность тока в канале проводимости достигает от 8000 до 10000 А/мм². В результате этого температура на поверхности электрода-заготовки возрастает почти до 12000°C. При этой температуре мгновенно оплавляется и испаряется элементарный объем металла и на поверхности электрода образуется эрозионная лунка.

Явления, происходящие в межэлектродном промежутке, очень сложны. Физическая природа явлений, происходящих в этом промежутке, исследовалась многими учеными, и они пришли к следующим выводам. Величина эрозионной лунки, образующейся в электроде при импульсном разряде, во многом зависит от того, каким образом происходит удаление обрабатываемого материала из лунки. Возможны три варианта выброса материала из лунки:

а) материал выбрасывается в жидком состоянии по мере его плавления, что приводит к наибольшей эффективности процесса и наименьшей его энергоемкости;

б) в процесс разряда в лунке накапливается жидкий обрабатываемый материал, который выбрасывается одновременно только в конце разряда (этот вариант характеризуется значительно меньшей эффективностью и большей энергоемкостью, т.к. накапливаемый материал нагревается выше температуры плавления);

в) жидкий материал не выбрасывается из лунки, а нагревается до температуры испарения, что приводит еще к меньшей эффективности и наибольшей энергоемкости, так как теплосодержание парообразного обрабатываемого материала очень велико.

Превалирование того или иного варианта выброса обрабатываемого материала в первую очередь зависит от параметров импульса подводимой энергии. При длительных разрядах или при большой мощности, но малой длительности разряда, а тем более при большой мощности и большой длительности разряда выброс обрабатываемого металла имеет капельный

характер, поэтому энергозатраты минимальны, а производительность процесса – максимальна. Но при этом в наибольшей степени разрушается катод. Следовательно, обрабатываемая заготовка должна быть катодом. При очень малой длительности и большой мощности разряда выброс обрабатываемого материала из лунки имеет пароструйный характер, что приводит к сильному разрушению анода, поэтому в данном случае обрабатываемая заготовка должна быть анодом. А так как значительная часть энергии разряда тратится на парообразование, то процесс более энергоемкий и менее производительный.

В общем случае, когда процесс электроэрозионной обработки включает все три варианта удаления обрабатываемого материала, эрозионная лунка образуется под действием различных сил, возникающих в разные периоды процесса. В момент действия импульса тока удаление обрабатываемого металла (30% объема) происходит под влиянием электродинамических сил, а после прекращения действия импульса тока удалению металла способствуют электростатические силы. На заключительных стадиях процесса металл эвакуируется за счет действия газов, вырывающихся из нагретой поверхности металла. Окончательное формирование эрозионной лунки происходит при захлопывании кавитационного пузыря (максимальное давление, на границе которого достигает 30 МПа) и действия сил сжатия от волны термических напряжений, направленных к центру лунки. При этом часть удаленного металла, которая не испарилась, застывает в диэлектрической среде межэлектродного промежутка в виде сферических гранул диаметром от 0,005 до 0,01 мм.

Следующий импульс тока пробивает межэлектродный промежуток там, где расстояние между электродами окажется наименьшим, т.е. *обработанная поверхность при электроэрозионной обработке – это совокупность эрозионных лунок.*

Шероховатость обработанной поверхности зависит от размеров лунки, обработанной одним импульсом. Чем больше размеры лунки, тем грубее получаемая поверхность. Размеры лунки (диаметр и глубина) определяются энергией одного импульса. Поэтому черновую обработку ведут при малой частоте и большой энергии импульса, а чистовую – при большой частоте и малой энергии импульса.

Влияние параметров импульса на шероховатость и производительность процесса представлено в таблице 7.

Производительность процесса зависит от того, с какой частотой следуют разряды и какое количество металла выброшено при каждом разряде. А это, в свою очередь, зависит от свойств обрабатываемых материалов, называемых электроэрозионной обрабатываемостью. Электроэрозионная обрабатываемость определяется природой обрабатываемого материала, в первую очередь его теплофизическими свойствами (температурой плавления и кипения, теплопроводностью и теплоемкостью). Если электроэрозионную обрабатываемость стали принять за единицу, то для магниевых сплавов электроэрозионная обрабатываемость – 6, для алюминиевых сплавов – 4, для

латуни – 1,6, для титановых сплавов – 0,6, а для твердых сплавов – 0,5 (т.е., электроэрозионная обрабатываемость цветных металлов выше, чем черных).

Таблица 7 – Влияние параметров импульса на шероховатость и производительность процесса обработки железоуглеродистых сплавов

Режим	Время одного импульса, мкс	Энергия импульса, Дж	Наибольшая высота неровностей профиля Rmax, мкм	Производительность обработки, мм ³ /мин
Черновой (жесткий)	100...10000	1...5	50...1000	100...30000
Чистовой (средний)	200...500	0,2...0,5	5...25	30...200
Отделочный (мягкий)	1...20	0,05...0,1	1...3	5...20

Точность обработки снижается с увеличением поперечных размеров электродов. Так, например, при диаметре электрода-инструмента около 25 мм погрешность обработки составляет $\approx 0,05$ мм, а при диаметре около 100 мм – $\approx 0,08$ мм.

Свойства поверхностного слоя определяются следующими процессами, сопровождающими электроэрозионную обработку. Поверхностный слой подвергается локальному кратковременному нагреву до температуры от 5000 до 12000°C с большим градиентом температуры. При этом большая часть расплавленного металла удаляется из зоны разряда, но некоторая часть остается в лунке. При застывании металла на поверхности лунки образуется пленка, отличающаяся свойствами от основного металла. Это объясняется так: металл в расплавленном состоянии активно вступает в химическое взаимодействие с продуктами разложения рабочей жидкости и насыщается содержащимися в ней компонентами. При этом тепловая ситуация обуславливает закалку поверхностного слоя. Все это приводит к образованию микротрещин. А большие градиенты температуры способствуют появлению остаточных напряжений растяжения. То есть вследствие электроэрозионной обработки на обработанной поверхности всегда имеется дефектный слой, снижающий эксплуатационные свойства детали. И этот слой в большинстве случаев следует удалять. Однако на толщину дефектного слоя можно влиять путем выбора способа электроэрозионной обработки и ее режимом.

3.3 Электроэрозионная обработка

3.3.1 *Электроискровая обработка* основана на использовании импульсного искрового разряда между двумя электродами, при этом катод – это всегда инструмент, а анод – обрабатываемая заготовка.

Принципиальная схема процесса показана на рисунке 13. В ванне с диэлектрической жидкостью 4, в которую осуществляется подача электролита 2 и слив электролита 5, размещены подставка-изолятор 7 и заготовка 6. Между заготовкой 6 и инструментом 3 пропускается импульсный ток напряжением от 100 до 200 В. Когда напряжение на электродах 3 и 6 достигает пробойной величины, то образуется сквозной канал проводимости, через который осуществляется искровой разряд энергии, накопленный конденсатором. Импульс продолжительностью от 20 до 200 мкс генерируется RC-генератором 1 (RC – это тип генератора, состоящий из токоограничительного резистора-R, емкости-С и источника постоянного тока).

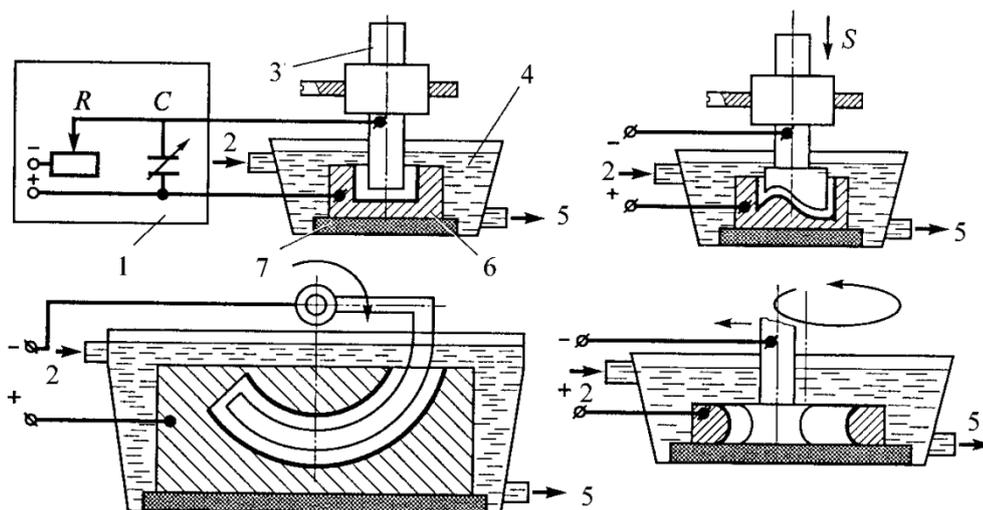


Рисунок 13 – Принципиальная схема электроискровой обработки

В качестве источника импульсов применяют специальные генераторы постоянного тока напряжением от 30 до 220 В, создающие силу тока в зарядном контуре от 1 до 5 А, тогда в разрядном контуре сила тока может достигать 100 А. Используют импульсы только одной полярности – униполярные импульсы. Применение униполярных импульсов способствует большей стойкости инструмента.

Продолжительность интервалов между импульсами подбирается такой, чтобы обеспечить деионизацию межэлектродного промежутка и удаление из него продуктов эрозии и газовых пузырьков, препятствующих повторению разряда. Поэтому частота повторения импульсов при увеличении их энергии снижается.

Материал электрода-инструмента выбирается исходя из требования высокой эрозионной стойкости. Этому требованию лучше всего отвечают красная медь, меднографитовые и углеграфитовые композиции. При обработке копированием форма электрода-инструмента должна полностью соответствовать форме обрабатываемой поверхности заготовки. При обработке отверстий и пазов размеры электрода-инструмента должны быть несколько меньше для обеспечения межэлектродного промежутка от 0,01 до 0,05 мм.

При электроискровой обработке с применением непрофилированного проволочного электрода-инструмента его материал – обычно медь, латунь или вольфрам. Проволочный электрод выполняется диаметром от 0,005 до 0,5 мм. Проволочные электроды-инструменты обычно применяются для обработки узких пазов, щелей и резки по контуру. Для устранения влияния износа инструмента на точность обработки проволока должна непрерывно перематываться с катушки на катушку.

Электроискровую обработку обычно осуществляют в ваннах, заполненных жидким диэлектриком (керосин, минеральные масла). Жидкость исключает повышенный нагрев электродов, уменьшает величину боковых разрядов между инструментом и заготовкой, что способствует повышению точности обработки. Поскольку в процессе обработки жидкий диэлектрик подвергается загрязнению продуктами электрической эрозии обрабатываемого металла, вследствие чего изменяет свои характеристики, то его нужно регулярно обновлять.

Точность электроискровой обработки, шероховатость обработанных поверхностей и производительность практически не зависят от размеров обрабатываемой поверхности, прочности и твердости обрабатываемого материала, но главным образом зависят от режима обработки. Сравнительная характеристика различных режимов обработки представлена в таблице 8.

Таблица 8 – Сравнительная характеристика различных режимов электроискровой обработки железоуглеродистых сплавов

Режим обработки	Производительность обработки, мм ³ /мин	Шероховатость поверхности Ra, мкм	Глубина дефектного слоя (структурные изменения металла), мм
Жесткий	200...400	25	0,2...0,5
Средний	50...150	1,6	0,02...0,06
Мягкий	1...20	0,8	0,003...0,02
Особо мягкий	0,01...0,1	0,4	0,002

Как правило, обработку на жестких и средних режимах ведут для получения фасонных открытых поверхностей (полости штампов), разрезания заготовок и прошивания сквозных отверстий любой поперечной формы диаметрами от 1 до 50 мм, в том числе и с криволинейной осью. Обработка на

мягких и особо мягких режимах применяется для обработки особо точных отверстий малого диаметра, а также для проведения окончательной отделки любых поверхностей с высокими требованиями к точности и качеству.

Наивысшая точность обработки достигается при работе на особо мягком режиме, она обеспечивает точность размеров по 5...9 качеству с параметром шероховатости Ra не выше 0,1 мкм.

Технологические показатели некоторых операций электроискровой обработки представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Технологические показатели некоторых операций электроискровой обработки железоуглеродистых сплавов (частота 500...5000 Гц)

Операции	Параметр шероховатости Ra, мкм	Производительность обработки, мм ³ /мин	Мощность, кВт	Напряжение, В
прошивка отверстий диаметром, мм: 1 5 20	0,1...12,5	до 20 до 150 до 1200	0,2...0,3 0,5...0,8 2,0...2,5	30...70
обработка фасонных полостей	0,8...6,3	до 4000	20...40	80...200
гравировка, маркировка	-	-	0,5...10	80...200

Электроискровой обработкой получают сквозные и глухие отверстия с любой формой поперечного сечения, отверстия с криволинейными осями, фасонные полости и фасонные поверхности, точные пазы и щели. Электроискровую обработку широко применяют для изготовления штампов, пресс-форм и режущего инструмента, деталей топливной аппаратуры двигателей, сеток, сит, для операций вырезания по контуру и точного разрезания прутковых и листовых заготовок. При изготовлении деталей машин наиболее широко применяется обработка отверстий и фасонных поверхностей. Но так как производительность электроискровой обработки значительно ниже производительности обработки резанием, то электроискровая обработка применяется тогда, когда резание либо невозможно, либо затруднительно. Кроме того, быстро разрушаются электроды-инструменты, что также удорожает обработку.

В качестве оборудования применяют специальные станки для электроискровой обработки, работающие в автоматическом или

полуавтоматическом режиме. Для работы с непрофилированными проволочными электродами выпускаются станки с программным управлением.

3.3.2 *Электроимпульсная обработка* также основана на использовании импульсного разряда, но дугового. Электроискровая обработка основана на повышенной эрозии анода при подаче импульсов малой и средней продолжительности. При импульсах большой продолжительности значительно быстрее разрушается катод. Поэтому при электроимпульсной обработке, по сравнению с электроискровой обработкой, применяется обратная полярность, т.е. электрод-инструмент – всегда анод, а обрабатываемая заготовка – катод. Применяемые импульсы тока также униполярные, однако они характеризуются большей длительностью и мощностью. Длительность импульсов от 500 до 10000 мкс (при электроискровой обработке – менее 100 мкс). Работа осуществляется преимущественно на низких напряжениях (от 25 до 30 В) и больших силах тока (от 50 до 500 А).

Принципиальная схема процесса представлена на рисунке 14. На рисунке обозначено: 1 – подача диэлектрической жидкости; 2 – инструмент; 3 – диэлектрическая жидкость; 4 – слив диэлектрической жидкости; 5 – заготовка; 6 – изолятор; 7 – электромашинный генератор или электронный генератор (электронные генераторы обеспечивают большую мощность, а значит, и более высокую производительность). Заготовку 5 размещают на изоляторе 6 в ванне с диэлектрической жидкостью 3. При такой обработке электрод-инструмент 2 изнашивается медленнее, чем при электроискровой обработке.

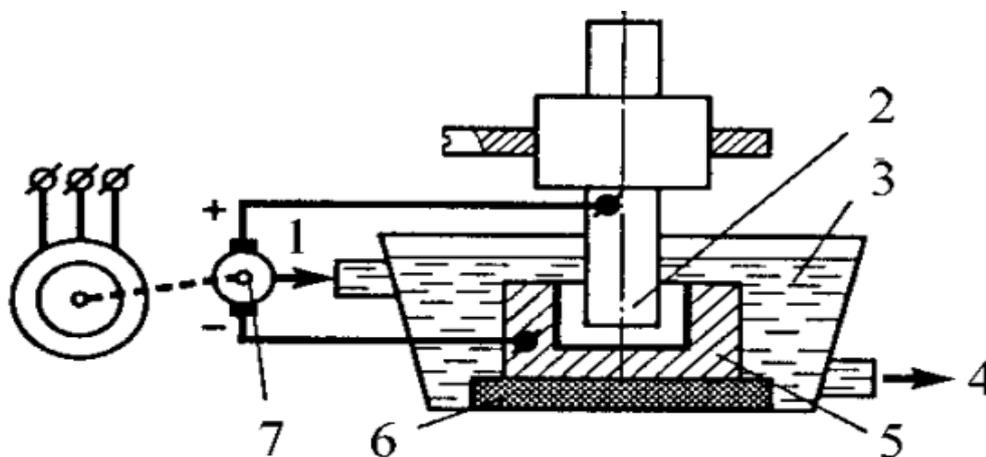


Рисунок 14 – Принципиальная схема электроимпульсной обработки

Материалы для изготовления электродов-инструментов – это, как правило, углеграфитовые композиции разных марок. Обработка ведется в ванне с диэлектрической жидкостью – обычно это минеральные масла (трансформаторное или соляровое).

Высокие мощности, реализуемые в импульсах, при снижении относительного износа инструмента способствуют высокой

производительности (производительность выше, чем при электроискровой обработке на жестких режимах), но точность и качество обработки низкое. При электроимпульсной обработке съём металла в единицу времени почти в 10 раз больше, чем при электроискровой обработке. Энергоемкость электроимпульсной обработки в 2...3 раза ниже, чем энергоемкость электроискровой обработки. Поэтому рациональная область применения электроимпульсной обработки – это обработка фасонных поверхностей больших площадей, требующих значительного съема металла. Обычно электроимпульсную обработку применяют в качестве черновой операции, обеспечивающей точность размеров по 12 качеству и грубее, с параметром шероховатости $Ra=25$ мкм и грубее, но на мягких режимах возможно достижение большей точности и качества поверхности.

При электроимпульсной обработке скорость съема металла, а значит, и производительность, зависит главным образом от силы тока. Следовательно, при черновой обработке – максимальная сила тока, при чистовой обработке силу тока ограничивают исходя из необходимого качества обрабатываемой поверхности детали. Некоторые параметры процесса электроимпульсной обработки конструкционных сталей в зависимости от силы тока представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Производительность и шероховатость обработанной поверхности при электроимпульсной обработке железоуглеродистых сплавов в зависимости от силы тока

Сила тока, А	Частота, Гц	Производительность обработки, мм ³ /мин	Наибольшая высота неровностей профиля R_{max} , мкм
50	50	90	590
50	300	5000	1250
400	50	700	280
400	300	4900	530

Для осуществления электроимпульсной обработки серийно выпускаются станки, работающие в автоматическом и полуавтоматическом режиме, а также станки с программным управлением. Обработка осуществляется как профилированным, так и непрофилированным инструментом.

3.3.3 *Высокочастотная электроимпульсная обработка* основана на использовании высокочастотных (от 150 до 1000 кГц) импульсов при малых значениях энергии разряда. В результате этого высокочастотная электроимпульсная обработка имеет производительность в 30...50 раз выше по сравнению с электроискровой обработкой, при одновременном повышении точностных параметров обработки. А достигаемый параметр шероховатости обработанной поверхности детали – $Ra=0,40$ мкм.

Принципиальная схема высокочастотной электроимпульсной обработки представлена на рисунке 15. На рисунке обозначено: 1 – подача диэлектрической жидкости; 2 – диэлектрическая жидкость; 3 – трансформатор; 4 – прерыватель тока; 5 – выпрямитель; 6 – слив диэлектрической жидкости; 7 – заготовка; 8 – инструмент. Постоянное напряжение от выпрямителя 5 разрывается прерывателем тока 4 и подается на первичную обмотку импульсного трансформатора 3. Включение заготовки и инструмента во вторичную цепь трансформатора позволяет избежать дугового разряда.

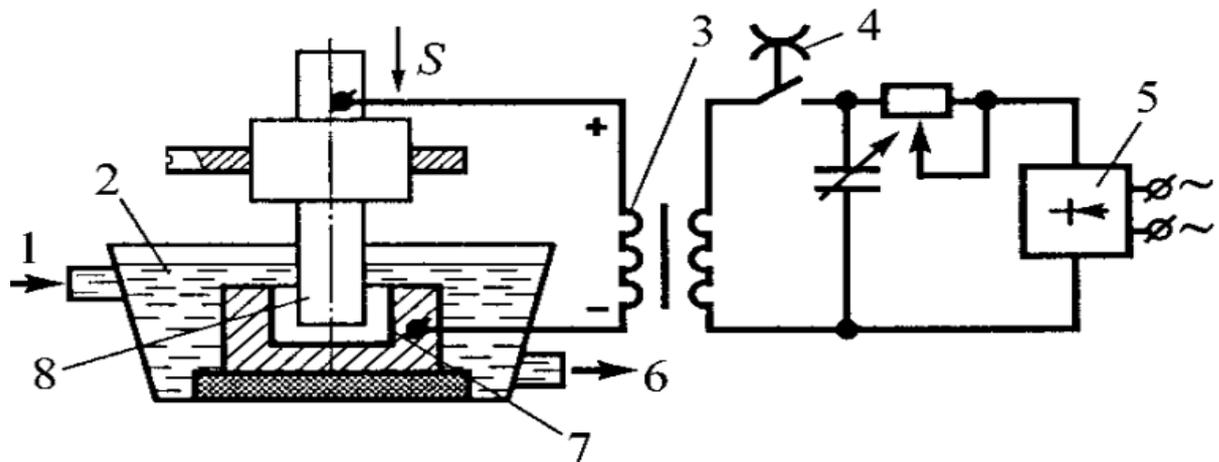


Рисунок 15 – Принципиальная схема высокочастотной электроимпульсной обработки

Высокочастотная электроимпульсная обработка обычно проводится в среде жидкого диэлектрика (трансформаторного масла или керосина), но возможно проведение процесса в слабых электролитах (растворах кислот, щелочей, солей и даже водопроводной воде), при этом производительность обработки снижается на 25...30%, но одновременно в 10...12 раз уменьшается износ электрода-инструмента.

В качестве материала инструмента при высокочастотной электроимпульсной обработке обычно используется медь, бронза, латунь, реже – серый чугун.

Некоторые параметры процесса высокочастотной электроимпульсной обработки представлены в таблице 11.

В настоящее время высокочастотная электроимпульсная обработка считается наиболее перспективным процессом эрозионной обработки, так как сочетает в себе высокую производительность и энергоэффективность с одновременным обеспечением высокой точности и качества обработки.

Таблица 11 – Производительность и шероховатость обработанной поверхности при высокочастотной электроимпульсной обработке железоуглеродистых сплавов

Частота, кГц	Сила тока, А	Производительность обработки, мм ³ /мин	Наибольшая высота неровностей профиля R _{max} , мкм
7	2	7...8	2
7	10	80	25
7	30	240	65
25	2	2...3	15
25	10	16	16
25	20	50	21

3.3.4 *Электроконтактная обработка* основана на локальном нагреве заготовки в месте контакта с электродом-инструментом и удалении размягченного или расплавленного металла из зоны обработки механическим способом за счет относительного движения заготовки и инструмента, то есть при электроконтактной обработке в одном формообразовании комбинируется электроэрозионная обработка и механическая обработка. Источником теплоты в процессе электроконтактной обработки служат импульсные дуговые разряды. В отличие от электроискровой или электроимпульсной обработки без непосредственного контакта электрода-заготовки с электродом-инструментом процесс не может быть осуществлен. Электроконтактную обработку можно проводить при постоянном и переменном токе, в воздухе или жидкости (обычно вода с антикоррозионными добавками). При обработке электрод-инструмент и заготовку полностью погружают в жидкость либо подают жидкость в зону обработки (в межэлектродный промежуток) поливом или распылением. Обработку производят при значительных токах (до 5000 А) и напряжении холостого хода источников питания от 18 до 40 В.

Основными параметрами, определяющими характер процессов, возникающих в зоне обработки, являются напряжение на электродах и давление между электродами. При низких напряжениях (до 10...12 В) и незначительных контактных давлениях (до 0,1 МПа) съем металла осуществляется за счет нагрева при прохождении тока через контактные мостики, так как дуговые разряды при разрывах контактных мостиков не возникают. При повышении контактного давления между электродами процесс начинает приближаться к фрикционно-механическому, сопровождаясь значительными деформациями поверхности обрабатываемой детали. При напряжениях от 20 до 40 В металл удаляется дуговыми разрядами; давление между электродами минимально и процесс приближается к оплавлению электрической дугой.

Электроконтактную обработку применяют для полустогового точения тел вращения, чистовой резки, прошивания цилиндрических, фасонных отверстий

и объемных полостей (только с прокачкой жидкости под высоким давлением), фрезерования, шлифования, обработки кромок листовых заготовок под сварку. Электроконтактная обработка особенно эффективна при обработке заготовок из труднообрабатываемых сталей и сплавов, а также чугунов высокой твердости, монокристаллов, материалов с высокими теплофизическими свойствами.

Инструментом-электродом чаще всего является *вращающийся чугунный или медный диск*. Скорость вращения диска от 30 до 80 м/с. Обработку ведут на переменном токе напряжением от 10 до 40 В, который через токосъемник от понижающего трансформатора подается на электрод-диск. В процессе обработки диск необходимо охлаждать. Среда реализации процесса: воздух, вода, керосин, масла.

Принципиальная схема электроконтактной обработки приведена на рисунке 16. На рисунке обозначено: 1 – обрабатываемая заготовка; 2 – инструмент; 3 – трансформатор.

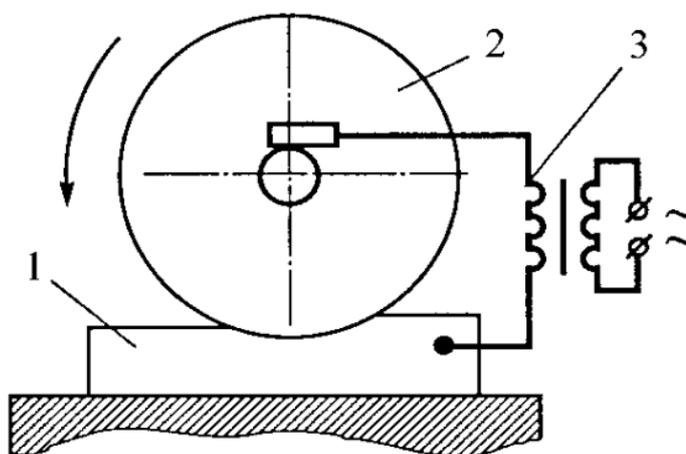


Рисунок 16 – Принципиальная схема электроконтактной обработки плоской поверхности периферией диска

Электрод-заготовка перемещается в процессе обработки в требуемом направлении, а электрод-инструмент вращается. Между электродами возникает электрическая дуга (низковольтный пробой), так как сила тока достигает от 5000 до 8000 А. Межэлектродный зазор в процессе электроконтактной обработки составляет несколько микрометров или даже долей микрометров. При сообщении электродам необходимых движений и соблюдении условий, необходимых для возникновения и развития электроэрозионных процессов, происходит съем металла с заготовки в направлении подачи.

Длительность и энергия импульса тока зависит от механических параметров. Наибольшее воздействие на протекание электроэрозионного процесса оказывает окружная скорость электрода-инструмента. А если обрабатывается тело вращения, то окружные скорости инструмента и заготовки. С увеличением окружных скоростей электродов импульсы тока становятся более кратковременными, частота их увеличивается. Для

устойчивого процесса обработки скорость электрода-инструмента не должна быть меньше определенного предела, зависящего от электрического режима. При интенсивных режимах минимальная окружная скорость в пределах от 6 до 7 м/с. Уменьшение скорости электрода-инструмента ниже этого предела ведет к резкому ухудшению всех показателей обработки, так как разряд теряет импульсный характер и приобретает свойства дуги. Верхний предел скорости электрода-инструмента ограничен удобством эксплуатации, прочностью станка и мощностью приводного двигателя.

Диск всегда работает своей периферией. Первоначальная шероховатость поверхностей диска значения не имеет, так как в процессе обработки рабочая поверхность покрывается эрозийными лунками и прочными пленками оксидов. Лунки облегчают вынос продуктов разрушения из зоны обработки, а оксидные пленки в некоторой степени упрочняют рабочую поверхность диска. В последнее время наблюдается следующая тенденция: гладкие диски применяют все реже, их вытесняют профильные диски. Гладкий диск недостаточно хорошо удаляет расплавленный металл из зоны обработки, так как между диском и обрабатываемой деталью практически нет зазора, ведь расплавленный металл выдавливается относительно равномерно во все стороны, образуя при этом наплывы. Применяемые профильные диски бывают разных конструкций, но наиболее широко применяются зубчатые диски различной формы и винтовые диски.

Полярность выбирают таким образом, чтобы наибольшая электрическая эрозия возникала бы на обрабатываемой поверхности заготовки.

По такой схеме осуществляется электроконтактная обработка на ряде заготовительных операций, таких как разрезка, обдирка сложных фасонных поверхностей, очистка от окалины поковок. Качество обработанных поверхностей низкое ($Ra \geq 50$ мкм), точность обработки не выше 11...12 квалитета. Однако из всех электрофизических способов обработки электроконтактная обработка является самой производительной и энергоэффективной. Например, производительность обработки на грубых режимах достигает $200000 \text{ мм}^3/\text{мин}$, на мягких режимах – $60 \text{ мм}^3/\text{мин}$. Процесс характеризуется наличием дефектного слоя, который может достигать 3 мм на грубых режимах, а на мягких режимах – от 0,3 до 0,5 мм.

В настоящее время данную разновидность электроконтактной обработки особенно рекомендуют для обработки крупных изделий как из конструкционных сталей и чугунов, так и труднообрабатываемых материалов.

Для осуществления электроконтактной обработки этой разновидности серийно выпускают станки, работающие в полуавтоматическом режиме. Например, станок для зачистки литейных заусенцев по всему контуру звена гусеницы трактора (трака) позволяет обрабатывать одним диском около 500000 штук траков, а используя для этой цели шлифовальный круг – всего примерно 2000 траков. При этом достигается высокая производительность при снижении себестоимости обработки в 2...3,5 раза.

Другая разновидность электроконтактной обработки, где в качестве инструмента используются *ленточные электроды*, применяется для прорезания

узких глубоких пазов и поршневых колец. При этом обеспечивается ширина реза не более 0,05 мм, с точностью размеров по 7 качеству и грубее, с параметром шероховатости $Ra \geq 6,3$ мкм. Обработка ведется на мягких режимах, поэтому производительность обработки, заметно ниже. Скорость перемещения ленточного электрода от 0,5 до 5 м/с.

Проволочные электроды можно также применять для прорезания узких глубоких пазов, но чаще их применяют для обработки по контуру фасонных поверхностей и обработки отверстий малого диаметра. При этом форма поперечного сечения отверстия может быть не только круглой. Пример, отверстие диаметром 0,15 мм на глубину 20 мм электроконтактной обработкой с помощью проволочного электрода обрабатывается приблизительно за 3,5 мин. Но с использованием обработки резанием оно вообще не может быть обработано.

В случаях обработки узких пазов и малых отверстий в качестве рабочей жидкости обычно применяют керосин. Жидкая диэлектрическая среда всегда приводит к уменьшению стойкости инструмента ($\approx 50\%$), но способствует большей точности и качеству обработки, правда, при снижении производительности.

Электромеханическое точение – еще одна разновидность электроконтактной обработки. В этом случае в качестве инструмента применяют *электрод-резец*. При электромеханическом точении в одном формообразовании комбинируется электроэрозионная обработка и обработка резанием.

Схема обработки аналогична обработке диском, но только вместо диска резец с положенными ему при точении движениями.

В этом случае, выделяющаяся в зоне резания теплота, производит расплавление и частичное испарение металла, что приводит к значительному уменьшению силы резания и способствует повышению качества обрабатываемой поверхности.

За один проход по «черной» поверхности достигается параметр шероховатости $Ra=1,6 \dots 3,2$ мкм. Характерная особенность данной разновидности способа электроконтактной обработки – значительное упрочнение обработанной поверхности (поверхностная закалка), что повышает усталостную прочность деталей, работающих при нормальной температуре. То есть электромеханическое точение вполне заменяет закалку со шлифованием.

Среди всех способов электроэрозионной обработки электроконтактная обработка значительно отстает в своем развитии. Недостаточно исследованы механизм возникновения низковольтного пробоя между электродами и механизм износа электрода-инструмента.

Основной причиной этого отставания является недостаточная исследовательская и проектно-конструкторская работа, в результате чего отсутствует серийный выпуск станков для большинства разновидностей электроконтактной обработки.

3.4 Лучевая обработка

3.4.1 *Электронно-лучевая размерная обработка* основана на превращении кинетической энергии направленного пучка электронов в тепловую энергию. Высокая плотность энергии сфокусированного электронного луча позволяет проводить размерную обработку заготовки за счет нагрева, расплавления и испарения металла с узлокального участка; возможно также осуществление сварки и термообработки.

Чтобы получить мощный поток электронов, применяют вольфрамовые или танталовые катоды, которые характеризуются высокими эмиссионными характеристиками. Кроме того, для этой цели катоды еще и специально подогреваются электрическим током. Затем электронный луч в электронной пушке, ускоряют напряжением, приложенным между катодом и анодом. Чем больше разность потенциалов между катодом и анодом, тем сложнее установка в изготовлении и эксплуатации.

Формирование электронного луча для технологических целей можно представить состоящим из следующих основных стадий:

- получение свободных электронов;
- ускорение электронов электростатическим или магнитным полем и формирование электронного пучка;
- изменение поперечного сечения электронного пучка (чаще для его фокусирования на обрабатываемой поверхности);
- отклонение электронного луча и обеспечение требуемой траектории перемещения точки его встречи с обрабатываемой поверхностью.

Для получения электронного луча и управления им применяются устройства, называемые электронными пушками.

Принципиальная схема электронной пушки представлена на рисунке 17. На рисунке обозначено: 1 – вспомогательный катод; 2 – рабочий катод; 3 – фокусирующий электрод; 4 – первая ступень вакуумирования; 5 – ускоряющий анод; 6 – фокусирующая магнитная линза; 7 – система диафрагм; 8 – вакуумный затвор; 9 – вторая ступень вакуумирования; 10 – камера вакуумного затвора; 11 – длинная магнитная линза; 12 – короткие магнитные линзы; В – водяное охлаждение; кВН – присоединение к вакуум-насосу.

Электронная пушка имеет вольфрамовый или танталовый рабочий катод в виде диска, разогреваемый вспомогательным проволочным катодом до температуры примерно 2500°C. Ускоряющее напряжение между катодом и анодом составляет обычно от 20 до 35 кВ.

Вышедший из отверстия анода электронный пучок фокусируется первой магнитной линзой, что обеспечивает его проход через камеру вакуумного затвора практически без потерь. Система диафрагм в лучевом трубе является динамическим вакуумным уплотнением, выполненным из молибденовых дисков с отверстиями. Вакуум в электронной пушке обеспечивают двумя ступенями независимой откачки, что позволяет поддерживать в камере катода

вакуум глубиной не менее 10^{-3} Па. Постоянное поддержание столь глубокого вакуума полностью устраняет пробой между катодом и анодом.

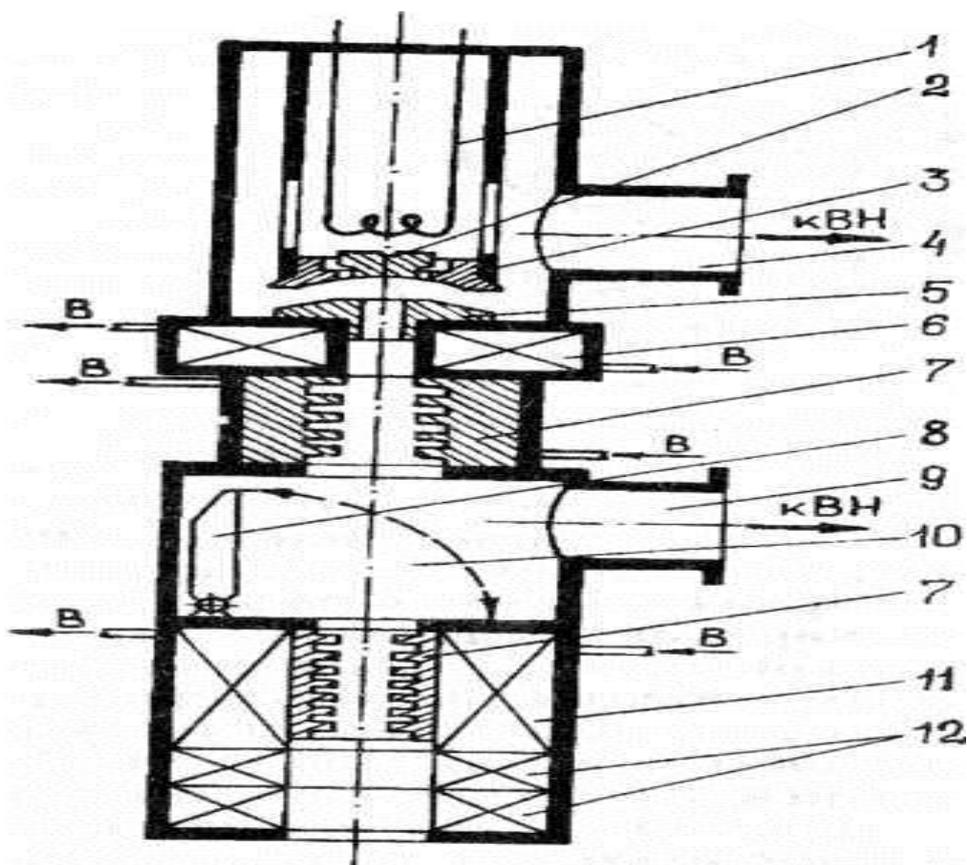


Рисунок 17 – Принципиальная схема электронной пушки

Определенную проблему представляет проведение электронного луча через длинный и узкий лучевод. Для уменьшения потерь мощности конструкция электронной пушки предусматривает дополнительное магнитное ограничение при помощи длинной магнитной катушки. Для фокусировки электронного луча на обрабатываемой поверхности детали лучевод на выходе имеет специальные короткие линзы, позволяющие получать требуемые размеры поперечного сечения луча.

В конструкцию электронной пушки обычно входит также отклоняющая система, служащая для перемещения луча по обрабатываемой поверхности детали. Электронная пушка обычно имеет две пары отклоняющих катушек, обеспечивающих перемещение луча по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Электронная пушка для размерной обработки выполняется в виде функционального блока электронно-лучевой установки, который крепится к рабочей камере, а обрабатываемая заготовка помещается в рабочую камеру, снабженную иллиминаторами для наблюдения за процессом обработки.

При малой площади обработки (менее 10×10 мм) обычно достаточно перемещения луча, а заготовка может оставаться неподвижной. При большой площади обработки заготовка, закрепленная на координатном столике, имеет возможность перемещения относительно электронного луча.

В зависимости от напряжения установки делятся на низковольтные ($U=15\dots30$ кВ), применяемые для сварки, и высоковольтные ($U=100\dots200$ кВ), применяемые для размерной обработки и микросварки. В высоковольтных установках электроны под действием ускоряющего напряжения приобретают скорость до 100000 км/с.

Электронный луч юстируют и фокусируют при помощи системы магнитных линз. Стилгатор придает лучу круглую в поперечном сечении форму, поперечное сечение луча может достигать 10^{-6} мм². Перемещает сфокусированный луч специальная отклоняющая система. Кроме того, заготовка, закрепленная на координатном столике, сама может перемещаться относительно луча. Все устройство находится в вакуумной камере, в которой глубина вакуума порядка $10^{-3}\dots10^{-4}$ Па. Энергия луча (в электрон-вольтах) пропорциональна заряду электронов, их количеству и величине ускоряющего напряжения. Энергетические характеристики электронного луча существенно зависят от его фокусировки. Например, импульс мощностью 1 кВт на поверхности диаметром 0,02 мм создает мгновенную плотность энергии $5\cdot10^6$ МВт/м² при длительности от 3 до 4 мс. При торможении электронного луча на поверхности обрабатываемой заготовки выделяется тепло. Так, за время от 10^{-5} до 10^{-6} секунд в поверхностном слое обрабатываемой заготовки температура достигает примерно 6000°C и сьем металла с обрабатываемой поверхности происходит за счет испарения и взрывного кипения. Часть электронов отражается от обрабатываемой поверхности, что снижает эффективность обработки тем больше, чем больше угол наклона электронного луча. Наибольшая эффективность достигается при направлении электронного луча перпендикулярно к обрабатываемой поверхности заготовки.

Однако локальная точечная обработка материала непрерывным потоком электронов невозможна, поскольку для быстрого испарения материала требуется нагрев до температуры, превышающей его температуру плавления, и поэтому непрерывное облучение области обработки приводит к ее перегреву и к возникновению широкой зоны оплавления. Чтобы получить точные размеры без оплавления краев, необходимо: обеспечить строгое дозирование энергии электронного луча путем импульсного действия луча на поверхность либо организуя перемещение луча по поверхности со строго заданной скоростью.

При размерной обработке заготовок установка работает в импульсном режиме, что обеспечивает локальный нагрев заготовки. В зоне обработки температура может достигать 6000°C, а на расстоянии 1 мкм от кромки луча не превышает 300°C. Продолжительность импульсов и интервалы между ними подбирают так, чтобы за один цикл успел нагреться и испариться металл только под лучом. Длительность импульсов составляет $10^{-4}\dots10^{-6}$ с, а частота – 50 ... 6000 Гц.

Таким образом, можно определить три режима размерной обработки:

- моноимпульсный. Данный режим обычно применяют для получения отверстий или перфорации, в тех случаях, когда отверстие или перфорацию получают за время одного импульса;
- многоимпульсный;

- многоимпульсный с перемещением электронного луча по заготовке с определенной скоростью.

Параметры электронно-лучевой размерной обработки связаны с физическими характеристиками материала заготовки (температурой плавления, теплоемкостью, удельной теплотой испарения, упругостью пара) и не зависят от его механических свойств (прочности, твердости, пластичности).

Образование полостей электронным лучом ведут в многоимпульсном режиме ($\tau_u = 10^{-7} \dots 10^{-3}$ с) на глубину не более 20 мм. Лучшие образцы установок позволяют при глубине обработки до 5 мм получать уклон стенок $\alpha \leq 1^\circ$.

При выполнении работ по разрезке и вырезке минимальная ширина реза может достигать 5 мкм.

Особой разновидностью размерной обработки является перфорация (получение мелких сквозных отверстий) различных материалов – металлических и керамических элементов фильтров, искусственной кожи (для воздушной проницаемости). При этом производительность составляет 10^5 отверстий в секунду. Погрешность получаемых размеров не более 5 мкм. Параметр шероховатости обработанной поверхности $Ra=0,80$ мкм.

При производстве искусственных волокон широко применяются фильеры из различных твердых сплавов, керамики, стекла. Выпускают фильеры диаметром до 30...50 мм при толщине не более 3 мм; они могут содержать до 500 отверстий. Поперечное сечение отверстий может быть разнообразным как по форме, так и по размерам. Эти отверстия получают электронно-лучевой обработкой. Размер отверстий 20 мкм и более.

Достоинство электронно-лучевой обработки – это возможность регулировать энергетические характеристики луча в широких пределах, а также легкость управления лучом при помощи отклоняющей системы.

Размерная электронно-лучевая обработка применяется при обработке отверстий диаметром от 10 до 10^3 мкм, прорезании пазов, резке заготовок, при этом ширина реза не превышает 5 мкм. Производительность обработки достаточно высокая, так, например, при получении отверстий диаметром 0,1 мм производительность достигает 10^5 отверстий в секунду. Точность получаемых размеров – 5 микрон и грубее, а параметр шероховатости обработанной поверхности $Ra=0,20 \dots 0,80$ мкм. Однако глубина отверстий, пазов или разрезаемых заготовок, как правило, не должна быть более 5 мм, т.е. способ применим только для обработки листовых заготовок или обработки отверстий и пазов на небольшую глубину. Прочность и твердость обрабатываемого материала значения не имеют. Способ применим как для обработки металлов, так и для обработки неметаллических материалов, например, керамики.

К недостаткам способа следует отнести необходимость обеспечения глубокого вакуума и сложность изготовления и эксплуатации электронно-лучевого оборудования (рентгеновское излучение). Кроме того, из-за сильного испарения катоды служат несколько десятков часов и их необходимо постоянно менять, что связано с необходимостью последующей трудоемкой настройки установки.

3.4.2 *Светолучевая (лазерная) размерная обработка* основана на тепловом воздействии светового луча высокой энергии на поверхность обрабатываемой заготовки. Съем металла с обрабатываемой поверхности происходит за счет испарения и взрывного кипения. Световой луч для технологических целей создается лазером – установкой, обеспечивающей усиление светового потока путем возбуждения эмиссии излучения. Лазеры работают в видимой части электромагнитного спектра (свет). Диапазон длин волн, генерируемых различными типами лазеров, весьма широк и составляет примерно от 0,1 до 70 мкм. Лазеры – оптические квантовые генераторы могут быть твердотельными (обычно на кристалле рубина), газовыми и полупроводниковыми. Для технологических целей обычно используют твердотельные оптические квантовые генераторы, у которых длина волны в пределах от 0,4 до 10,6 мкм. Это лазеры на кристалле рубина (окиси алюминия, активированной 0,05% хрома), дающие выходную энергию излучения до 20...40 Дж, или на стеклянных стержнях, активированных неодимом, при этом выходная энергия достигает 100...120 Дж.

Принцип действия лазера заключается в следующем. Атомы вещества могут обладать определенной энергией и удерживаться на определенных (стационарных) энергетических уровнях. Наиболее устойчивое состояние соответствует минимальной энергии. Если атому сообщить энергию извне, он перейдет на более высокую энергетическую ступень, то есть будет возбужден. Такое состояние атома неустойчиво, и если подвод энергии извне прекращается, атом возвращается в исходное состояние с эмиссией (испусканием) определенного кванта (фотона) электромагнитной энергии. Такая эмиссия называется спонтанной (самопроизвольной) и наблюдается, например, при флюоресценции, когда в результате возбуждения атомов вещества фотонами эти атомы, возвращаясь в исходное состояние, беспорядочно излучают световые фотоны. Усиление излучения в лазерах достигают за счет так называемой индуктированной (вынужденной) эмиссии.

Принципиальная схема твердотельного рубинового лазера представлена на рисунке 18. На рисунке обозначено: 1 – рубиновый стержень; 2 – посеребренный торец рубинового стержня, полностью отражающий луч; 3 – газоразрядная ксеноновая лампа; 4 – стеклянная трубка; 5 – посеребренный торец рубинового стержня, частично отражающий луч; 6 – луч; 7 – фокусирующая линза; 8 – обрабатываемая деталь; 9 – источник питания; В – подача и отвод охлаждающей воды.

Рассмотрим работу оптического квантового генератора, активным веществом которого служит рубин, то есть оксид алюминия, в котором часть атомов алюминия замещена атомами хрома. Рубиновый кристалл выращивают в специальных печах, затем полученную заготовку отжигают и обрабатывают, придавая ей форму стержня диаметром от 5 до 20 мм и длиной от 20 до 300 мм. Обычно используют бледно-розовый рубин, содержащий около 0,05% хрома.

Рубиновый лазер – наиболее распространенный тип генераторов на твердых кристаллических веществах. Лазер состоит из трех основных частей:

активного вещества, резонансной системы и системы возбуждения. Как уже отмечалось, роль активного вещества в рассматриваемой конструкции выполняет рубиновый стержень, точнее содержащиеся в нем ионы хрома.

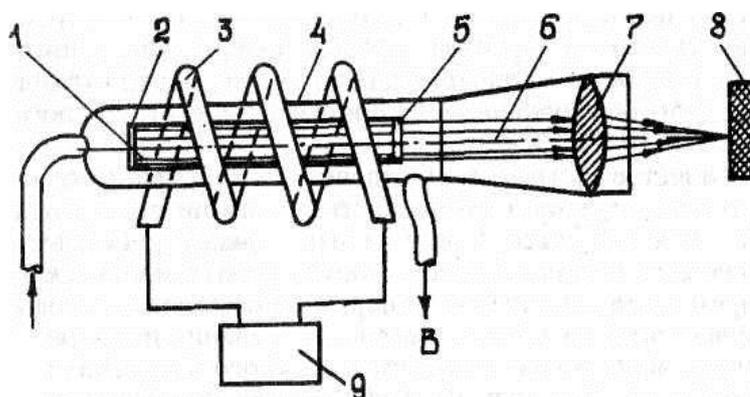


Рисунок 18 – Принципиальная схема оптического квантового генератора (рубинового лазера)

Резонансная система представляет собой две параллельные пластины с нанесенными на них отражающими покрытиями. Иногда отражающие поверхности наносят не на отдельные пластины, а непосредственно на торцы рубинового стержня (как показано на рисунке 18). Поверхность торцов серебруют, причем поверхность одного торца делают полностью отражающей, а другого – отражающей частично. Обычно коэффициент пропускания света второго торца составляет 10...25%.

В качестве системы возбуждения обычно используют ксеноновую газоразрядную лампу с источником питания. Витки этой спиральной импульсной лампы охватывают рубиновый стержень со всех сторон. Вспышка лампы длится миллисекунды. За это время лампа потребляет энергию в несколько килоджоулей, большая часть которой уходит на нагревание прибора. Другая, меньшая, часть в виде голубого и зеленого излучения поглощается рубином. Эта энергия и обеспечивает возбуждение ионов хрома.

В нормальном, невозбужденном состоянии ионы хрома находятся на нижнем энергетическом уровне. При облучении рубина светом ксеноновой лампы, содержащим зеленую часть спектра, ионы хрома возбуждаются и переходят на верхний энергетический уровень. С этого уровня часть возбужденных ионов хрома снова возвращается на нижний (основной) уровень, часть переходит на промежуточный уровень. Это так называемый безызлучательный переход, при котором ионы хрома отдают часть своей энергии кристаллической решетке в виде теплоты. Вероятность перехода с верхнего уровня на промежуточный в 200 раз больше, а с промежуточного уровня на нижний в 300 раз меньше, чем с верхнего на нижний. Это приводит к тому, что промежуточный уровень оказывается более заселенным, чем основной уровень, а это создает необходимые условия для интенсивных

индуктированных переходов. Первый же фотон, появившийся при внешнем воздействии, выбьет из соседнего атома второй фотон, далее эти два фотона выбьют еще два, после чего их будет уже четыре и т.д. Процесс нарастает практически мгновенно.

Параметры излучения регулируют с помощью вводимых в оптическую систему диафрагм с переменным диаметром отверстия, сменных светофильтров с различными коэффициентами поглощения, затворов и подобных модуляторов.

40...70% энергии, поглощенной рубиновым стержнем, идет на его нагрев. Чтобы генерация когерентного излучения не прекратилась, стержень нужно охлаждать водой, как указано на рисунке 18, воздухом или жидким азотом.

Световой луч представляется возможным сфокусировать на обрабатываемой поверхности пятном, диаметр которого обычно от 1 до 3 мкм, но всегда не более 10 мкм. При размерной обработке материалов плотность потока энергии в поперечном сечении луча при использовании фокусирующих оптических систем достигает от 10^2 до 10^3 МВт/м² и длительности импульса от 0,1 до 5 мс. Длительность импульса излучения лазера определяется длительностью разряда лампы-вспышки, оптическими свойствами активного элемента, свойствами резонатора и температурным режимом. При такой концентрации энергии лучи света, падая на обрабатываемую поверхность, мгновенно повышают температуру на ней до 5000...10000°C.

Тепловой эффект в зоне обработки возникает вследствие торможения потока фотонов в тонких поверхностных слоях материала обрабатываемой заготовки. Глубина обработки определяется в основном длительностью импульса облучения и положением фокуса управляющей линзы относительно обрабатываемой поверхности. Вследствие того, что фокус в процессе обработки может оказаться на поверхности заготовки, под поверхностью заготовки или над поверхностью заготовки, можем иметь три различных случая обработки.

При совпадении фокуса с поверхностью, при действии каждого импульса возникают две фазы – квазистатическая (как бы равновесная), характерная постепенным нагревом зоны обработки, что уменьшает прочностные связи обрабатываемого материала с основным массивом, и динамическая, заключающаяся во взрывоподобном удалении жидких и газообразных продуктов облучения из кратера.

При расположении фокуса в толще обрабатываемого материала на некоторой глубине под поверхностью образуется тепловое ядро, из которого в конце импульса через каналы проводимости вырывается расплавленный металл в виде жидкой и паровой фазы. Стенки канала истечения оказываются оплавленными.

При расположении фокального пятна над поверхностью обработки в фокальной области возникает высокотемпературная плазма, вызывающая при высоких плотностях энергии пробой газа, фронт которого распространяется к фокусирующей линзе, что приводит к поглощению части энергии. Однако

остальная часть энергии взаимодействует с верхними слоями обрабатываемой поверхности заготовки, причем, как и в предыдущих случаях, могут осуществляться квазистатическая и динамическая фазы. При значительных смещения фокуса – (более 1,5 мм) пробой газа поглощает большую часть энергии, и динамическая фаза может не возникнуть. Так, например, образование сквозных и глухих отверстий происходит по примерно одинаковой схеме – входная конусная часть отверстия возникает вследствие оплавления стенок истекающим металлом. Бочкообразная форма отверстия соответствует положению фокуса под обрабатываемой поверхностью. Действию плазмы соответствует широкий угол конуса на входной поверхности. При образовании сквозных отверстий возникает также и выходной конус.

Состояние обработанной поверхности определяется материалом обрабатываемой детали, энергетическими параметрами импульса и положением фокуса. Чем выше энергия импульса и меньше время его действия, тем выше качество обработанной поверхности. Характерные особенности макрогеометрии обработанной поверхности – это волнистость, наплывы, впадины. Микрогеометрия зависит от вида обрабатываемого материала. Для нержавеющей сталей характерна гладкая с цветами побежалости поверхность с параметром шероховатости $Ra=0,20\dots0,10$ мкм. Алюминиевые сплавы имеют оплавленную матовую поверхность с параметром шероховатости $Ra=0,80\dots0,40$ мкм. Керамика после обработки имеет слой стекловидного оплавленного материала с $Ra=0,10\dots0,05$ мкм. Однако этот слой непрочен и, скалываясь, обнажает поверхность с параметром шероховатости $Ra=0,80\dots0,40$ мкм.

При обработке отверстий вход и выход отверстий имеют шероховатость хуже почти в 2...4 раза.

Повышение качества поверхности и точности лазерной обработки может быть достигнуто как уменьшением погрешностей изготовления и наводки установки, совершенствованием процессов управления параметрами импульса, так и дополнительными операциями, например калибровкой отверстия струей сжатого воздуха или световым лучом. При этом шероховатость поверхности может быть снижена от 2 до 4 раз и уничтожаются такие погрешности, как выходной конус, и значительно уменьшаются погрешности формы поперечного сечения отверстия.

Система в обязательном порядке нуждается в охлаждении, так как при температуре выше 70°C эффективность работы лазерной установки снижается. Кроме того, КПД установок невелик, так, например, КПД твердотельных лазеров не более 1...2%. То есть стоимость и последующая эксплуатация лазеров высока, отсутствуют надежные методы управления движением луча по обрабатываемой заготовке (поэтому перемещаться должна сама заготовка), и вследствие этого размерная обработка световым лучом (лазерная обработка) в машиностроении применяется недостаточно широко.

Однако лазерная обработка имеет определенные преимущества по сравнению с электронно-лучевой обработкой. Для обработки не требуется создания вакуума, при котором значительно труднее управлять

технологическим процессом; нет рентгеновского излучения, сопутствующего обработке лучом электронной пушки; лазерные установки конструктивно проще электронных пушек; в некоторых случаях обработка заготовок может осуществляться за прозрачной преградой, например, в запаянной колбе.

Лазерную обработку применяют для обработки сквозных и глухих отверстий, прорезания пазов, разрезки заготовок на части, вырезания заданного контура детали, но только из листового материала толщиной не более 5 мм, получения отверстий малого диаметра от 20 до 30 мкм, например, для изготовления диафрагм для электронно-лучевых установок. Точность получаемых размеров 7...12 квалитет, при этом на точность существенное влияние оказывают погрешности изготовления, наводки и износ элементов оптической системы установки. Точность взаимного расположения отверстий, оцениваемая в полярных координатах, находится в пределах одной минуты. Параметр шероховатости обработанных поверхностей деталей из большинства железоуглеродистых сплавов – $Ra \geq 0,80$ мкм. Этим способом можно обрабатывать любые материалы, любой прочности и твердости.

3.4.3 *Плазменная размерная обработка* основана на том, что плазму (полностью ионизированный газ), имеющую температуру от 10000 до 20000°C, направляют на обрабатываемую поверхность заготовки. В плазмотроне вдоль электрической дуги по специальному каналу подается газ (азот, аргон, гелий, водород или их смесь), который сжимает дугу и выходит в виде плазмы с температурой от 10000 до 50000°C. Процесс плазменной размерной обработки осуществляется путем расплавления и выдувания расплавленного материала плазменной струей, имеющей скорость от 300 до 1000 м/с, и частичного испарения.

По способу нагрева газа до ионизированного состояния и получения плазмы различают плазмотроны дуговые, индукционные (высокочастотные) и электронные (сверхвысокочастотные). Проще всего газ можно нагреть до необходимых высоких температур, пропуская его через электрическую дугу. При этом можно достичь температуры плазмы порядка 10^4 К. Для размерной обработки наиболее широко применяются дуговые плазмотроны.

Принципиальная схема дугового плазмотрона представлена на рисунке 19. На рисунке обозначено: 1 – водоохлаждаемый корпус; 2 – катододержатель; 3 – катод; 4 – электроизоляционная прокладка; 5 – магнитная катушка; 6 – сопло; 7 – дуга; 8 – струя плазмы; 9 – обрабатываемая деталь; В – подача и отвод воды; ПГ – плазмообразующий газ.

Большинство дуговых плазмотронов работает на постоянном токе. Важным преимуществом плазмотронов постоянного тока по сравнению с плазмотронами переменного тока является большая стабильность горения дуги, так как при прохождении переменного тока через нуль может наблюдаться погасание дуги. Во избежание этого приходится обеспечивать напряжение холостого хода источника питания не менее чем вдвое большее рабочего напряжения дуги.

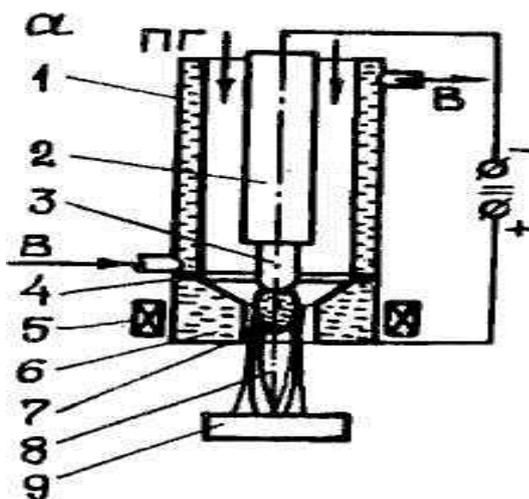


Рисунок 19 – Принципиальная схема дугового плазмотрона

Следовательно, при одинаковой мощности дуги установленная мощность источника постоянного тока меньше, чем мощность источника переменного тока. Кроме того, дугу переменного тока сжать значительно труднее, чем дугу постоянного тока.

Дуговые плазмотроны, как указано на рисунке 19, имеют только один электрод – вольфрамовый или молибденовый катод, закрепленный в водоохлаждаемом катододержателе. Вторым электродом является металл обрабатываемой детали. Для образования плазмы в кольцевой канал плазмотрона подают плазмообразующий газ, который при нагревании ионизируется. Сопло формирует направленное продольное течение плазмообразующего газа в прикатодной области и в области столба дуги.

Одним из важнейших элементов конструкции плазмотрона является узел формирования плазменной дуги. На рисунке 20 представлена принципиальная схема катодного узла плазмотрона. На рисунке обозначено: 1 – сплошной катод, 2 – водоохлаждаемое сопло, 3 – канал для подачи плазмообразующего газа, 4 – катододержатель, 5 – водяное охлаждение, В – подача и отвод воды, ПГ – плазмообразующий газ.

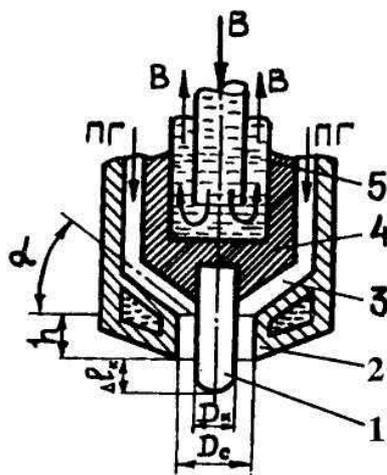


Рисунок 20 – Катодный узел плазмотрона

В зависимости от выбранного состава плазмообразующей среды струя плазмы может быть окислительной, восстановительной или нейтральной. Плазмообразующая среда может быть однокомпонентной и многокомпонентной. В качестве однокомпонентной среды применяют аргон, гелий, азот и водород. Особую ценность имеет нейтральная среда. Для ее получения применяют благородные газы аргон и гелий и лишь ограниченно – азот, так как при высокой температуре некоторые металлы образуют с азотом нитриды. Гелий же из-за его большой дефицитности в нашей стране применяют крайне редко. Поэтому для создания нейтральной плазмообразующей среды чаще всего используют аргон. К сожалению, энергетические характеристики аргоновой плазмообразующей среды невысоки (малый коэффициент теплопроводности, малая теплоемкость, невысокое значение удельной энтальпии).

При создании восстановительной плазмы используют водород. Но один водород при высоких температурах оказывает разрушающее действие на катод. Кроме того, ряд металлов образуют с водородом химические соединения – гидриды. Это ограничивает применение чистого водорода в качестве плазмообразующей среды.

Чаще всего в плазмотронах используют двухкомпонентные плазмообразующие смеси. В них один из газов, называемый рабочим компонентом, определяет технологические возможности плазмообразующей среды. А второй газ, называемый защитным компонентом, обеспечивает нормальную работу плазмотрона. В отечественном машиностроении наиболее широко используют плазмообразующие смеси из аргона и водорода, из аргона и азота.

Расход плазмообразующего газа в расчете на 100 кВт мощности плазмотрона составляет от 7 до 16 л/мин.

Плазменную размерную обработку можно осуществлять для любых материалов, как металлов, так и диэлектриков и полупроводниковых материалов, с любой прочностью и твердостью, выполняя обработку отверстий, вырезку заготовок из листового металла (толщиной до 300 мм), фасонную резку труб.

В последнее время все чаще применяют *плазменно-механическую обработку* металлов. В этом случае в одном формообразовании комбинируется плазменная обработка и обработка резанием. Сущность обработки состоит в следующем. При обработке резанием, например точением, высокопрочных или труднообрабатываемых металлов и сплавов перед резцом устанавливается плазмотрон, нагревающий зону обрабатываемого материала. При этом прочность обрабатываемого материала значительно снижается. Поэтому можно без ущерба для качества поверхности значительно увеличить глубину резания и подачу. Окисления обрабатываемой поверхности детали не происходит.

Применение плазменного нагрева при обточке цилиндрических деталей диаметром 100...350 мм из жаропрочных никелевых сплавов показало, что производительность обработки увеличивается до 8 раз при уменьшении износа резцов до 6 раз. Скорость съема металла при этом может достигать 3...4 кг/мин.

Существуют две основных разновидности плазменной резки: разделительная и поверхностная – строжка. При строгании и точении (строжка) для удаления поверхностного слоя заготовки плазменную головку ставят под углом $40^{\circ}\dots 60^{\circ}$ к обрабатываемой поверхности. Но в отечественном машиностроении наиболее широко применяют разделительную резку для разделения проката на части и резки по контуру.

Точность получаемых размеров в пределах $0,2\dots 0,5$ мм, качество обработки поверхностей с параметром шероховатости $Ra = 50$ мкм и грубее заметно ниже, чем при лазерной обработке. Стоимость плазмотрона и источников питания к нему достаточно высоки, кроме того химическое и радиационное воздействие плазменной струи, шум, свечение, наличие вредных аэрозолей и газов требуют специальных мер защиты. Поэтому плазменную размерную обработку в машиностроении применяют недостаточно широко.

3.5 Ультразвуковая обработка

Ультразвуковая размерная обработка основана на использовании энергии механических колебаний ультразвуковой частоты от 16×10^3 до 10^5 Гц для удаления припуска с заготовки и образования поверхностей детали. Разрушение поверхностного слоя заготовки происходит за счет комбинированного абразивного и кавитационного воздействия. Кавитация – это процесс захлопывания вблизи поверхности изделия пузырьков газа или пара, сопровождающийся повышением в этом месте давления или температуры и отделением вследствие этого частиц материала, разрушением поверхностного слоя. Абразивные зерна скалывают с обрабатываемой поверхности заготовки мельчайшие частицы. Ультразвуковые колебания абразивных зерен оказывают влияние на протекание технологических процессов как на макроуровне, так и на микроуровне.

В установках для ультразвуковой обработки материалов используется явление магнитострикции, то есть способности ферромагнитных материалов (никель, железоникелевые сплавы, железокобальтовые сплавы, ферриты и др.) изменять размеры поперечного сечения и длину в переменном магнитном поле. Колебания магнитострикционного сердечника возбуждает генератор ультразвуковой частоты и источник постоянного тока.

Кроме магнитострикционных преобразователей в установках для ультразвуковой обработки материалов могут применяться пьезоэлектрические преобразователи, принцип действия которых основан на пьезоэлектрическом эффекте, выражающемся в возникновении в материале деформаций под действием электрического поля. Известно много материалов, обладающих пьезоэлектрическим эффектом. Однако на практике в основном применяются кварц и пьезокерамика. Пьезоэлектрический преобразователь состоит из пластины определенной толщины, изготовленной из пьезоматериала, к плоскому торцу которого прикреплен концентратор. Через пластину пропускается ток от генератора ультразвуковой частоты. К преимуществам пьезоэлектрических преобразователей следует отнести простоту конструкции,

невысокую температуру нагрева, не требующую специального охлаждения. Однако существенными недостатками являются: малая амплитуда колебаний, небольшой срок службы, необходимость применения тока высокого напряжения. Поэтому в серийно выпускаемом оборудовании для ультразвуковой размерной обработки применяются только магнитострикционные преобразователи.

Схема установки для ультразвуковой размерной обработки (прошивание) и примеры обработки приведены на рисунке 21. На рисунке обозначено: *a* – схема установки; *б* – примеры обработки; 1 – суспензия; 2 – заготовка; 3 – ванна; 4 – пуансон; 5 – кожух; 6 – сердечник (магнитостриктор); 7 – подача охлаждающей жидкости; 8 – генератор ультразвуковой частоты; 9 – источник постоянного тока; 10 – слив охлаждающей жидкости; 11 – концентратор; 12 – насос; 13 – резервуар; D_s – движение подачи.

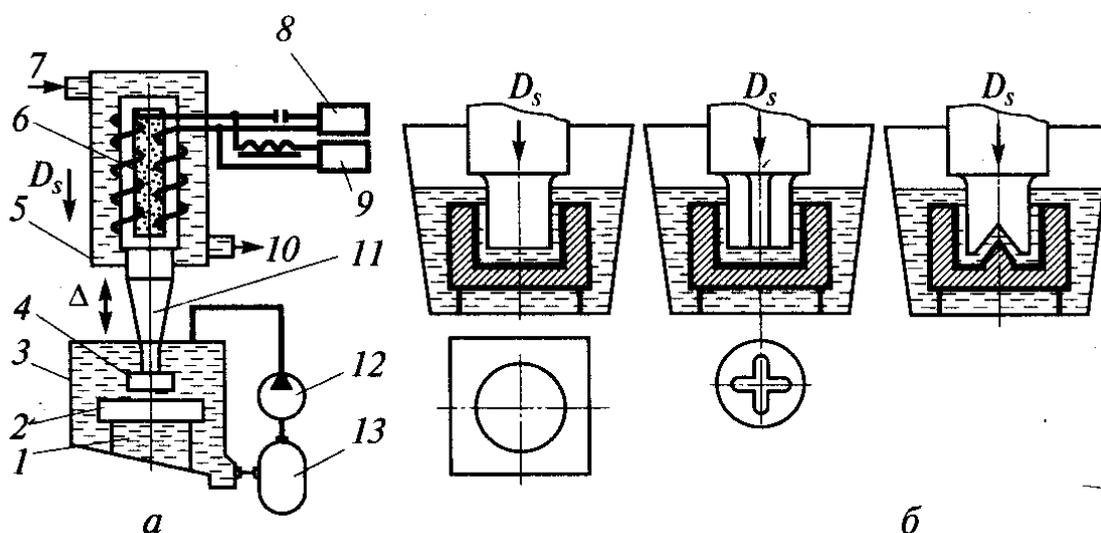


Рисунок 21 – Принципиальная схема ультразвуковой размерной обработки

При ультразвуковой обработке заготовку 2 помещают в ванну 3, заполненную абразивной суспензией 1. К заготовке подводят инструмент-пуансон 4, закрепленный на торце концентратора 11. Концентратор закреплен в магнитострикционном сердечнике 6, установленном в кожухе 5. Через кожух пропускают охлаждающую жидкость. Колебания сердечника возбуждаются с помощью генератора 8 ультразвуковой частоты (частота от 16 до 30 кГц; амплитуда колебаний от 5 до 10 мкм) и источника постоянного тока 9. Абразивную суспензию прокачивают насосом 12 через систему ванна-резервуар 13. Концентратор 11 увеличивает амплитуду колебаний до 40...60 мкм. Колебательные движения инструмента передаются абразивным зернам суспензии. В результате соударений об обрабатываемую поверхность заготовки абразивные зерна скалывают микрочастицы материала. Большое число соударений (до 30000 ударов в секунду) и кавитация обуславливают интенсивное разрушение поверхностного слоя заготовки.

Заготовки обрабатывают в ванне, заполненной суспензией, состоящей из воды и зерен абразивных материалов. Чаще всего в качестве абразивных материалов для ультразвуковой размерной обработки применяют карбид бора, карбид кремния или электрокорунд белый. Производительность обработки с применением этих абразивных материалов можно оценить соответственно как 1:0,8:0,7. Суспензию прокачивают через ванну в зазор между торцом инструмента и обрабатываемой поверхностью заготовки с целью удаления продуктов обработки и предотвращения оседания абразивных зерен.

Концентрация абразивных частиц в абразивной суспензии должна быть оптимальной, составляющей 25...50%. При увеличении концентрации свыше 50% абразивные частицы могут располагаться между обрабатываемой поверхностью детали и инструментом в несколько слоев, что приводит к значительному снижению производительности обработки. С увеличением размера абразивных зерен снижается точность и качество обработки, но производительность возрастает. Общепринятым считается, что при средних требованиях к точности и качеству обработки размер абразивных частиц должен быть на 10...20% больше амплитуды колебаний.

В качестве жидкости, несущей абразивные зерна, обычно применяется вода с добавлением ингибиторов коррозии, исключая коррозию деталей ультразвуковой установки. Признано целесообразным добавлять в воду вещества, оказывающие химическое воздействие на обрабатываемый материал. Так, например, 15% раствор сернистой меди повышает производительность в 1,5...2,5 раза при обработке нержавеющей стали.

Существует несколько технологических схем размерной ультразвуковой обработки заготовок.

1. *Размерная ультразвуковая обработка профилированным инструментом* применяется для обработки заготовок из твердых хрупких материалов абразивными зернами, движущимися за счет действия ультразвуковых колебаний инструмента.

Данный способ в основном применяется для обработки стекла, керамики, ситаллов, кремния, германия, то есть для материалов, обработка которых другими методами затруднена. На рисунке 22 представлена принципиальная схема прошивания отверстий. На рисунке обозначено: 1 – ультразвуковой преобразователь; 2 – концентратор; 3 – инструмент-пуансон; 4 – абразивная суспензия; 5 – обрабатываемая деталь; 6 – ванна; 7 – насос; 8 – патрубок; 9 – источник тока; 10 – генератор ультразвуковой частоты.

Под пуансоном-инструментом 3 устанавливают заготовку 5 и в зону обработки под давлением подают абразивную суспензию, состоящую из воды и абразивного материала.

Инструмент поджимают к заготовке с силой 1...60 Н. Обработка заключается в том, что инструмент 3, колеблющийся с ультразвуковой частотой, ударяет по зернам абразива 4, лежащим на обрабатываемой поверхности, со статической силой $P_{ст} = 30...200$ Н; абразивные зерна скалывают частицы материала заготовки 5. Большое число одновременно

ударяющихся абразивных зерен, а также высокая частота повторения ударов (до 30 тысяч раз в секунду) обуславливают интенсивный съем материала.

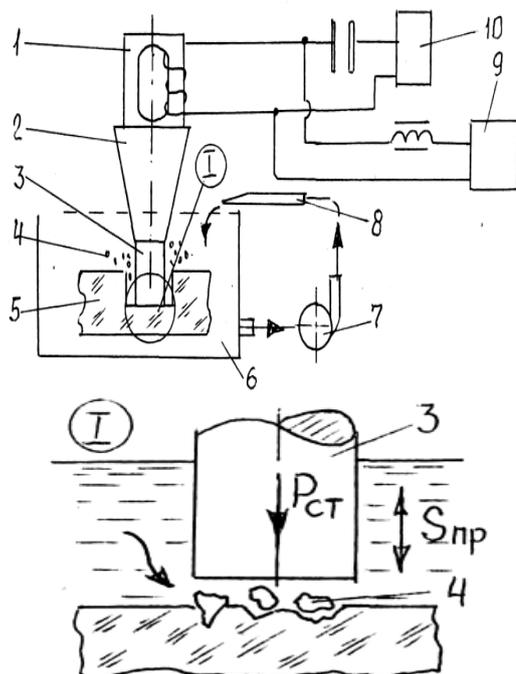


Рисунок 22 – Принципиальная схема прошивания отверстий

Кавитационные явления в жидкости способствуют интенсивному перемешиванию абразивных зерен под инструментом, замене изношенных зерен новыми, а также разрушению обрабатываемого материала.

Прокачивание суспензии насосом исключает оседание абразивного порошка на дне ванны и обеспечивает подачу в зону обработки абразивного материала. Между пуансоном и заготовкой обеспечивают постоянный зазор обычно от 50 до 100 мкм.

Сообщая инструменту и заготовке различные виды подач (продольную, поперечную) и меняя профиль сечения инструмента, можно прошивать глухие и сквозные отверстия, обрабатывать плоскости, углубления, пазы при прямом и обратном копировании, резать заготовки больших размеров, обрабатывать криволинейные и кольцевые пазы по копиру, производить шлифование и полирование.

2. *Ультразвуковая размерная обработка непрофилированным инструментом* применяется для контурного вырезания, обработки пазов и щелей, резания заготовок. Принципиальная схема резки непрофилированным инструментом – тонкой проволокой представлена на рисунке 23. На рисунке обозначено: 1 и 7 – катушки; 2 – концентратор; 3 – преобразователь; 4 – проволока-инструмент; 5 – сопло для подачи суспензии; 6 – заготовка.

Принцип работы следующий. Ультразвуковой концентратор 2, соединенный с преобразователем 3, возбуждает колебания в проволоке-инструменте 4, перематываемой с катушки 1 на катушку 7. Заготовка 6

прижимается с небольшим усилием P_{cm} к проволоке 4, а в зону их контакта подается абразивная суспензия из сопла 5.

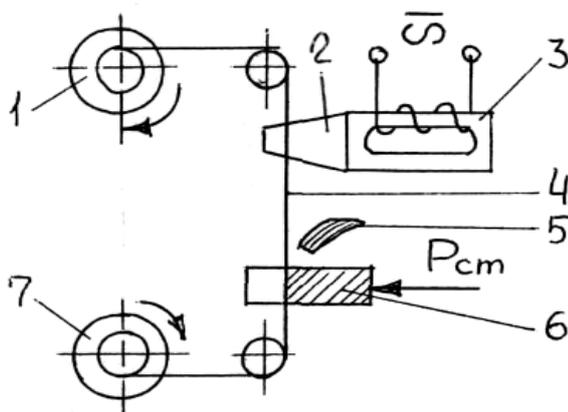


Рисунок 23 – Принципиальная схема резки непрофилированным инструментом

3. *Комбинированный способ ультразвуковой обработки*, при котором в одном формообразовании комбинируется ультразвуковая обработка и обработка резанием. Способ применяют для интенсификации процессов резания. Принципиальная схема резания лезвийным инструментом представлена на рисунке 24. На рисунке обозначено: 1 – заготовка; 2 – инструмент; 3 – концентратор; 4 – ультразвуковой преобразователь.

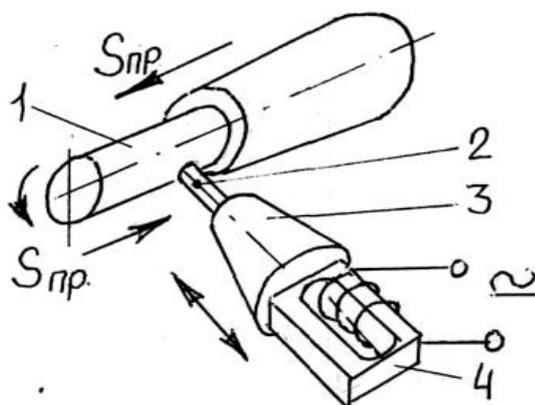


Рисунок 24 – Принципиальная схема комбинированной ультразвуковой обработки лезвийным инструментом

На режущий инструмент 2 подаются ультразвуковые колебания от концентратора 3, соединенного с ультразвуковым преобразователем 4. Режущему инструменту сообщается продольная подача. Заготовка 1 имеет продольную подачу и вращение. В место контакта инструмента и заготовки подается абразивная суспензия.

Такой способ используется при сверлении, зенкерования, развертывании, нарезании резьб, при точении и зубодолблении, при шлифовании и абразивно-

алмазной доводке деталей из труднообрабатываемых материалов. Ультразвуковая обработка позволяет повысить производительность, качество поверхностного слоя, снизить силы резания и крутящий момент. Например, при нарезании резьбы метчиками крутящий момент уменьшается на 25...50%.

Относительно высокая производительность ультразвуковой обработки, несмотря на ничтожно малую производительность каждого единичного удара, обусловлена большой частотой колебаний инструмента (от 16 до 30 тысяч ударов в секунду) и большим количеством абразивных зерен (от 20 до 100 тысяч на сантиметр квадратный), одновременно движущихся с большим ускорением и ударяющих по обрабатываемой поверхности заготовки.

Обработке поддаются хрупкие материалы типа стекла, твердых сплавов, алмазов, керамики, полупроводниковых материалов, поделочных камней, ограниченно обрабатываются закаленные, цементированные или азотированные стали. Вязкие материалы (незакаленные стали, латуни) практически не обрабатываются этим методом, так как под ударами абразивных зерен не происходит сколов, зерна вкрапливаются в обрабатываемый материал. Разные материалы имеют разную обрабатываемость ультразвуковым методом. Обрабатываемость материала в первую очередь влияет на производительность и энергозатраты процесса, а также влияет на точность и качество обработки. Относительная обрабатываемость некоторых материалов ультразвуковой размерной обработкой представлена в таблице 12.

Таблица 12 – Относительная обрабатываемость некоторых материалов ультразвуковой размерной обработкой

Материал	Обрабатываемость	Материал	Обрабатываемость
Штамповые стали 64HRC 62HRC 61HRC	1,4 2,2 3,9	Кварц (кристаллический)	45...70
Высокохромистые стали (термообработанные)	1,4	Кремний	40...75
Подшипниковая сталь (термообработанная)	1...1,2	Твердые сплавы	0,9...1,2
Нержавеющая сталь (термообработанная) типа 1X18H8 типа X3B9	2,1 1,2	Керамика	40...65
Натриевое стекло	100	Боросиликатное стекло	86
Вольфрам	4,8	Алмаз	0,5...1

В зависимости от назначения все пуансоны-инструменты, закрепляемые на концентраторе (рисунки 21, 22) для ультразвуковой обработки, подразделяются на сплошные и пустотелые.

Сплошные пуансоны-инструменты используют для получения закрытых полостей, сквозных и глухих отверстий малого диаметра (от 1 до 3 мм).

Пустотелые пуансоны-инструменты применяют при сквозной вырубке деталей из массива, обработке отверстий большого диаметра и т.д.

Промежуточной конструкцией между этими видами инструмента являются ножевые инструменты (для резки, разделки пластин на заготовки), обычно их выполняют многолезвийными.

Производительность ультразвуковой обработки зависит от физических свойств обрабатываемого материала, вида и зернистости абразивного материала, состава жидкой среды и концентрации суспензии, скорости циркуляции суспензии, амплитуды колебаний инструмента и т.д. Точность и шероховатость обработки зависят в основном от величины абразивных зерен в суспензии; с уменьшением размеров зерен точность и качество обработки повышаются (достижима точность размеров по 6 качеству с параметром шероховатости $Ra \geq 0,20$ мкм). Следует отметить, что обработанные за один переход поверхности детали имеют разную шероховатость. Шероховатость боковых поверхностей почти в 4 раза выше, чем торцовых. При обработке крупным абразивным зерном и увеличении амплитуды колебаний инструмента производительность возрастает. Так, например, при обработке кварцевого стекла максимальная производительность 20 мм/мин.

Ультразвуковая обработка приводит к упрочнению поверхностного слоя детали и образованию остаточных напряжений сжатия, повышающих усталостную прочность деталей.

Однако ультразвуковая обработка имеет существенные недостатки, сдерживающие широкое применение метода. Основными недостатками ультразвукового метода размерной обработки деталей машин являются:

1) сравнительно небольшая площадь обработки. Наибольшая площадь обработки за один переход при достаточно высокой производительности от 750 до 1000 мм²;

2) ограниченная глубина обработки (не более 25...50 мм);

3) большая энергоемкость процесса;

4) невысокая производительность и большой износ инструмента при обработке деталей из твердого сплава и закаленных сталей. Производительность ультразвуковой размерной обработки деталей из твердого сплава и закаленных сталей в 20...50 раз ниже, а износ инструмента в 20...50 раз выше, чем при обработке стекла и кварца;

5) ультразвуковая обработка возможна только для достаточно хрупких материалов. Большинство конструкционных материалов, применяемых в машиностроении, не являются достаточно хрупкими материалами.

Поэтому основная область применения ультразвуковой обработки в машиностроении в настоящее время – это ультразвуковая очистка деталей и заготовок и комбинирование ультразвуковой обработки с резанием,

электроимпульсной или анодно-механической обработкой для интенсификации технологических процессов.

3.6 Электрохимическая обработка

3.6.1 Электрохимическая обработка основана на явлении анодного растворения выступов микронеровностей на поверхности заготовок из *токопроводящих материалов при электролизе*. При прохождении постоянного электрического тока через электролит на поверхности заготовки, включенной в электрическую цепь и являющейся анодом, происходят химические реакции, и поверхностный слой металла превращается в химическое соединение. Продукты электролиза переходят в раствор или удаляются механическим путем. Производительность электрохимической обработки в основном зависит от электрохимических свойств электролита, обрабатываемого материала и плотности тока.

От состава электролита зависят его электропроводность и скорость растворения металла. Для получения высоких технологических показателей процесса необходимо, чтобы:

- а) в электролите не протекали вовсе или протекали в минимальном количестве побочные реакции, снижающие выход по току;
- б) растворение заготовки происходило только в зоне обработки;
- в) на всех участках обрабатываемой поверхности протекал расчетный ток.

Таких универсальных электролитов не существует, поэтому при подборе электролита приходится в первую очередь учитывать те требования, которые являются определяющими для данной операции.

Для увеличения скорости растворения берут электролиты с большей удельной проводимостью, а для повышения точности лучше применять электролит с пониженной проводимостью. Кроме того, электролиты всегда подбирают с учетом обрабатываемого материала.

Известно, что наибольшей электропроводностью обладают водные растворы кислот и щелочей. Однако их применение на практике весьма ограничено. Это объясняется тем, что их использование возможно лишь при наличии коррозионностойкой аппаратуры и специальных вентиляционных устройств, усложняющих и без того громоздкие установки для электрохимической обработки.

Наибольшее распространение получили электролиты – нейтральные растворы неорганических солей. Обычно для приготовления электролитов выбирают соли, растворы которых обладают достаточно высокой электропроводностью. Так, например, конструкционные стали, стали, легированные хромом, марганцем, никелем, титаном, а также значительная часть цветных металлов и сплавов хорошо обрабатываются в растворе хлористого натрия (поваренной соли) в концентрации 10...20%. А сплавы на основе алюминия, цинка и олова лучше обрабатываются в растворе азотнокислого натрия.

Водные растворы неорганических солей способны вызывать коррозию обрабатываемых деталей и деталей оборудования. Поэтому в электролит обязательно вводятся антикоррозионные добавки.

Основные способы электрохимической обработки: *электрохимическое полирование, электрохимическая размерная обработка, анодно-механическая обработка.*

На рисунке 25 показана принципиальная схема электрохимической обработки. На рисунке обозначено: *а* – электрохимическое полирование; *б* – электрохимическая размерная обработка; 1 – ванна; 2 – электролит; 3 – заготовка; 4 – подача электролита; 5 – катод; 6 – слив электролита; 7 – продукты растворения; 8 – микронеровности; 9 – отверстие.

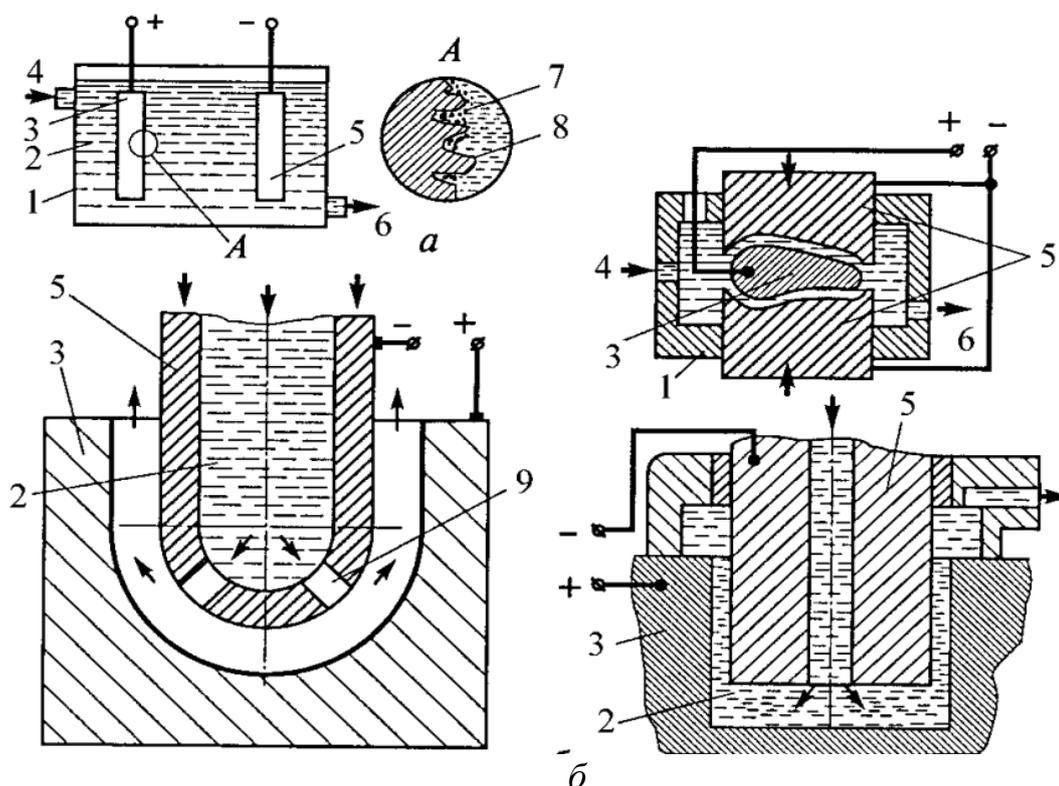


Рисунок 25 – Принципиальная схема электрохимической обработки

3.6.2 *Электрохимическое полирование* выполняется в ванне, заполненной электролитом. В зависимости от обрабатываемого материала электролитом служат растворы кислот, щелочей или солей натрия, в том числе и поваренной соли.

Согласно рисунку 25 *а* при электрохимическом полировании заготовку 3 помещают в ванну 1 с электролитом 2. Заготовку подключают к аноду, а катод 5 – это пластина. При замыкании электрической цепи начинается растворение материала анода – выступов микронеровностей 8, т.к. наибольшая плотность тока – на их вершинах. Продукты растворения 7 (окислы и соли, имеющие пониженную проводимость) заполняют впадины и препятствуют растворению металла.

Полирование, в том числе и электрохимическое, – отделочная операция, обеспечивающая высокое качество поверхностей без исправления их формы. При этом сьем металла распространяется только на поверхностные неровности, поэтому припуск на обработку очень мал – от 0,01 до 0,03 мм.

При проведении электрохимического полирования обрабатываемая заготовка – анод, инструмент – катод (пластина из свинца с сурьмой, меди, латуни, олова, нержавеющей стали или меднографитовых композиций). Для интенсификации процесса анодного растворения электролит подогревают до температуры 40...80°C.

При подаче напряжения на электроды начинается процесс анодного растворения заготовки. Процесс в основном происходит на микровыступах на поверхности заготовки. Это объясняется более высокой плотностью тока на вершинах микровыступов и заполнением микровпадины непроводящими продуктами растворения. Образующиеся при поляризации анода газы способствуют разрушению оксидных и масляных пленок, также в основном на микровыступах.

В результате избирательного растворения выступов, нежели впадин, происходит сглаживание поверхности, снижение ее шероховатости в 1,5..2 раза по сравнению с исходной шероховатостью. При этом параметр шероховатости исходной поверхности должен быть не ниже $Ra=3,2...6,3$ мкм. В результате электрохимического полирования на поверхности появляется зеркальный металлический блеск, т.е. улучшается товарный вид. Но это не главное, электрохимическое полирование приводит к улучшению физико-механических свойств. Например, у сталей, изготовленных из сплавов с высоким содержанием никеля, происходит улучшение электрических и магнитных свойств, повышается коррозионная стойкость. У всех металлов статические механические характеристики не улучшаются (кратковременная прочность и пластичность), но усталостная прочность повышается. Это объясняется следующим: в результате анодного растворения убираются дефекты предшествующей обработки (наклеп, прижоги, микротрещины, то есть концентраторы напряжений в поверхностном слое). Кроме того, вследствие электрохимического полирования существенно уменьшается коэффициент трения (в 2...2,5 раза) за счет изменения микрорельефа поверхности, даже если будет обработана лишь одна из трущихся поверхностей.

Важной особенностью электрополированных поверхностей является то, что они не имеют деформированного и разрушенного слоя, наклепа и термических напряжений. Возможно получение размеров с точностью до 0,1 мм с параметром шероховатости обработанных поверхностей $Ra=0,40...0,80$ мкм.

Электрохимическое полирование позволяет одновременно обрабатывать партию заготовок по всей поверхности. Способ применяют для обработки поверхностей деталей под гальванические покрытия. Способ электрохимического полирования позволяет обрабатывать тончайшие пленки (толщиной до 1,5 мкм), а также применяется для финишной обработки рабочей

части режущих инструментов. Однако производительность процесса не достаточно высока.

3.6.3 *Электрохимическая размерная обработка* может выполняться по двум технологическим схемам: в ванне с электролитом и в специальной камере, где струя электролита под давлением прокачивается через межэлектродный промежуток. В настоящее время вторая технологическая схема применяется шире, так как обеспечивает более высокую производительность при прочих равных условиях. Ведь струя свежего электролита непрерывно подаваемого в межэлектродный промежуток активно растворяет образующиеся соли и удаляет их из зоны обработки.

Согласно рисунку 25 б струя электролита прокачивается под давлением через межэлектродный промежуток, образуемый заготовкой 3 и катодом 5. Струя электролита также удаляет продукты электролиза из рабочей зоны. Способ позволяет одновременно обрабатывать всю поверхность заготовки, находящуюся под воздействием катода. При обработке полостей или отверстий электролит подается по сквозному или глухому центральному каналу катода через отверстие 9.

Выбор скорости потока электролита, прокачиваемого через межэлектродный промежуток, определяется в значительной мере допустимым его нагревом. Процесс протекает устойчиво, если перепад температур на входе и выходе электролита не превышает 8...10°C. Обычно в производственных условиях стремятся поддерживать температуру электролита в пределах от 17 до 37°C. При этом расход электролита должен составлять 200...300 л/мин на каждые 1000 А.

Скорость формообразования в значительной мере зависит от анодной плотности тока. Предельная плотность тока в межэлектродном промежутке лимитируется минимальным зазором, допустимым по условиям удаления гидроокиси металла, нагрева электролита и возможностью пробоя межэлектродного промежутка. При обработке небольших площадей и равномерном припуске межэлектродный промежуток принимают меньшим. При обработке больших поверхностей (более 0,5 м²) и неравномерном припуске обработку ведут с межэлектродным зазором 1...10 мм. Однако при больших межэлектродных зазорах интенсивность съема металла снижается.

При электрохимической размерной обработке одновременно обрабатывается вся поверхность заготовки, находящаяся под активным воздействием катода (возможна и двухсторонняя обработка). Участки заготовки, не нуждающиеся в обработке, изолируют.

Электроду-инструменту придают форму и размеры, зеркально отображающие получаемую поверхность заготовки с обеспечением межэлектродного промежутка обычно от 0,06 до 6 мм. Инструмент для такой обработки изготавливают из сплавов свинца с сурьмой, из меди, латуни, олова, чугуна, нержавеющей стали, но чаще – из меднографитовых композиций. Изоляцию нерабочих поверхностей электрода-инструмента осуществляют специальными пластмассами или эпоксидной смолой. В процессе

электрохимической обработки практически полностью отсутствует износ инструмента.

Электрохимическую размерную обработку применяют для обработки фасонных поверхностей, фасонных отверстий (сквозных и глухих), канавок сложной формы, а так как отсутствует давление инструмента на заготовку и не выделяется теплота, то можно обрабатывать тонкостенные заготовки, не опасаясь коробления, а также получать поверхности, свободные от микротрещин и штрихов обработки. Точность получаемых размеров поверхностей по 9...11 квалитетам с параметром шероховатости $Ra \geq 0,20$ мкм. А так как прочность и твердость обрабатываемого материала при электрохимической обработке не имеют значения, то особенно эффективно обрабатывать термообработанные металлы и сплавы, а также труднообрабатываемые сплавы. Однако некоторые металлы и сплавы, склонные к межкристаллитному растравливанию, например, титановые и никелевые сплавы, вследствие электрохимической обработки снижают механические показатели, особенно усталостную прочность. Ухудшает качество поверхностного слоя обработанных поверхностей деталей микрорастравливание по границам зерен, которое является концентратором напряжений, а выделяющийся водород приводит к охрупчиванию поверхности.

Точность и качество обработанных поверхностей зависит от очень многих факторов: точности оборудования и инструмента, колебаний режима обработки, кроме того, в результате процессов, происходящих при анодном растворении, выпадает осадок, который необходимо удалять, а также поддерживать необходимую концентрацию и чистоту электролита. Точность обработки повышается при уменьшении межэлектродного промежутка, и для его контроля используют высокочувствительные элементы, которые встраивают в следящую систему станка. Станки для электрохимической обработки, снабженные программным управлением, обеспечивают это. И поэтому, точность и качество обработки поверхностей заготовок, получаемых на оборудовании с программным управлением, выше, чем на станках с ручным управлением.

Для более полного использования преимуществ электрохимической обработки необходимо проектировать детали и технологические процессы их изготовления с учетом особенностей процесса анодного растворения металлов и сплавов. Следует учитывать, что при электрохимической обработке нет разделения на черновые и чистовые операции – при любом режиме высота неровностей соответствует чистовым операциям механической обработки, и с возрастанием скорости съема металла шероховатость поверхности уменьшается.

При использовании электрохимической обработки необходимо выполнять следующие требования, общие для всех видов заготовок и схем обработки:

а) поверхность детали перед электрохимической обработкой должна быть очищена от окалины и других неэлектропроводных веществ;

б) в местах, где удаление металла планируют выполнить электрохимической обработкой, не допускается местная зачистка поверхности, например, для контроля твердости;

в) электрохимическую обработку необходимо проводить после термической обработки заготовки. Это позволит избежать нарушения точности за счет коробления при термической обработке, предотвращает появление обезуглероженного слоя в готовой детали;

г) при проектировании заготовок припуск не может быть меньше некоторого предельного значения, определяемого с учетом возможного растворения на обрабатываемых и соседних поверхностях, где металл может раствориться за счет токов рассеяния и ускоренного съема на кромках детали;

д) в технологическом процессе не предусматривают операции и переходы по удалению заусенцев и округлению кромок на поверхностях после электрохимической обработки;

е) процесс электрохимической обработки не определяется только одними электрохимическими реакциями. Электрохимическое формообразование поверхностей складывается из большого числа взаимосвязанных процессов: электродных и гидродинамических, тепло- и массопереноса, движения ионов в электрическом поле, электрохимических реакций в потоке электролита. Перечисленные особенности сильно затрудняют не только промышленное применение процесса, но и теоретические и экспериментальные исследования.

Кроме того электрохимическая обработка очень энергоемка. Этим и объясняется неширокое применение электрохимической размерной обработки в машиностроении, но достаточно широко применяется электрохимическое удаление заусенцев на деталях, электрохимическое маркирование и клеймение деталей.

3.6.4 Анодно-механическая размерная обработка с точки зрения физической сущности процессов занимает промежуточное положение между электрофизическими и электрохимическими способами обработки. Однако ее принято считать одним из электрохимических способов обработки. Более того, согласно ныне принятой классификации способов обработки, ее следовало бы отнести к комбинированным способам обработки, при которых процесс удаления припуска происходит вследствие одновременного протекания двух или нескольких воздействий. Анодно-механическая обработка напоминает электроконтактную обработку. Но в отличие от нее анодно-механическая обработка осуществляется в жидкой токопроводящей среде (электролите).

При анодно-механической обработке процесс удаления припуска с заготовки происходит под воздействием процессов: электроэрозионного разрушения, анодного растворения и механического воздействия электрода-инструмента, которое обеспечивает удаление продуктов электролиза и образующейся при этом пассивированной анодной (силикатной) пленки, имеющей весьма большое электрическое сопротивление и высокую механическую прочность. Из-за значительной механической прочности анодной пленки инструмент должен оказывать определенное давление на нее

для удаления части образовавшейся пленки, а также прослойки электролита. Кроме того, силикатная пленка обеспечивает необходимой величины межэлектродный промежуток.

Грубые и мягкие режимы анодно-механической обработки различаются эффективностью действия электротермических и электрохимических процессов в зоне обработки. *На грубых режимах*, применяемых в основном на заготовительных операциях, при отрезке и обдирке, ориентированный съем металла вследствие сравнительно высокого напряжения и значительной силы тока между электродами осуществляется главным образом за счет электроэрозионных процессов.

Пробой анодной пленки или оплавление контактных мостиков происходит не по всей поверхности зоны обработки, а только в отдельных ее точках, соответствующих либо наиболее слабым местам пленки, либо наиболее высоким микровыступам. Остальные места остаются изолированными силикатной пленкой. На грубых режимах съем металла происходит за счет взрывоподобного расплавления, испарения и выброса металла из зоны импульсного разряда. Разряд возникает как при пробое анодной пленки под влиянием высокого напряжения (25...30 В) и плотности тока 1000...2000 мА/м², так и за счет оплавления вершин микровыступов, контактирующих с рабочей поверхностью электрода-инструмента. Точечные процессы, перекрываясь, возникают в разных точках обрабатываемой поверхности обработки.

Локализация процесса и кратковременность действия импульсов, а также влияние охлаждающего действия электролита позволяют получить обработанную при грубых режимах поверхность с меньшими структурными изменениями, нежели при электроконтактной обработке, при той же шероховатости ($Ra=12,5...25$ мкм) и производительности. Производительность процесса в пределах от 2000 до 5000 мм³/мин.

На мягких режимах обработка происходит за счет непрерывного удаления анодной пленки рабочей поверхностью инструмента и возникающего на очищенных от пленки местах процесса электролитического растворения металла заготовки. Поскольку удаление анодной пленки осуществляется по вершинам микровыступов, постольку происходит сглаживание поверхности. Обработка на мягких режимах происходит при низких напряжениях (2...6 В) и невысоких плотностях тока (0,01...0,03 мА/м²). Эрозионные процессы на мягких режимах обработки полностью отсутствуют. Параметр шероховатости обработанной поверхности достигает $Ra=0,10...0,40$ мкм. Но производительность обработки резко снижается, достигая всего 3...5 мм³/мин.

Процесс анодно-механической обработки осуществляется в среде жидкого электролита (обычно это водный раствор жидкого натриевого стекла). Обрабатываемая заготовка – анод, инструмент – катод. На рисунке 26 показаны некоторые схемы анодно-механической обработки, где обозначено: *а* – разрезание диском; *б* – точение; *в* – обработка плоскости; 1 – заготовка; 2 – электролит; 3 – инструмент.

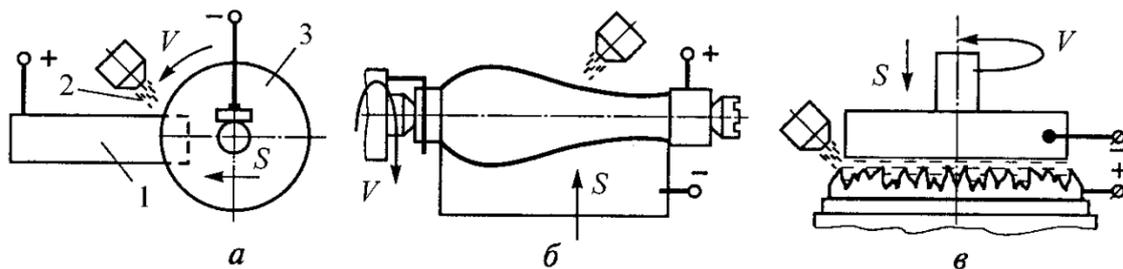


Рисунок 26 – Принципиальная схема анодно-механической обработки

Анодно-механическая обработка имеет много разновидностей (технологических схем), которые в основном определяются видом применяемого инструмента (катод-инструмент может иметь разную форму: например, в виде режущего инструмента, осуществляя электрохимическое точение, фрезерование и проч.). Но наиболее широко применяются инструменты в виде диска и в виде шлифовального круга. По схеме *a* (рисунок 26) разрезают заготовки, прорезают пазы и щели, по схеме *б* осуществляют анодно-механическое точение, при котором значительно уменьшаются силы резания и повышается стойкость инструмента. По схеме *в* полируют поверхности и затачивают режущий инструмент.

Инструмент в виде диска применяется для резки заготовок и прорезки пазов. В этом случае заготовке и инструменту сообщаются те же движения, что и при обработке резанием: главное движение – вращение диска, движение подачи – прямолинейно поступательное движение заготовки или инструмента. Инструмент-диск обычно изготавливается из малоуглеродистой стали. Диск может работать как периферией, так и торцом. Процесс осуществляется от источника постоянного тока. Разряд между электродами возникает под действием высокого напряжения от 20 до 30 В и большой плотности тока от 1000 до 2000 мА/м², то есть процесс проводят на грубых режимах. В зону обработки подводится рабочая жидкость - электролит. Процесс сопровождается интенсивным образованием искр, которые выбрасываются из зоны обработки. Эти искры представляют собой частицы расплавленного металла, окруженные оболочкой из рабочей жидкости. Ширина реза зависит от толщины электрода-инструмента и обычно составляет 1,8...2,5 этой толщины. При такой обработке механические свойства обрабатываемого металла не оказывают заметного влияния на интенсивность процесса. Но на интенсивность процесса анодно-механической обработки инструментом-диском оказывают некоторое влияние такие свойства обрабатываемого материала, как температура плавления, теплоемкость и теплопроводность.

Процесс обеспечивает точность получаемых размеров по 9 качеству и грубее. Параметр шероховатости обработанных поверхностей $Ra=12,5...25$ мкм и грубее. Применяемое оборудование – это автоматы и полуавтоматы, а также станки с программным управлением. Применяемое оборудование обеспечивает постоянство межэлектродного промежутка, обеспечивает рабочие движения и задает параметры электрического режима.

Инструмент в виде шлифовального круга или брусков для хонингования применяется для электроабразивной обработки. Инструмент-катод – шлифовальный круг выполняется на токопроводящей связке (бакелитовая связка + графитовый наполнитель, любая связка + пропитывание свинцом). Схема электроабразивной обработки представлена на рисунке 27, где обозначено: *a* – шлифование; *б* – хонингование; 1 – заготовка; 2 – инструмент; 3 – абразивные зерна; 4 – электролит; 5 – припуск под обработку; 6 – хонинговальная головка; 7 – ванна; 8 – токосъемное кольцо; 9 – стол; 10 – изолятор.

Типовая схема электроабразивного шлифования по схеме *a* (рисунок 27) следующая: торец токопроводящего круга покрыт зернами абразива (корунда).

Зерна абразива – это как бы изолирующая прокладка между анодом-заготовкой 1 и катодом-шлифовальным кругом 2.

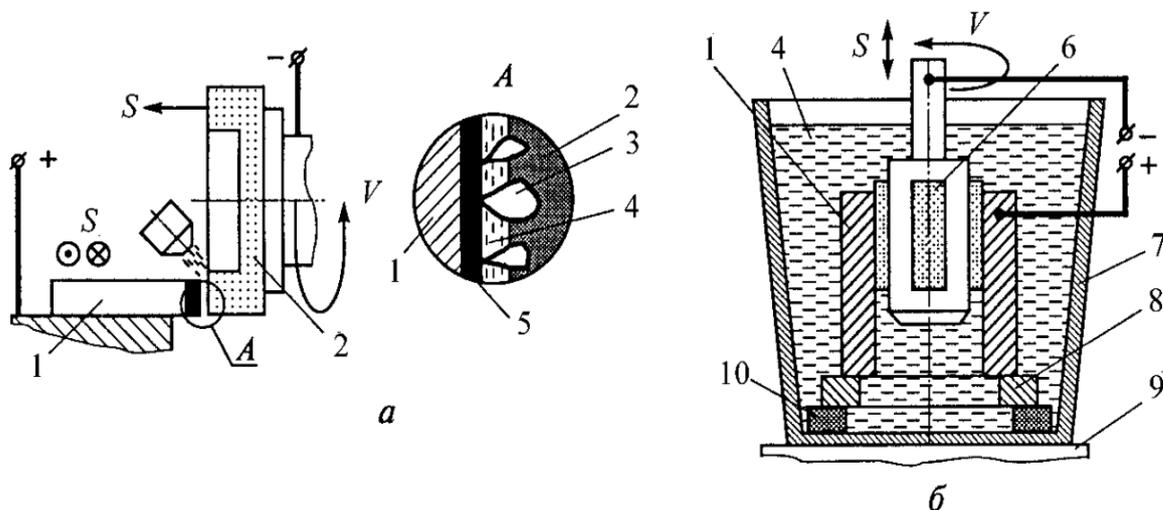


Рисунок 27 – Принципиальная схема электроабразивной обработки

Условие оптимального проведения процесса – это поддержание зазора, при котором плотность тока будет наибольшей, а короткое замыкание еще не возникает (размер межэлектродного промежутка от 0,025 до 0,030 мм). Этот зазор сохраняют выступающие из связки абразивные зерна 3 (размер зерна F30...F20, что соответствует размерам 60...80 мкм). При перемещении токопроводящего шлифовального круга (вращение и подача) производится сьем анодной пленки и некоторого количества металла заготовки. Электролит 4 подводят в зону обработки через специальное сопло в межэлектродный зазор. Интенсивность анодного растворения высока благодаря высокой плотности тока. Производительность при черновой обработке достигает от 20 до 30 мм³/мин, при этом примерно 85...90% металла снимается за счет анодного растворения, а лишь 15...10% – за счет механического действия абразива. Удаление связки при износе круга происходит само: при пробое межэлектродного промежутка в месте наименьшего зазора связка в дуге

разряда выгорает. А так как процесс имеет локальный характер и происходит в условиях охлаждения электролитом, существенного влияния на шероховатость и состояние обрабатываемой поверхности заготовки такое искрение не оказывает.

Окружная скорость шлифовального круга выбирают в пределах от 8 до 20 м/с (ниже, чем при обычном шлифовании). Электрический режим зависит от вида обработки. При черновой обработке напряжение от 20 до 25 В сила тока от 20 до 30 А. При чистовой обработке напряжение от 10 до 15 В, сила тока от 10 до 15 А. Получаемая шероховатость поверхности детали с параметром шероховатости $R_a \geq 0,10$ мкм. Оставляемый припуск на обработку обычно в пределах от 0,05 до 0,5 мм. Точность получаемых размеров поверхностей 6 квалитет и грубее.

При применении шлифовальных кругов с алмазным или эльборовым зерном достижима точность размеров по 5 квалитету с параметром шероховатости $R_a \geq 0,05$ мкм. При этом схема обработки существенно не отличается от рассмотренной выше, но окружная скорость шлифовального круга выше: 25...80 м/с, то есть повышается производительность обработки. При алмазном шлифовании зерно в круге мельче, благодаря чему плотность тока может достигать 0,6...1 МА/м², что также способствует повышению производительности. При таком шлифовании до 25% съема металла осуществляется за счет абразивного действия круга 75% – за счет анодного растворения.

При электрохонинговании по схеме б (рисунок 27) заготовку 1, установленную на токосъемное кольцо 8 и изолятор 10, помещают в ванну 7 с электролитом 4. Ванну устанавливают на стол 9 хонинговального станка. Кинематика процесса аналогична кинематике обычного хонингования. Однако хонинговальная головка б оснащена не абразивными брусками, а брусками из липы, ольхи или пластмассы. Предварительное хонингование ведут в растворе электролита NaNO_3 (натриевая селитра) с добавлением абразивного порошка зернистостью не более F60, что соответствует размерам зерна примерно 28 мкм. Окончательное хонингование ведут в том же электролите, но с добавлением оксида хрома. Способ обеспечивает малую шероховатость обработанной поверхности с параметром $R_a \geq 0,025$ мкм, зеркальный блеск и повышение производительности обработки в 3...4 раза, по сравнению с обычным хонингованием.

3.7 Выбор параметров процессов физико-химической обработки

3.7.1 При *электроэрозионной обработке* выбор режимов обработки определяется множеством факторов, но главными являются точность и качество обработанных поверхностей и требуемая производительность. Изменение производительности в зависимости от выбранных режимов обработки представлено в таблице 13.

Таблица 13 – Изменение производительности в зависимости от выбранных режимов электроэрозионной обработки

Режим обработки					Производительность, мм ³ /мин	Площадь обработки, мм ²
Частота, кГц	Рабочий ток, А	Среднее напряжение холостого хода, В	Среднее рабочее напряжение, В	Скважность		
8	40	88	30	1,6	180	1500
22	20	105	35	2,0	150	1500
66	10	135	35	3,5	128	1000
88	10	150	40	3,5	46	500
200	5	145	45	3,5	35	250

С повышением частоты импульсов и снижением рабочего тока стабильность рабочего процесса ухудшается. Это вызывает необходимость увеличить скважность импульсов. При этом *скважность импульса* – это отношение времени между двумя импульсами к времени самого импульса.

Производительность обработки можно существенно повысить, если применять принудительное удаление продуктов эрозии из межэлектродного промежутка. Для этого в межэлектродный промежуток под давлением нагнетают рабочую жидкость (керосин, минеральные масла).

Для достижения наивысшей производительности и получения требуемой точности и шероховатости обработку следует производить в несколько переходов. Сначала импульсами большой энергии удаляют основную массу металла. Затем при постепенном снижении энергии импульсов осуществляют чистовую обработку. Режимы обработки по своим технологическим показателям принято разделять на черновые, чистовые и отделочные. Диапазоны режимов, применяемых для обработки, очень широки. В таблице 14 приведены обобщенные данные о режимах электроэрозионной обработки железоуглеродистых сплавов.

Таблица 14 – Режимы электроэрозионной обработки железоуглеродистых сплавов

Режим	Импульс		Интенсивность съема металла, мм ³ /мин
	Длительность, мкс	Частота, с ⁻¹	
Черновой	100...1000	50...30000	50...1000
Чистовой	200...500	1000...10000	30...200
Отделочный	20 и менее	3000 и более	Менее 30

При электроэрозионной обработке с частотами 50...1000 Гц получают поверхности с большой шероховатостью, но при высокой производительности.

Поэтому частоты указанного диапазона используют при черновой обработке. Чистовую и отделочную обработку обычно ведут при частоте тока от 7 до 200 кГц.

Основным фактором, определяющим производительность *электроконтактной обработки*, является мощность, реализуемая в межэлектродном промежутке. С увеличением силы тока и напряжения растет скорость съема металла. Для получения оптимальных технологических показателей обработки рекомендуется выбирать напряжение в зависимости от силы рабочего тока по таблице 15.

Таблица 15 – Режимы электроконтактной обработки железоуглеродистых сплавов

Сила тока, А	100	300	500	750	1000
Напряжение в межэлектродном промежутке, В	22...24	23,5...25	24...26	24,5...27	25...28

При электроконтактном разрезании и обдирке вращающимся диском используют большие рабочие токи до 2000...3000 А. Благодаря этому обеспечивается высокая производительность до 3000000 мм³/мин.

3.7.2 Лучевая обработка

Электронно-лучевая размерная обработка в машиностроении широкого применения не имеет. Это объясняется тем, что данная технология предназначена для получения пазов, прорезей, щелей размерами от нескольких до десятков микрометров в материалах малых толщин (пленки, фольга); получение отверстий малых диаметров (до 100 мкм). При этом основные обрабатываемые материалы – это кварц, керамика, полупроводниковые материалы, специальное стекло. А в машиностроении эти материалы практически не применяются. Кроме того, существуют определенные технологические ограничения способа. Однако общие требования к электронно-лучевой обработке следующие. Установки обычно работают при высоких ускоряющих напряжениях (150 кВ и выше) и небольших токах луча (около 20 мА). Очень острая фокусировка луча на обрабатываемой поверхности позволяет получить удельную мощность в пятне порядка 5×10^6 Вт/мм².

Светолучевая (лазерная) размерная обработка применяется в машиностроении несколько шире. Причем основная область применения – это обработка отверстий и резка. Рекомендуемые режимы обработки отверстий представлены в таблице 16.

Отверстия, обработанные лучом лазера, имеют неодинаковые в продольном сечении размеры (по глубине). Можно выделить три основные зоны, отличающиеся своими размерными характеристиками: вход, средняя часть и дно.

Таблица 16 – Режимы получения отверстий на лазерных технологических установках

Материал	Толщина детали, мм	Диаметр отверстия, мм	Режим обработки				
			одноимпульсный		многоимпульсный		
			энергия импульса, Дж	время импульса, мс	энергия импульса Дж	время импульса мс	число импульсов
Сплавы на основе алюминия и меди	0,1	до 0,05	0,1...0,2	0,1...0,5	0,05	0,1	2...4
	0,5	до 0,1	0,7...1,5		0,2	0,01	4...8
	1	0,2...0,3	3,0...5,0		0,5	0,01	6...10
	5	0,5...1,0	30...100		10	0,1...0,5	5...10
Стали, железоникелевые сплавы	0,2	до 0,1	0,1...0,5	0,1...1,0	0,1	0,1	3...5
	0,6	до 0,2	0,2...1,5		0,1	0,1	5...15
	2	до 0,6	2...10		1,0	0,1...1,0	5...10
Тугоплавкие металлы и сплавы	0,1	до 0,02	0,1	0,1...1,0	0,5	0,1	5...10
	0,5	до 0,2	0,5...4,0		0,5	0,1	
	1,0	до 0,2	5,0...10		1,0	1,0	

Размеры этих зон для различных материалов неодинаковы и определяются теплофизическими свойствами материалов. Средняя часть отверстия имеет относительно цилиндрическую форму по всей глубине. Поэтому для получения цилиндрических отверстий в пластинах целесообразно применять следующий технологический прием. На заготовку накладывают пластину из того же материала, толщина которой равна величине входной зоны. В результате обработки конусная часть, образуемая вначале, оказывается на этой пластине. Удаляемые продукты также остаются на этой пластине, а основные отверстия заготовки получают нормальной цилиндрической формы. При прошивке лучом лазера сквозных отверстий они в продольном сечении всегда имеют корсетную форму. С помощью указанного технологического приема можно избавиться только от конусной части на входе.

Обработка отверстий на многоимпульсном режиме обеспечивает более точную форму в продольном сечении получаемых отверстий, при прочих равных условиях.

Производительность резки световым (лазерным) лучом можно повысить, применив газолазерную резку. В этом случае в зону резки подают газ, тип которого зависит от вида обрабатываемого материала. Поддув газа позволяет повысить скорость резки и получить более качественную поверхность. Основные характеристики процесса газолазерной резки представлены в таблице 17.

Плазменная размерная обработка в машиностроении применяется наиболее широко из всех лучевых способов обработки. В основном плазменная

обработка применяется для разрезания листового металла. Рекомендуемые режимы плазменного разрезания представлены в таблице 18.

Таблица 17 – Характеристики процесса газолазерной резки

Материал	Толщина детали, мм	Газ, подаваемый в зону обработки	Мощность лазера, Вт	Скорость резки, м/мин
Стали малоуглеродистые	1	Кислород	100	1,60
	2,5		800	1,80
Стали коррозионностойкие	0,5	Кислород	250	2,6
	1,0	Кислород	100	0,94
	9,0	Кислород	850	0,36
	0,6	Воздух	250	0,20
Титановые сплавы	0,5	Кислород	850	3,24
Керамика	6,5	Аргон	850	0,60
Кварц	1,0	Кислород	500	1,52
	1,5	Кислород	100	0,50

Таблица 18 – Режимы плазменного разрезания

Обрабатываемый материал	Толщина листа, мм	Газ, %		Расход газа, л/мин	Электрический режим			Скорость резания, м/ч
		аргон	водород или азот		ток, А	напряжение, В	мощность, кВт	
Стали	10	20	80	37	350	90	31	80
	50			200		140	49	15
	120			750		180	63	4
Алюминиевые сплавы	10	50	50	7	300	80	24	450
	50			86		130	39	35
	150			875		180	54	4

При плазменно-механической обработке высокая эффективность процесса достигается при строгом согласовании воздействия плазменной струи, осуществляемых последовательно с задержкой по времени в несколько долей секунды, и режущего инструмента на обрабатываемую поверхность детали.

Режимы плазменной струи и резания подбираются таким образом, чтобы глубина зоны интенсивного нагрева соответствовала толщине срезаемого слоя, а температура материала, формирующего поверхностный слой обрабатываемой детали, оставалась существенно ниже температуры начала структурных превращений.

Одной из особенностей плазменно-механической обработки является образование лунки на обрабатываемой поверхности. Металл из лунки выдувается потоком плазмы, при этом увеличивается глубина и площадь прогрева металла обрабатываемой детали. В то же время он должен быть таким, чтобы выдуваемый металл выбрасывался на обрабатываемую поверхность или на стружку, а не на обработанную поверхность или переднюю поверхность режущего инструмента.

При плазменно-механической обработке получается сливная шпагообразная стружка, опасная для станочника. Кроме того, поднимаясь вверх, стружка может замкнуть сопло плазмотрона, поэтому у режущего инструмента обязательно должны быть элементы стружкодробления.

Плазменно-механическая обработка экономически целесообразна для резания труднообрабатываемых материалов: высокохромистых сталей, никелевых и кобальтовых сплавов, жаропрочных и закаленных сталей. Типовые режимы плазменно-механической обработки для точения приведены в таблице 19.

Таблица 19 – Режимы плазменно-механической обработки при точении

Обрабатываемый материал	Операция	Ток, А	Напряжение, В	Скорость резания, м/мин	Подача, мм/об	Производительность, см ² /мин
Стали коррозионно-стойкие	черновая	300	90	1,5	4,0	73,2
	чистовая	170	92	6,1	1,0	32,5
Стали жаропрочные	черновая	325	95	1,6	4,0	81,5
	чистовая	240	90	3,2	2,0	32,5
Никелевые и кобальтовые сплавы	черновая	300	100	1,2	4,0	40,7
	чистовая	170	90	2,3	1,2	24,4
Жаропрочные сплавы	черновая	200	100	0,9	2,5	57
	чистовая	140	130	1,8	1,2	24,4

3.7.3 Точность и шероховатость обработанных поверхностей деталей при *ультразвуковой размерной обработке* в основном зависят от размеров абразивного зерна в суспензии. С уменьшением размеров зерна точность и качество всегда повышаются. Применение абразивного зерна с зернистостью F70...F120 позволяет получить точность размеров до 0,01 мм при шероховатости Ra=0,20...0,80 мкм. Таким образом, точность обработки на станках для размерной ультразвуковой обработки ниже, чем на электроискровых станках, где может быть достигнута точность до 0,005 мм.

Следует отметить, что при обработке отверстий и полостей шероховатость боковых поверхностей почти в 4 раза выше, чем торцовых. Это связано с особенностями движения абразивной суспензии. Боковые стенки отверстий и

полостей всегда получаются наклонными. Так, например, при обработке отверстий абразивными зернами зернистостью F12...F16 средняя конусность составляет 3...3,5°, для зернистости F36...F46 средняя конусность 1...1,5°.

На точность и качество обработанных поверхностей оказывает существенное значение и способ подачи абразивной суспензии. Некоторые показатели ультразвуковой размерной обработки в зависимости от способа подачи абразивной суспензии представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Показатели ультразвуковой размерной обработки при обработке отверстий и полостей

Способ подачи абразивной суспензии	Зернистость абразивного материала	Величина зазора со стороны входа инструмента, мм	Достигаемая точность обработки, мм	Конусность в отверстии, в минутах	Параметр шероховатости Ra, мкм (твердые сплавы, закаленные стали)
Полив Нагнетание	F16...F20	0,28...0,36	±0,04	180	3,2...1,6 0,80
		0,33...0,38	±0,025	45	
Полив Нагнетание	F30...F36	0,22...0,26	±0,02	120	1,6...0,80 0,80...0,40
		0,24...0,27	±0,015	30	
Полив Нагнетание	F46...F60	0,11...0,14	±0,015	75	0,80...0,40 0,20
		0,12...0,14	±0,010	20	

Условия подачи абразивной суспензии в рабочую зону ухудшаются при использовании инструмента с большой площадью поперечного сечения и при обработке глубоких отверстий и полостей. Через несколько секунд работы под торцом инструмента устанавливается неравномерная концентрация абразива: большинство зерен располагается у периферийной части инструмента, что приводит к неравномерному съему припуска, снижению точности обработки и снижению производительности процесса. Вакуумный отсос абразивной суспензии позволяет в значительной степени повысить производительность обработки, установив интенсивную циркуляцию абразивной суспензии, благодаря чему в зоне обработки достигается равномерная концентрация абразива и постоянное его обновление. Влияние вакуумного отсоса абразивной суспензии на производительность при обработке отверстий и полостей представлено в таблице 21.

Возможности ультразвуковой размерной обработки во многом определяются применяемым оборудованием. Зависимость диаметра, площади и глубины обработки от мощности станка для ультразвуковой обработки приведена в таблице 22.

Таблица 21 – Влияние вакуумного отсоса абразивной суспензии на производительность ультразвуковой размерной обработки

Обрабатываемый материал	Производительность, мм ³ /мин		Обрабатываемый материал	Производительность, мм ³ /мин	
	при вакуумном отсосе	без вакуумного отсоса		при вакуумном отсосе	без вакуумного отсоса
Стекло	1000	200	Керамика	250	50
Кварц	400	100	Твердые сплавы	30...40	5...7
Алмаз	30	8	Конструкционные стали (термообработанные)	8	1,8

Таблица 22 – Зависимость диаметра, площади и глубины обработки от мощности станка для ультразвуковой обработки

Выходная мощность, кВт	Наибольший диаметр сквозной обработки пустотелым инструментом	Предельный диаметр глухой обработки, мм	Оптимальная площадь обработки, мм ²	Наибольшая глубина обработки, мм
0,05...0,10	9	0,15...10	10...60	6...10
0,25	25	10...15	80...180	25
0,5...0,7	50	12...25	180...500	30...40
1,0...1,5	75	25...35	500...1000	40...50
2,0...2,5	90	35...60	1000...2200	40...50

3.7.4 При *электрохимической размерной обработке* производительность, точность и качество обработанных поверхностей зависит от очень многих факторов: точности оборудования и инструмента, колебаний режима обработки, кроме того, в результате процессов, происходящих при анодном растворении, выпадает осадок, который необходимо удалять, а также поддерживать необходимую концентрацию и чистоту электролита. Точность и производительность обработки повышаются при уменьшении межэлектродного промежутка. Качество обработанной поверхности во многом зависит от обрабатываемого материала. При обработке в электролитах на базе хлористого натрия (поваренной соли) параметры шероховатости обработанных поверхностей находятся в следующих пределах:

- конструкционные стали – Ra=0,10...0,80 мкм;
- нержавеющие стали – Ra=0,80...1,60 мкм;
- титановые сплавы – Ra=1,60...3,20 мкм;
- алюминиевые сплавы – Ra=0,80...3,2 мкм.

На технологические показатели процесса влияют и режимы обработки. Рекомендуемые режимы электрохимической размерной обработки:

- напряжение на электродах.....от 8 до 24 В
- плотность тока.....до 300 А/см²
- скорость потока электролита.....от 1 до 30 м/с
- межэлектродный промежуток.....от 0,06 до 6 мм
- давление электролита в межэлектродном промежутке.....до 5 Мпа

Высокая производительность *анодно-механической резки* может быть достигнута лишь при интенсивных электрических режимах, которые характеризуются напряжением и силой тока. Напряжение, необходимое для анодно-механической резки, составляет 20...30 В, и его выбирают в зависимости от размеров поперечного сечения заготовок. Сила тока колеблется в значительных пределах и в зависимости от размеров заготовки и интенсивности процесса может достигать даже нескольких сотен ампер. В таблице 23 приведены режимы резки заготовок разных сечений из железоуглеродистых сплавов.

Таблица 23 – Режимы анодно-механической резки заготовок из железоуглеродистых сплавов

Диаметр заготовки, мм	Напряжение, В	Сила тока, А
20	20...22	40...50
50	23...24	80...100
100	23...25	125...150
150	26...28	200...250
200	28...30	275...300

На производительность процесса резки существенно влияет скорость главного (вращательного) движения электрода-инструмента, если в качестве инструмента применяют диск. Оптимальный интервал скорости от 15 до 25 м/с. При малой скорости инструмента невелико количество электрических разрядов, а при большой скорости сокращается продолжительность их воздействия. В том и другом случаях производительность процесса резко снижается. Нормальный режим обработки предусматривает также и оптимальное давление электрода-инструмента на заготовку. Давление должно находиться в интервале от 0,08 до 0,2 МПа.

Режимы при *электроабразивной обработке* назначаются при учете следующих факторов. При увеличении анодной плотности тока интенсивность съема металла возрастает, при этом повышается шероховатость обработанных поверхностей. Поэтому процесс обработки целесообразно вести в два перехода (шлифование и доводка), отличающиеся электрическими режимами. Припуск на доводку обычно не более 0,05 мм. Рекомендуемые режимы электроабразивной обработки приведены в таблице 24.

Таблица 24 – Режимы при электроабразивной обработке заготовок из железоуглеродистых сплавов

Параметры процесса	Шлифование	Доводка
Рабочее напряжение, В	25...30	12...15
Плотность тока, А/см ²	25...30	3...5
Окружная скорость круга, м/с	15...18	15...18
Давление круга, МПа	15...20	20...25

При шлифовании кругами с алмазным зерном рабочее напряжение не должно превышать 8 В. Увеличение напряжения приводит к возникновению электроэрозионного процесса, вызывающего прижоги на обрабатываемой поверхности, что вызывает необходимость снижения окружной скорости круга.

3.8 Вопросы для самоконтроля

1. Какие методы физико-химической принято относить к электрофизическим?
2. Почему все процессы физико-химической обработки являются более энергоемкими, чем обработка резанием?
3. Что такое электрическая эрозия?
4. Почему электроэрозионную обработку предпочтительнее осуществлять в жидкой диэлектрической среде, а не в газовой?
5. Почему при электроискровой и электроимпульсной обработке применяют только униполярные импульсы постоянного тока?
6. В каких случаях при электроискровой обработке применяют непрофилированный проволочный электрод-инструмент?
7. Чем электроискровая обработка отличается от электроимпульсной? Какой процесс более энергоэффективный?
8. Какой способ электроэрозионной обработки возможно осуществлять как в среде жидкого диэлектрика, так и в среде слабого электролита?
9. Какая технологическая схема электроконтактной обработки применяется наиболее широко? Почему?
10. Какой процесс лучевой размерной обработки применяется наиболее широко в машиностроении?
11. Какой из процессов лучевой размерной обработки сопровождается рентгеновским излучением?
12. Какой из процессов лучевой размерной обработки осуществляется только в вакууме?
13. Какие тепловые процессы имеют место при различных положениях фокуса светового (лазерного) луча относительно обрабатываемой поверхности?
14. Что является инструментом при размерной плазменной обработке?
15. Для каких материалов экономически целесообразна плазменно-механическая обработка?

16. Какие материалы можно обрабатывать ультразвуковой размерной обработкой?

17. Какие виды работ можно выполнять ультразвуковой размерной обработкой?

18. Почему в серийно выпускаемом оборудовании для ультразвуковой размерной обработки применяются магнитострикционные преобразователи, а не пьезоэлектрические, которые являются более дешевыми?

19. Почему детали, подвергшиеся электрохимическому полированию, имеют более высокую усталостную прочность?

20. Какая из схем электрохимической размерной обработки применяется наиболее широко: обработка в ванне с электролитом или в специальной камере, где струя электролита под давлением прокачивается через межэлектродный промежуток?

21. Каким образом при электроабразивной обработке обеспечивается поддержание межэлектродного промежутка, при котором плотность тока будет наибольшей, а короткое замыкание еще не возникает?

22. Какие процессы электрохимической обработки применяются наиболее широко в машиностроении? Почему?

23. Какие требования предъявляются к электролиту при электрохимической обработке?

24. Каков механизм съема металла с обрабатываемой поверхности детали при анодно-механической обработке на грубых и на мягких режимах?

25. За счет чего обеспечивается более высокая точность и качество обработанной поверхности при электроабразивной обработке с применением шлифовального круга с алмазным зерном?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов О.В. Ультразвуковая обработка материалов [Текст] / О.В. Абрамов, И.Г. Хорбенко, Ш. Швегла; под общ. ред. О.В. Абрамова. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
2. Аренков А.Б. Основы электрофизических методов обработки материалов [Текст] / А.Б. Аренков. – Л.: Машиностроение, 1967. – 371 с.
3. Бирюков Б.Н. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки [Текст] / Б.Н. Бирюков. – М.: Машиностроение, 1981. – 128с.
4. Железнов Г.С., Схиртладзе А.Г. Процессы механической и физико-химической обработки материалов [Текст]: учебник / Г.С. Железнов, А.Г. Схиртладзе. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 456 с.
5. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием [Текст]: справочник / Л.Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
6. Материаловедение и технология конструкционных материалов [Текст]: учебник для вузов / [В.Б. Арзамасов, А.Н. Волчков, В.А. Головин и др.]; под ред. В.Б. Арзамасова, А.А. Черепихина. М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 448 с.
7. Материаловедение и технология конструкционных материалов [Текст]: учебник / [О.С. Комаров, В.Н. Ковалевский, Л.Ф. Керженцева и др.]; под общ. ред. О.С. Комарова. Мн.: Новое знание, 2009. – 671 с.
8. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием [Текст] / Д.Д. Папшев. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
9. Попилов Л.Я. Основы электротехнологии и новые ее разновидности [Текст] / Л.Я. Попилов. – Л.: Машиностроение, 1971. – 216 с.
10. Попилов Л.Я. Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов [Текст] / Л.Я. Попилов. – Л.: Машиностроение, 1971. – 544 с.
11. Проскураков Ю.Г. Упрочняюще-калибрующие методы обработки [Текст]: справочное пособие / Ю.Г. Проскураков. – М.: Машиностроение, 1965. – 206 с.
12. Рыкалин Н.Н. Основы электронно-лучевой обработки материалов [Текст] / Н.Н. Рыкалин, И.В. Зуев, А.А. Углов. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
13. Технология конструкционных материалов [Текст]: учеб. для вузов / А.М. Дальский [и др.]; под общ. ред. А.М. Дальского. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 448 с.
14. Электрохимическая обработка металлов [Текст] / И.И. Мороз [и др.]. – М.: Машиностроение, 1969. – 208 с.

Попова Валентина Владимировна

**ПОВЕРХНОСТНОЕ ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ
И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА**

Учебное пособие по дисциплине
«Процессы и операции формообразования»
для студентов всех форм обучения направления подготовки 151900
«Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств»

Редактор Е.Ф. Изотова

Подписано в печать 25.10.13. Формат 60x84 /16.
Усл. печ. л. 6,13. Тираж 30 экз. Заказ 13 1213. Рег. №65.

Отпечатано в РИО Рубцовского индустриального института
658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6.