

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

*Н.Д. ПРОНИЧЕВ, А.П. ШУЛЕПОВ,
К.П. КРАШЕНИННИКОВ*

СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ ГТД

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве лабораторного практикума*

САМАРА
Издательство СГАУ
2006

УДК 621.45.0.002.2 (0.75.8)

ББК 39.55

С 718



**Инновационная образовательная программа
"Развитие центра компетенции и подготовка
специалистов мирового уровня в области
аэрокосмических и геоинформационных
технологий"**

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В. Н. Трусов
канд. техн. наук В.Н. Дмитриев

Проничев Н.Д.
С 718 **Специальные методы обработки и обеспечение ресурса
деталей ГТД:** лабораторный практикум / Н.Д. Проничев,
А.П. Шулепов, К.П. Крашенинников, Г.В. Смирнов,
В.Н. Бородин – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та,
2006. – с.: ил.

ISBN 5-7883-0451-2

Лабораторный практикум составлен в соответствии с программой курса «Технология производства АД и ЭУ». В него включены 8 работ, отражающих вопросы изучения влияния упрочняющих методов (алмазное выглаживание, обкатывание роликом, дорнование, шлифование) и электрических методов (электрохимическая, электроэрозионная, ультразвуковая) на параметры качества поверхностного слоя при обработке и соответствующего их влияния на эксплуатационные характеристики деталей.

Предназначен для студентов, обучающихся по специальностям «Авиационные двигатели и энергетические установки», «Экономика и управление на предприятиях машиностроения»

УДК 621.45.0.002.2 (0.75.8)

ББК 39.55

ISBN 5-7883-0451-2

© Проничев Н.Д., Шулепов А.П.,
Крашенинников К.П., Смирнов
Г.В., Бородин В.Н., 2006

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2006

ПРЕДИСЛОВИЕ

Качество любого изделия определяется его техническим совершенством и надежностью. Надежность – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, которые определяют его способность выполнять требуемые функции, если соблюдаются расчетные режимы работы и необходимые условия обслуживания.

Такой совершенный в техническом отношении объект, как двигатель летательного аппарата (ДЛА), предназначен для работы на режимах вблизи предельных границ устойчивости и прочности. Сложность выполнения этих условий усугубляется необходимостью обеспечить высокую эффективность и надежность конструкции в широком диапазоне изменения условий эксплуатации. Это достигается тщательной и всесторонней оценкой надежности при разработке и доводке ДЛА в ходе соответствующих испытаний как отдельных его частей, так и в процессе его серийного производства, причем идет непрерывный поиск технологических средств и методов, направленных на постоянное повышение надежности. К таким методам относится, например, упрочняющая обработка, которая существенно увеличивает усталостную прочность деталей. Постоянное внимание оценке надежности уделяется и в период эксплуатации двигателя, которая дает в руки исследователей большой статистический материал.

Лабораторные работы, касающиеся методов поверхностного пластического деформирования (алмазное выглаживание,

дорнование, обкатывание роликом), посвящены исследованиям, связанным с качеством поверхностного слоя при обработке и его влиянием на эксплуатационные характеристики деталей. Лабораторная работа по выявлению шлифовочных прижогов связана с проявлением технологической наследственности при изготовлении деталей и ее негативным влиянием на ресурс.

Физико-химическая обработка материалов (ФХОМ) – это группа методов, способов и технологий обработки изделий, основанных на немеханическом воздействии на материал, получивших развитие и широкое промышленное применение во второй половине XX века для решения наиболее сложных технологических задач создания и производства новой, в том числе авиационной техники. В большинстве случаев для их реализации используются пространственно локализованные электромагнитные поля с высокой плотностью потока мощности. Поэтому их часто называют электрическими методами обработки.

Вторая половина лабораторного практикума посвящена изучению закономерностей съема металла и технологических характеристик таких электрических методов обработки, как электрохимическая, электроэрозионная, ультразвуковая.

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ ГТД В ПРОЦЕССЕ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Цель работы: оценить, как должна изменяться долговечность работы детали при формировании поверхностного слоя методом алмазного выглаживания.

Оборудование, инструменты и заготовки, необходимые для работы: токарно-винторезный станок, прибор для измерения микротвердости ПМТ – 3, прибор для измерения шероховатости и записи профилограммы (профилограф – профилометр модели 252), инструмент для алмазного выглаживания, образцы цилиндрической формы.

Краткие теоретические сведения

Слой металла с измененными физико-механическими свойствами, структурой, фазовым и химическим составом называется поверхностным слоем (ПС). Оптимальные свойства ПС определяются комплексом параметров, которые зависят от условий эксплуатации деталей.

Условно параметры качества поверхностного слоя будем классифицировать следующим образом:

- а) геометрические параметры ПС;
- б) физико-химическое состояние ПС (включая показатели степени деформации зерен, деформационного упрочнения и др.);
- в) остаточные напряжения.

ПС оказывает существенное влияние на надежность и долговечность работы детали, узла и машины в целом.

В данной лабораторной работе исследуется влияние микрогеометрии ПС и деформационного упрочнения (наклепа) и остаточных напряжений на усталостную прочность образцов из хромоникелевой стали.

Микрогеометрия поверхностного слоя.

Влияние шероховатости поверхности на усталостность металла достаточно глубоко изучено. Шероховатость поверхности – это технологический концентратор напряжений, поэтому она снижает прочностные характеристики металла независимо от вида напряженного состояния и температуры нагрева. Влияние шероховатости на сопротивление усталости обычно оценивается различными коэффициентами концентрации напряжений, связанными с геометрическими параметрами микронеровностей поверхности.

Теоретическая зависимость между коэффициентом концентрации напряжений α_σ и геометрическими параметрами мелких выточек (рисок), многократно повторяющихся на поверхности детали, была установлена Г.Нейбером. В этом случае теоретический коэффициент концентрации напряжений можно определить по формулам:

а) при кручении и сдвиге

$$\alpha_\sigma = 1 + \sqrt{\gamma \cdot \frac{R_z}{r}}, \quad (1)$$

б) при растяжении и изгибе

$$\alpha_\sigma = 1 + 2 \cdot \sqrt{\gamma \cdot \frac{R_z}{r}}, \quad (2)$$

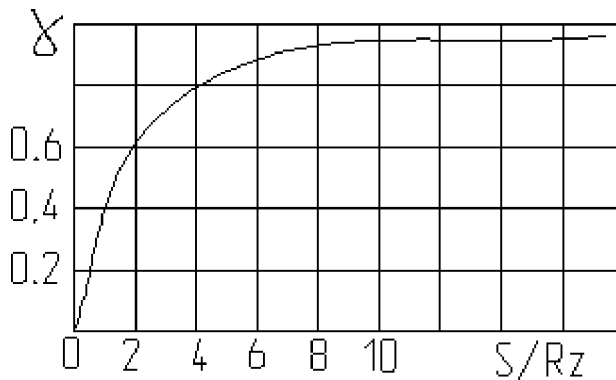


Рис. 1. Зависимость γ от отношения шага микронеровностей к их высоте

где γ - коэффициент разгрузки, зависящий от отношения шага неровностей S к их высоте R_x (определяются по графику, рис. 1); r - радиус кривизны на дне впадины.

Используя коэффициент чувствительности металла к концентрации напряжений q_σ , можно приблизительно оценить эффективные коэффициенты концентрации напряжений, обусловленные микронеровностями на поверхности детали.

Для малых радиусов закруглений по дну микронеровностей можно принять $q_\sigma = 0,1 \dots 0,2$ (большие значения для легированных сталей). Эффективные коэффициенты концентрации напряжений могут быть вычислены по формуле

$$K_\sigma = 1 + q_\sigma \cdot (\alpha_\sigma - 1). \quad (3)$$

Значения K_σ для легированных сталей будут более высокими по сравнению с углеродистыми сталями из-за их большой чувствительности к концентрации напряжений.

Величину усталостной прочности материала после выглаживания с учетом полученного профиля шероховатости можно определить по формуле

$$\sigma'_{-1\text{выгл}} = \sigma_{-1\text{исх}} \cdot \frac{K_{\text{ОИСК}}}{K_{\text{СВЫГЛ}}} \quad (4)$$

Деформационное упрочнение (наклеп)

Наклеп – это повышение сопротивления пластическому деформированию при увеличении степени самой пластической деформации.

В чем физическая сущность этого явления? Если произвести расчет напряжений, возникающих при сдвиге одной части кристалла по отношению к другой, считая, что смещаются одновременно все атомы в плоскости скольжения, то полученные значения напряжений будут приблизительно на три порядка выше, чем реальная прочность кристалла. В реальном кристалле деформация распространяется постепенно (т.е. межатомные плоскости «разрываются» как бы одна за другой, а не одновременно), что обусловлено наличием дефектов кристаллической решетки, которые называются дислокациями.

Дислокация – это линейный дефект кристаллической решетки, нарушающий правильное чередование атомных плоскостей. Один из видов (краевая дислокация) показан на рис. 2.

Таким образом, дислокации являются носителями пластичности металла. В недеформированном металле при обычных условиях плотность дислокаций около $10^6 \dots 10^8$ см в 1 см^3 , после пластического деформирования (наклепа) плотность дислокаций может составлять $\rho = 10^{12} \dots 10^{14}$ см на 1 см^3 (в кусочке сильнодеформированного металла размером с булавочную головку суммарная длина дислокационных линий превышает расстояние от Земли до Луны).

Как снизить пластичность металла и повысить его прочность?

1. Создать кристалл, в котором нет дислокаций. Такие кристаллы – «усы» уже находят применение в технике, их прочность приближается к теоретически возможной.

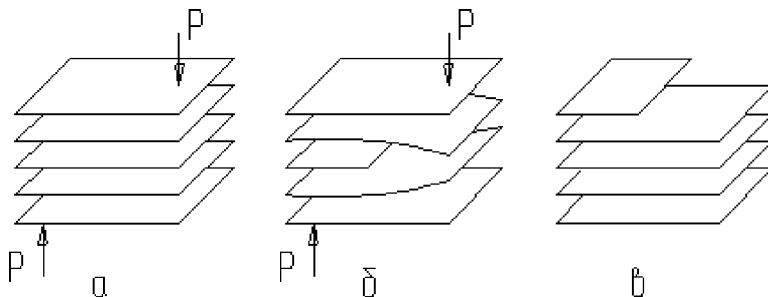


Рис. 2. Схема строения кристалла, показанная в виде набора межатомных плоскостей: а – идеальный кристалл до деформации; б – кристалл с краевой дислокацией до деформации; в – кристалл с краевой дислокацией после деформации (дислокация вышла на поверхность)

2. Увеличить количество дислокаций в металле до оптимального значения, чтобы затруднить движение дислокаций (они формируются в различных плоскостях и начинают взаимодействовать между собой). При этом металл становится тверже, прочнее, но одновременно и более хрупким. Перенаклеп приводит к отслоению металла.

Величина поверхностного наклепа U_H оценивается повышением микротвердости поверхностного слоя H_{μ} :

$$U_H = \frac{H_{\mu_{\max}} - H_{\mu_{исх}}}{H_{\mu_{исх}}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где U_H - степень наклепа, %; $H_{\mu_{\max}}$ – микротвердость на поверхности после упрочнения и $H_{\mu_{исх}}$ – исходная микротвердость ненаклепанного образца.

Кроме того, важным параметром, характеризующим наклеп, является глубина наклепанного слоя h_H . Экспериментально установлено, что для каждого металла или сплава и заданных условий эксплуатации существует определенная степень предварительной деформации, создающая субструктуру металла с такой скрытой энергией наклепа, которая обеспечивает минимальную скорость процессов разупрочнения, а значит и наибольшую прочность. Следовательно, для определенных условий (среда, температура, нагрузка, время работы) существует оптимальная степень предварительной деформации, обеспечивающая максимальную усталостную прочность, которая может быть определена экспериментально.

Остаточные напряжения

Остаточными принято называть такие напряжения, которые существуют и уравниваются внутри твердого тела после устранения причин, вызвавших их появление.

Их можно классифицировать по протяженности силового поля:

1. Напряжения 1-го рода, или макронапряжения, охватывающие область, соизмеримую с размерами детали.

2. Напряжения 2-го рода, или микронапряжения, распространяются на отдельные зерна деталей или группу зерен.

3. Напряжения 3-го рода – субмикроскопические, относящиеся к положениям кристаллической решетки. В этом случае более подходит термин «статические искажения решетки» или «искажения 3-го рода».

Образование остаточных напряжений всегда связано с неоднородными линейными или объемными деформациями в смежных объемах материала детали. Неоднородное деформированное состояние детали может возникнуть:

а) после неоднородной пластической деформации (прокатка, волочение, резание, а также нагрев и охлаждение);

б) вследствие неоднородного изменения объема при фазовых превращениях.

В реальных условиях остаточные напряжения обычно возникают при одновременном действии различных факторов.

Напряженное состояние поверхностного слоя детали может характеризоваться наличием как сжимающих, так и растягивающих напряжений, максимальное значение которых не всегда имеет место на поверхности, а смещается в глубь поверхностного слоя.

Основными причинами возникновения макронапряжений являются неоднородность пластической деформации и локальный нагрев металла, а при наличии структурных превращений – разность объемов возникающих структур. Реальное распределение макронапряжений в поверхностном слое обычно объясняют действием двух факторов – механического (пластической деформации), обеспечивающего чаще всего формирование сжимающих напряжений, и теплового (нагрева поверхностного слоя), являющегося причиной образования растягивающих напряжений.

Влияние остаточных напряжений на характеристики прочности металлов надо рассматривать через их влияние на сопротивление упругой и пластической деформации и на сопротивление разрушению.

Если результирующее напряженное состояние от наложения остаточных напряжений на рабочие нагрузки соответствует пластическому состоянию металла, или макроскопические деформации являются допустимыми, то остаточные напряжения мало или вообще не влияют на прочность материала.

Если же пластические деформации ограничены, а напряжения не превышают предела упругости, то остаточные напряжения, суммируясь с любыми другими, могут сильно влиять на прочность.

На статическую прочность пластических материалов остаточные напряжения влияют слабо, так как разрушение происходит при наличии пластической деформации, при которой они полностью снимаются.

На динамическую прочность остаточные напряжения также влияют слабо. При скорости нагружения меньше критической разрушению предшествует пластическая деформация, снимающая напряжения. При скоростях деформации выше критической (взрывное нагружение) разрушающие напряжения на порядок выше остаточных, поэтому роль последних невелика.

На циклическую прочность при комнатной и невысоких температурах ($< 0,4 T_{пл}$) остаточные напряжения оказывают существенное влияние. Исследованиями установлена следующая зависимость между пределом выносливости и остаточными напряжениями:

$$\sigma_{-1_{выгл}} = \sigma_{-1_{исх}} - K\sigma_{ост}, \quad (6)$$

где $K = 0,1 \dots 0,3$ (меньшие значения для пластичных материалов).

Из формулы (6) видно, что растягивающие ($+\sigma_{ост}$) остаточные напряжения снижают сопротивление усталости, а сжимающие ($-\sigma_{ост}$) – повышают. Изменение предела выносливости может колебаться в диапазоне $\pm 30\%$. Это объясняется тем, что в зоне упругости материала результирующее напряженное состояние определяется суммированием рабочих и остаточных напряжений, что приводит к асимметрии цикла напряжений, т.е. при сжимающих остаточных напряжениях суммарные напряжения сжатия будут возрастать, а растяжения (при смене цикла) снижаться. Так как большинство материалов обладает разнопрочностью ($\sigma_{вск} > \sigma_{врат}$), то увеличение растягивающих напряжений приводит к разрушению материала. Вследствие того что поверхностный слой в условиях циклического нагружения более напряжен, а связи атомов на поверхности односторонни, основное значение приобретает не характер распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя, а величина и знак напряжений на поверхности.

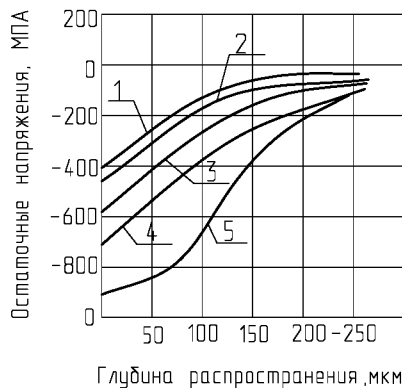


Рис. 3. Эпюры остаточных напряжений после алмазного выглаживания стали 1X18H9T:
 1 – P=70Н; 2 – P=100Н;
 3 – P=130Н; 4 – P=160Н;
 5 – P=190Н

Для стали 1X18H9T эпюры остаточных напряжений для различных условий алмазного выглаживания показаны на рис.3, а результаты усталостных испытаний образцов приведены на рис. 4.

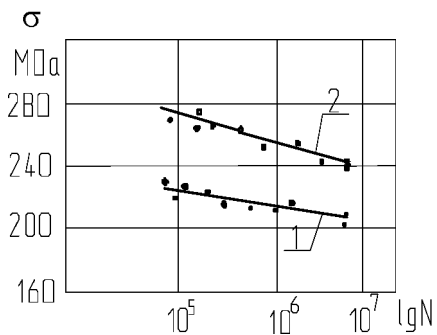


Рис.4 .Результаты усталостных испытаний образцов из стали 1X18H9T:
 1 – исходный образец;
 2 – образец, обработанный алмазным выглаживанием

Практическая часть

Упрочнение образцов методом алмазного выглаживания

При алмазном выглаживании (рис.5) металл в зоне контакта алмазного наконечника с поверхностью приходит в пластическое состояние и растекается, огибая его. В результате формируется новый микрорельеф поверхности, качественно более благоприятный, а также происходит упрочнение поверхностного слоя.

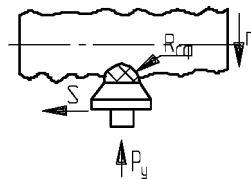


Рис.5. Схема формирования поверхностного слоя при обработке методом алмазного выглаживания

Круглый образец, изображенный на рис.6, зажимается в патрон токарного станка и поджимается задним центром. Выглаживание производится на участках I, II, III (показанных на рис. 6) с помощью приспособления (выглаживателя), установленного в резцедержателе станка. Участки поверхности выглаживаются на режимах, которые приведены в табл. 1.



Рис. 6. Эскиз исследуемого образца:

I, II, III — участки, выглаживаемые по режимам в соответствии с табл. 1;
IV — участок замера; V — участок закрепления в патроне

Конструкция выглаживателя показана на рис. 7. Заданное усилие устанавливается с помощью винта 2 по шкале 4. Подача и число оборотов шпинделя устанавливаются соответствующими механизмами станка.

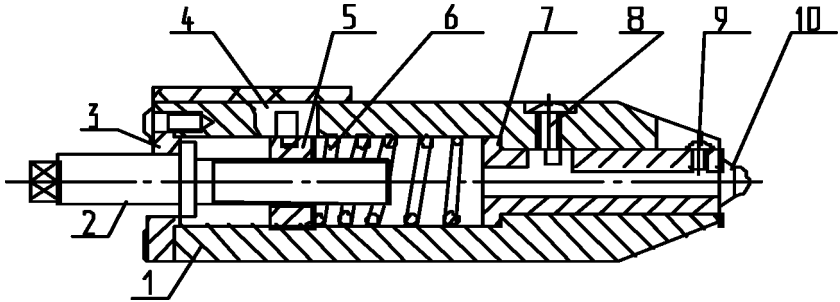


Рис. 7. Приспособление для алмазного выглаживания (выглаживатель):
 1 – корпус; 2 – винт; 3 – крышка; 4 – указатель нагрузки; 5 – гайка; 6 – пружина;
 7 – державка; 8 – стопор; 9 – крепежный винт; 10 – алмазный наконечник

На рис.8 приведен тарировочный график по усилиям выглаживания.

Таблица 1 Режимы алмазного выглаживания

Вариант	Материал	Номер п/п	Р, Н	Подача, мм/об	Количество проходов
А	1Х18Н9Т	I	70	0.07	1
		II	100	0.07	1
		III	130	0.07	1
В	1Х18Н9Т	I	130	0.07	1
		II	160	0.07	1
		III	190	0.07	1

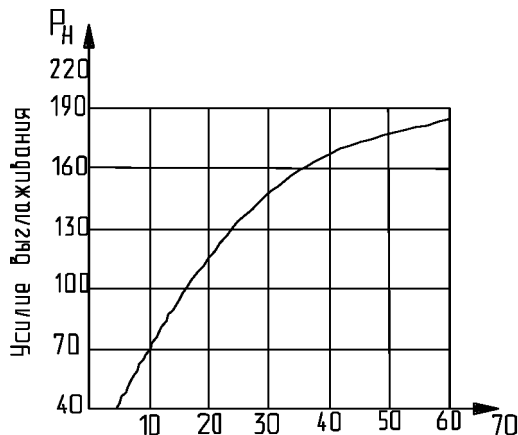


Рис.8. Тарифовый график для выглаживателя

Снятие профилограммы поверхности

Профилограмма снимается на профилографе – профилометре модели 201 контактно–щуповым методом. Образец устанавливается на измерительном столе с использованием призмы. Требуемое вертикальное увеличение M_v (от 1 до 200000) устанавливается переключателем на панели прибора и подбирается по размаху движения стрелки записывающего прибора.

Горизонтальное увеличение M_r выбирается в соответствии с данными табл. 2

Таблица 2 Величины горизонтального увеличения профилограммы

Скорость датчика, мм/мин	Скорость бумаги записывающего прибора, мм/мин					
	20	40	80	200	400	800
	Горизонтальное увеличение					
0,2	100	200	400	1000	2000	4000
1,0	20	40	80	200	400	800
10	2	4	8	20	40	80

Датчик устанавливается на испытуемую поверхность вертикальным перемещением мотопривода по стойке. При этом стрелка контрольного прибора должна находиться в участке малого треугольника шкалы при положении тумблера «Выход усилителя». Переключатель на мотоприводе устанавливается в положении «ЗП». Далее включается протяжка бумаги, тумблер «Вид работы» переводится в положение «ЗП» и рычагом на мотоприводе включается мотопривод.

Измерение микротвердости поверхностного слоя.

Микротвердость измеряется на приборе ПМТ–3 по величине отпечатка, полученного при накаливании поверхности алмазной четырехгранной пирамидкой под воздействием груза заданной величины.

Порядок измерения микротвердости на приборе ПМТ–3 следующий:

Установить образец на призме, совместив положение объектива прибора и выбранной зоны замера при исходном положении предметного столика.

Выбранный груз (200 г) поместить на утолщенную часть штока.

Плавно повернуть предметный столик против часовой стрелки до упора.

Медленным поворотом рукоятки подъема груза против часовой стрелки опустить шток так, чтобы алмаз коснулся поверхности исследуемого образца. Рукоятку поворачивать на 180° в течение 10–

15с, после выдержки 5с под нагрузкой нужно повернуть рукоятку в исходное положение.

Предметный столик осторожно повернуть в прежнее положение до упора.

Измерить диагональ отпечатка при помощи окулярного микрометра в соответствии со схемой (рис.10):

$$M = \Delta ME,$$

где M – размер диагонали, мм; ΔM – разность показаний шкалы барабана окулярного микрометра; E – цена деления измерительного барабана, $E=0,001163$ мм.

Величину микротвердости можно определить по таблицам или рассчитать по формуле

$$H_{\mu} = \frac{185400 \cdot P}{c^2},$$

где P – величина груза, Н; c – диагональ отпечатка в микрометрах, $c = M \cdot 1000$ мкм; H_{μ} – микротвердость поверхности, МПа.

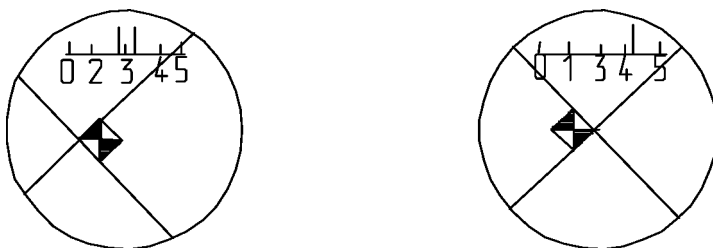


Рис. 9. Схема измерения диагонали отпечатка

Обработка результатов исследований

1. По полученным профилограммам (рис.11) определяются:

а) величина R_z :

$$R_z = \frac{1}{5} \left[\sum_1^5 |y_{pmi}| + \sum_1^5 |y_{vmi}| \right],$$

где y_{pmi} – высота i – го наибольшего выступа профиля;
 y_{vmi} – глубина i – й наибольшей впадины профиля;

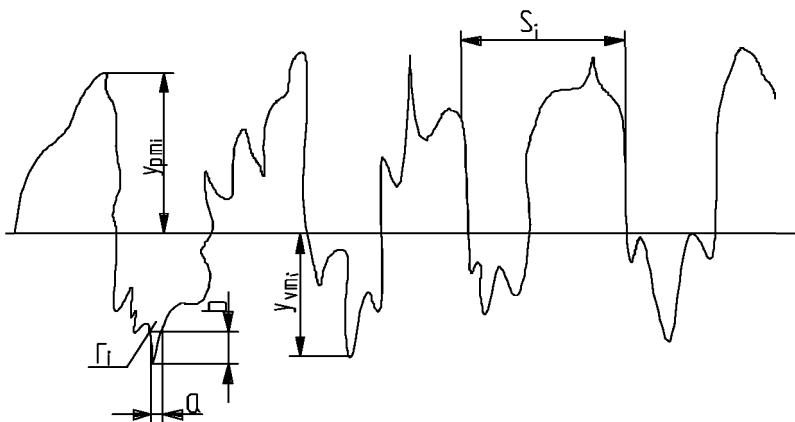


Рис. 10. Схема обработки информации на профилограмме.

б) средняя величина радиусов впадин:

$$r = \frac{\sum_1^i r_i}{i}; \quad r_i = \frac{M_b \cdot a^2 \cdot 1000}{M_i^2 \cdot b \cdot 8}.$$

Расчеты проводятся с учетом масштаба профилограммы. Величины a и b измеряются на профилограмме (в мм).

2. Рассчитывается теоретический коэффициент концентрации напряжений по формуле (1) с использованием рис. 1.
3. Рассчитывается эффективный коэффициент напряжений по формуле (3).
4. Строится зависимость $K_\sigma = f(P)$.
5. По формуле (4) рассчитывается ожидаемая величина $\sigma'_{-1\text{выгл}}$. Величина $\sigma_{-1\text{исх}}$ определяется по графику (см. рис. 4).
6. Рассчитывается степень наклепа U_H по формуле (5) для всех режимов выглаживания.

7. Строится зависимость $U_H = f(P_y)$.
8. Определяется величина остаточных напряжений после выглаживания по графикам (см. рис. 3).
9. По формуле (6) рассчитывается ожидаемая величина $\sigma_{-1\text{выгл}}$ с учетом величины и знака остаточных напряжений.
10. Формулируются рекомендации по режимам выглаживания и делаются выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что называется поверхностным слоем детали?
2. Какова классификация параметров качества поверхностного слоя?
3. Какие процессы протекают при алмазном выглаживании в зоне контакта инструмента с деталью?
4. Как влияет микрогеометрия поверхностного слоя на усталостную прочность материала?
5. Что такое наклеп и в чем заключается физическая сущность этого явления?
6. Каковы причины возникновения внутренних остаточных напряжений при обработке?

ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАННОГО КАЧЕСТВА ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ДОРНОВАНИИ ОТВЕРСТИЙ

Сущность и технологические параметры дорнования

Дорнование является одним из методов поверхностного пластического деформирования и основано на проталкивании калибрующего инструмента с заданным натягом через предварительно обработанное отверстие.

Дорнование подразделяют на поверхностное и объемное. При поверхностном дорновании пластически деформируется поверхностный слой, при объемном – пластическое деформирование происходит по всему поперечному сечению обрабатываемой заготовки.

При дорновании инструмент (дорн) продавливается или протягивается через отверстие (рис.1а) с применением смазки. Поверхностные слои при деформировании в пределах упругих деформаций возвращаются в исходное положение. Однако при большом натяге имеет место пластическое деформирование поверхностных слоев, в результате чего появятся радиальные сжимающие напряжения, окружные растягивающие напряжения, а также осевое сжимающее напряжение, т.е. два напряжения сжатия и одно растягивающее напряжение. При этом обрабатываемые поверхности наклепываются, увеличивается их поверхностная

твердость и возникают сжимающие остаточные напряжения. Это определяет повышение износостойкости, прочности прессовых посадок и т.д. Применение дорнования особенно эффективно при отделочной обработке заготовок из цветных сплавов, производительная и качественная обработка которых резанием (развертыванием и протягиванием) затруднена вследствие наростообразования.

Прикладываемая к инструменту сила P дорнования раскладывается на осевую P_0 и радиальную P_r (рис.1а). Осевая сила совершает работу A_1 трения и (в основном) поверхностного деформирования микронеровностей (рис.1б), а радиальная сила стремится увеличить диаметр обрабатываемой заготовки, совершая работу A_2 «раздачи» или объемного деформирования, а также работу A_3 изгиба стенок обрабатываемой заготовки ($A_{\Sigma}=A_1+A_2+A_3$). После прохождения зуба образуется волна деформированной поверхности, называемой зоной внеконтактной деформации. Путем установки в дорн дополняемых зубьев, регламентирования их размеров и расстояний между ними можно до определенной степени совместить зоны внеконтактного деформирования соседних зубьев и тем самым снизить работу по изгибу стенок заготовки, повысить точность обрабатываемого отверстия и улучшить другие условия дорнования.

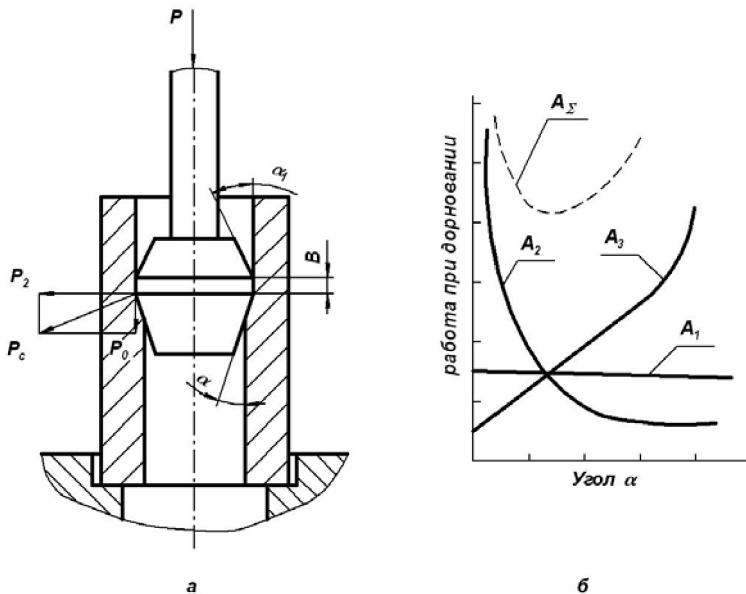


Рис. 1. Схема процесса, характер действующих сил (а) и работа, совершаемая при дорновании (б)

Поверхностное дорнование характеризуется следующими параметрами: натягом i (разность исходного диаметра отверстий D и дорна D_d); относительным натягом $\frac{i}{D}$; силой дорнования или силой тяги P и осевой составляющей силы деформирования P_0 ; скоростью дорнования V и геометрическими характеристиками дорна.

Одним из основных технологических параметров при дорновании является натяг, определяющий превышение диаметра дорна над диаметром отверстия до обработки (рис.2). Чаще всего величина натяга выбирается из требования получения определенной шероховатости поверхности. С увеличением натяга параметр шероховатости уменьшается до определенного значения, так как чрезмерно большой натяг приводит к разрыву масляной пленки (смазочный материал при дорновании играет значительную роль), к

налипанию частиц обрабатываемого металла на инструмент, в результате чего параметр шероховатости поверхности не уменьшается (рис.3).

Тяговая сила почти пропорциональна относительному натягу при обработке отверстий однозубыми дорнами (рис.4а). При последовательном проталкивании однозубых дорнов, т.е. в условиях, подобных условиям работы многозубого дорна, до некоторого натяга (в данном случае $\frac{i}{D}=0,007$) сила дорнования примерно одинакова, а далее она для многозубого дорна уменьшается.

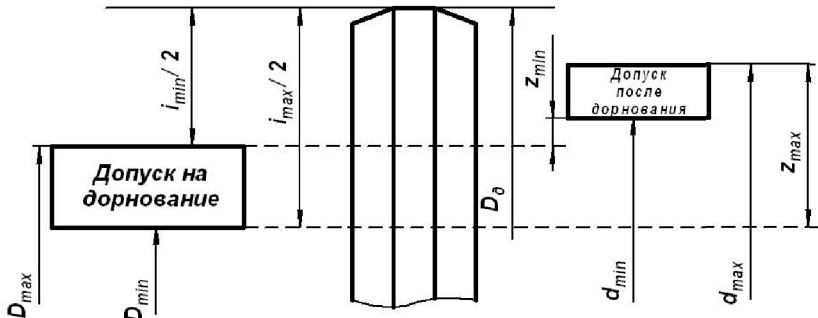


Рис.2. Схема расположения полей допусков при дорновании

Это объясняется тем, что при работе однозубого дорна с большим натягом пластическая волна металла, образующаяся вследствие дополнительных сдвигов металла, относительно велика, а значит, затрачивается большая работа на пластическое деформирование, преодоление сил трения и поворот участков поверхности.

При работе многозубого дорна натяг распределяется между несколькими деформирующими зубьями; пластическая волна, создаваемая каждым зубом дорна, значительно меньше, следовательно, необходимы и меньшие силы для пластического деформирования и преодоления сил трения. Так как поверхностный слой при многозубом дорновании упрочнен предыдущими зубьями,

то работа, затраченная на упругие деформации металла, будет больше, чем работа при однозубом дорновании, однако суммарная работа в данном случае остается меньшей.

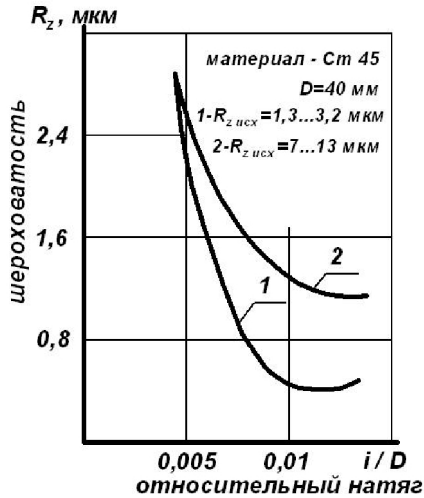


Рис.3. Влияние относительного натяга на шероховатость обрабатываемой поверхности при использовании многозубого (1) и однозубого (2) дорна

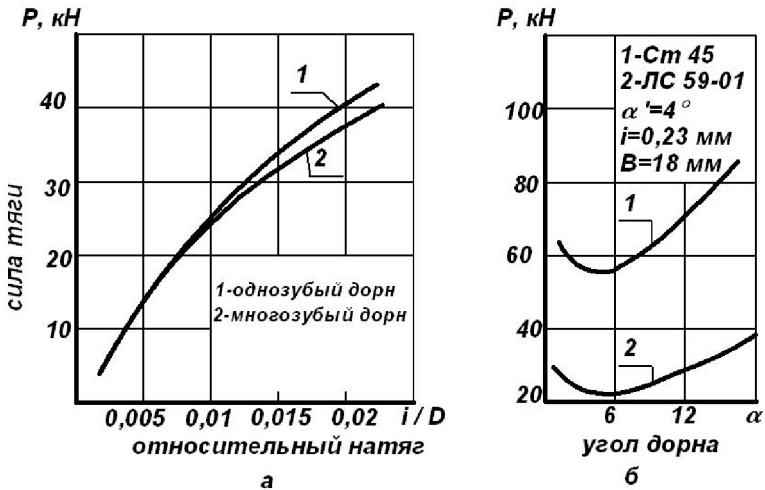


Рис.4. Зависимость силы тяги при дорновании от различных факторов: а – от относительного натяга; б – от угла заборной части дорна

Снижение тяговых сил на каждом зубе дорна при многозубом дорновании происходит, кроме того, вследствие снижения параметра шероховатости поверхности, обработанной предыдущими зубьями, а также создания ориентированной структуры зерен металла.

При изменении угла заборного конуса α от 0° до 18° (рис.4б) сила P вначале уменьшается до тех пор, пока α не станет равным 4° , а затем увеличивается.

Скорость дорнования несущественно влияет на характеристики обработанной поверхности и на износ инструмента, она ограничивается допустимым тепловыделением. Скорость обработки материала следует выбирать в зависимости от обрабатываемого материала.

Таблица 1 Зависимость скорости дорнования от материала

Материал		Скорость, м/мин
Сталь с НВ	143...320	12...15
	321 и выше	8...10
алюминий, бронза, латунь		20...25
баббит		15...20

Во избежание налипания металла заготовки на инструмент и образования на нем нароста вследствие повышенного нагрева при обработке особо вязких металлов необходимо уменьшить скорость дорнования до 5...7м/мин.

Смазочный материал имеет существенное значение, что объясняется большими силами трения скольжения, возникающими при дорновании.

Выбор смазочного материала определяется в основном свойствами обрабатываемого металла и давлением. При обработке прочных сталей со средними и малыми натягами наилучшими смазочными материалами являются сурепное, льняное, касторовое и другие масла; для мало- и среднеуглеродистых сталей, обрабатываемых при относительных натягах до 0,006, экономически целесообразно использовать более дешевые инструментальные смазочные материалы. При дорновании высокопрочных сталей с большими натягами хорошие результаты показали смазочные материалы, состоящие из смеси минерального масла с наполнителями - графитом, серой, тальком. Чугун хорошо обрабатывается при смазывании очищенным керосином, сплавы на медной основе – минеральными маслами и эмульсиями, а алюминиевые сплавы – мыльной водой, а также смесью минеральных и растительных смазок и жиров.

Инструментом для поверхностного дорнования служит дорн, в котором основным рабочим элементом является зуб. По форме рабочего профиля различают дорны: конусообразные с ленточкой и без нее, сферические, криволинейные, с двойным конусом на заборной поверхности и др. Наиболее целесообразной формой зуба является зуб с заборной и обратной поверхностями в виде конусов и

цилиндрической поверхностью между ними (ленточкой) (см.рис.1). Для различных условий обработки оптимальный угол конуса заборной поверхности $\alpha=3...5^{\circ}$. При дорновании средне – и высокоуглеродистых сталей $\alpha=4...5^{\circ}$, малоуглеродистых и легированных сталей – $\alpha=3^{\circ}30'...4^{\circ}$, чугунов – $\alpha=2...4^{\circ}$. Угол конуса обратной поверхности зуба при дорновании сталей и чугунов следует принимать равным 4...5. Ширина ленточки В определяется по эмпирической формуле $V=0,35 D_{\delta}^{0,6}$, обычно $V=1...3$ мм. При обработке вязких материалов следует принимать большие углы α и меньшую ширину ленточки.

Особое внимание обращают на достижение точности размеров при дорновании. Как показывает опыт, зависимость припуска на дорнование $2Z_i$ от величины натяга носит линейный характер:

$$2 Z_i = a i + b,$$

где а и в – постоянные коэффициенты, зависящие от механических свойств обрабатываемого металла.

Для обеспечения точности дорнования при постоянном диаметре дорна размеры отверстия под дорнование должны быть в пределах от D_{\min} до D_{\max} (см.рис.2):

$$\begin{aligned} D_{\max} &= \frac{1}{1-a} (d_{\max} - aD_{\delta} - B); \\ D_{\min} &= \frac{1}{1-a} (d_{\min} - aD_{\delta} - B), \end{aligned} \quad (1)$$

где d_{\max} , d_{\min} – предельные размеры отверстия после дорнования.

Если диаметр подготовленного отверстия выбран заранее, то точность обработки обеспечивается подбором требуемого диаметра дорна:

$$D_{\delta} = \frac{1}{a} [d_{\min} - (1-a)D_{\min} - B]. \quad (2)$$

Таким образом, достижение точности при дорновании обеспечивается соответствующей подготовкой обрабатываемого отверстия или подбором диаметра дорна с определением их размеров по уравнениям (1) и (2).

При отработке процесса производится пробное дорнование на четырех-пяти деталях с различными натягами i с последующим построением графических зависимостей $2Z_i=f(i)$, $Ra=f(i)$. После этого определяется требуемый натяг для обеспечения размера отверстия d с заданным допуском Td и определяются размеры отверстия под дорнование (или диаметр дорна).

Для исследования зависимости $2Z_i=f(i)$ производится дорнование четырех деталей с различными натягами i .

При помощи индикаторного нутрометра определяются размеры отверстия до обработки и после. Разность их определяет величину припуска при соответствующих натягах. Для определения коэффициента a и b производится обработка по методу средних по уравнениям:

$$a = \frac{(2Z_3 + 2Z_4) - (2Z_1 + 2Z_2)}{(i_3 + i_4) - (i_1 + i_2)};$$
$$b = \frac{(2Z_1 + 2Z_2) - a(i_1 + i_2)}{2}, \quad (3)$$

где $2Z_1, 2Z_2, 2Z_3, 2Z_4$ - величина припуска при дорновании деталей с натягами i_1, i_2, i_3, i_4 соответственно.

Порядок выполнения работы

а) Исследование влияния натяга на величину припуска.

Измерить диаметры отверстий четырех втулок индикаторным нутрометром и данные записать в табл.2.

Таблица 2. Результаты измерения образцов

№ дет	Исходный диаметр отверстия, мм	$i=D\delta-D$	Диаметр отв. после дорнования d , мм	$2Z_i=d-D$	Ra
1					
2					
3					
4					

По заданному значению D_δ определить величины натягов деталей и записать в табл.2.

Смазать отверстие втулок индустриальным маслом.

Дорновать отверстия четырех деталей с заданной скоростью.

Измерить диаметры отверстий d после дорнования, определить величины припусков для четырех деталей и данные записать в табл.2.

Построить графики зависимости $2Z_i=f(i)$ и $d=f(i)$ по данным табл.2.

Определить коэффициенты a и b по формулам (3).

б) Исследование влияния натяга на шероховатость дорнуемой поверхности.

Тщательно протереть дорнованные детали и измерить величину на профилометре. Результаты для четырех деталей записать в табл.2.

Построить график $Ra=f(i)$

в) Выбор и проверка технологических параметров дорнования деталей.

Для деталей, заданных преподавателем (табл. 3), выбрать метод обработки отверстия под дорнования и назначить D_{\min} и D_{\max} .

Таблица 3. Таблица индивидуальных заданий на проектирование операций дорнования

Параметры/ Вариант	Диаметр отверстия	Допуск на диаметр отв.	Ra	Материал	Примечание
1					
2					
3					
4					
5					

Определить требуемый диаметр дорна по формуле (2).

Определить колебания натяга i_{\max} и i_{\min} .

По графику $Ra=f(i)$ определить рассеивание в соответствии с колебаниями i_{\max} , i_{\min} и сделать выводы о возможности обеспечения требуемой шероховатости при обработке. Если при i_{\min} не обеспечивается требуемое значение Ra, то натяг увеличивается и, соответственно, увеличивается диаметр дорна:

$$D_d = D_{\max} + i'_{\min},$$

где i'_{\min} – величина увеличенного минимального натяга.

После этого уточняются размеры отверстия на дорнование по формулам (1).

Назначить скорость дорнования по табл.4.

Таблица 4. Скорость дорнования

Материал детали	Сталь $G_T \leq 60 \text{ кгс/мм}^2$	Цветные металлы и сплавы	Чугун HB 140...260
Скорость дорнования, м/мин	5...15	6...25	5...12

Выбрать вид смазки для дорнования по табл.5.

Таблица 5. Вид смазки

Материал детали	Вид смазки
Сталь $G_1 \leq 60 \text{ кгс/мм}^2$	Масла промышленные, сульфозфрезол, эмульсия
Цветные металлы и сплавы	Масла промышленные, керосин, смесь масла промышленного с касторовым
Чугун HB 140...260	Эмульсия: растительное масло, мыло, сода

Произвести проверку размеров отверстия после дорнования:

$$d_{\max} = D_{\max} + 2Z_{i \min},$$

$$d_{\min} = D_{\min} + 2Z_{i \max}.$$

Значения $2Z_{i \min}$, $2Z_{i \max}$ принимаются из графика $2Z_i = f(i)$.

Отчет

1. Характеристика оборудования.
2. Описание инструмента, материал его рабочей части, геометрия.
3. Режим обработки.
4. Данные об измерительных приборах.
5. Табл.2 с результатами исследований.
6. Графики зависимостей $2Z_i = f(i)$, $Ra = f(i)$.
7. Расчет и проверка технологических параметров при дорновании.
8. Выводы.

Контрольные вопросы

1. В чем сущность процесса дорнования?
2. В каком случае эффективно применение дорнования?
3. Какие технологические параметры характеризуют процесс дорнования?
4. Каков характер влияния натяга при дорновании на шероховатость обрабатываемой поверхности?
5. Каковы геометрические характеристики дорна?

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАННОГО КАЧЕСТВА ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОБКАТЫВАНИИ ЕЕ РОЛИКОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Сущность и технологические показатели процесса обработки роликом

Процесс обкатки роликами относится к методу поверхностного пластического деформирования и осуществляется свободно вращающимися и прижимаемыми с определенным давлением к обрабатываемой поверхности стальными роликами. При этом на поверхности происходит смятие выступов и заполнение впадин, шероховатость снижается на два-три класса, а диаметр заготовки уменьшается на величину смятых выступов. Вследствие пластической деформации происходит наклеп поверхностного слоя, возникают остаточные напряжения сжатия и увеличивается микротвердость.

Обкатку роликами наиболее широко применяют для упрочнения крупных деталей (валов, осей, зубчатых колес и др.), отделки рабочей поверхности, а также формообразования деталей с одновременным их упрочнением. В результате обкатки значительно повышается усталостная прочность деталей, а в ряде случаев износостойкость. Так, обкатка роликами чугунных и стальных коленчатых валов повышает их усталостную прочность на

50...100%, обкатка впадин между зубьями зубчатых колес повышает предел их выносливости на 40...60%.

Для обкатывания используют ролики различной конфигурации, которые обычно устанавливаются под некоторым углом к оси обрабатываемой заготовки, при этом в зоне контакта остается отпечаток, форма которого зависит от конфигурации ролика, кривизны обрабатываемой поверхности и угла α (рис.1с). Отпечаток эллиптической формы с осями $2a$ и $2b$ (рис.1b) образуется при использовании ролика кругового профиля, установленного без наклона к оси обрабатываемой заготовки. Прямоугольный отпечаток (рис.1а) получается при линейном исходном контакте ролика с заготовкой, условием которого в общем случае служит равенство абсолютных значений кривизны профиля ролика и заготовки.

В простейшем случае прямоугольный отпечаток создает цилиндрический ролик, установленный параллельно оси цилиндрической обрабатываемой заготовки, при этом их кривизна в поперечном сечении не влияет на форму отпечатка. Прямоугольный отпечаток целесообразно использовать при обработке без продольной подачи. Наиболее распространена схема обработки с использованием отпечатка каплевидной формы, которая обычно создается при обкатывании цилиндрическим или коническим роликом, установленным под углом α к обрабатываемой поверхности (рис.1с). Отпечаток ролика во время обкатывания превращается в пластически деформированную канавку, которая при обработке цилиндрических поверхностей с подачей представляет собой винтовую линию. Поскольку ширина этой канавки во много раз превышает подачу, то при втором и последующих оборотах заготовки ролик выходит на уже деформированную поверхность, несколько расширяя и углубляя канавку. После некоторого числа оборотов процесс стабилизируется. Процесс поверхностного деформирования зависит от силы обкатывания, размеров и профиля ролика и размеров обрабатываемой поверхности.

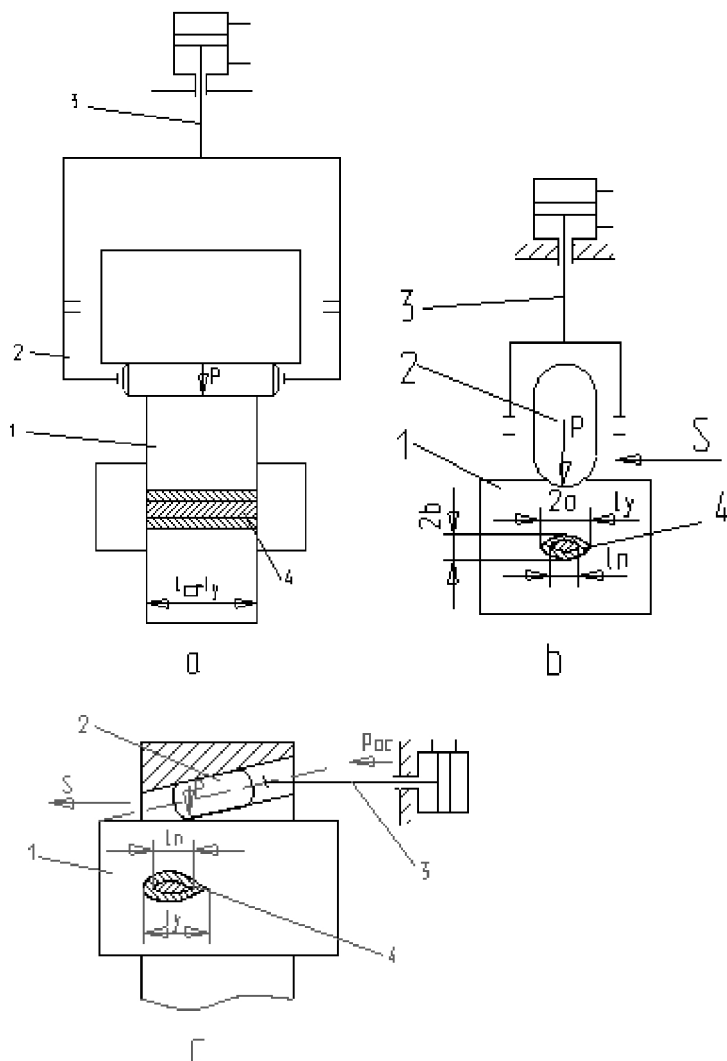


Рис.1 Характерные схемы обкатывания:

а – цилиндрическим роликом без осевой подачи; б – роликом круглого профиля; с – цилиндрическим или коническим роликом, установленным под углом к обрабатываемой поверхности: 1 – заготовка, 2 – ролик, 3 – система нагружения, 4 – пятно контакта, P – нормальная сила, $P_{ос}$ – осевая сила, l_n – длина пластического отпечатка, l_y – длина упругого отпечатка, S – подача

Сила обкатывания оказывает большое влияние на процесс. Так, при силе обкатывания больше оптимальной может произойти дестабилизация процесса и перенаклеп поверхности, может ухудшиться работа механизмов используемого оборудования и увеличиться износ инструмента.

Обкатывание наиболее целесообразно производить за один рабочий ход, иногда используют второй и третий рабочие ходы, которые могут несколько улучшить состояние поверхности. Однако большое число рабочих ходов недопустимо, так как может привести к перенаклепу поверхности вследствие резкого возрастания кратности приложения силы. Зависимость параметра шероховатости от силы обкатывания (рис.2а) носит параболический характер. Следующим по значению параметром обкатывания после силы является подача, которая может быть радиальной (рис.1а) и осевой (рис.1б, в).

Наилучшее качество поверхности достигается при обработке с радиальной подачей, однако на практике заготовку обычно обрабатывают с осевой подачей. С уменьшением подачи шероховатость поверхности уменьшается до определенного предела (рис.2б), затем начинает возрастать. При обработке с подачами меньше оптимальных значений может происходить перенаклеп поверхности.

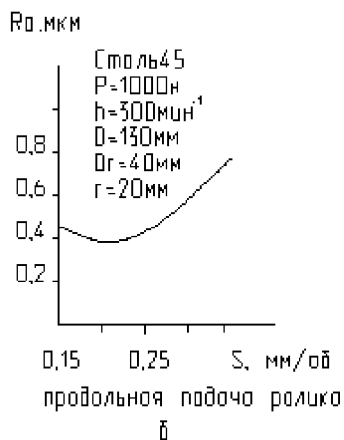
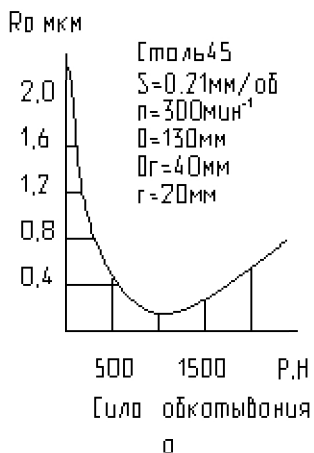


Рис.2. Зависимость параметра шероховатости поверхности от силы обкатывания (а), продольной подачи ролика (б), исходная шероховатость (в) при обкатывании стальными роликами.

Получаемая после обкатки шероховатость зависит от исходной шероховатости заготовки, причём чем пластичнее материал, тем в меньшей степени достигаемый параметр шероховатости поверхности зависит от исходного (рис.2в).

Качество поверхности после обкатывания определяется не только высотой микронеровностей исходной поверхности, но также

их формой и расположением. Неравномерные по высоте и шагу микронеровности вызывают «пятнистость», неоднородность упрочненной поверхности и шероховатости. Наиболее благоприятна исходная поверхность с равномерно чередующимися выступами и округлыми впадинами. Глубокие вырывы и задиры, надломы гребешков, следы от вибрации резцов при их отводе резко ухудшают качество обкатанной поверхности. Беспорядочный характер микрогребешков на исходной поверхности, полученной например, абразивной обработкой, затрудняет их пластическое деформирование. Однако обкатывание этих поверхностей во многих случаях улучшает их состояние. Наиболее оптимальный для обкатывания рельеф поверхности можно получить при стабильном процессе точения со значительными скоростями резания (190...200м/мин). Оптимальный параметр шероховатости исходной поверхности $Ra=1,25...5\text{мкм}$ для конструкционных сталей невысокой и средней твердости, поэтому рекомендуется следующим образом обрабатывать поверхность:

а) для достижения $Ra=0,04...0,08\text{мкм}$ – точение до $Ra=1,25...2,5\text{мкм}$;

б) для достижения $Ra=0,16...0,32\text{мкм}$ – точение до $Ra=2,5...5\text{мкм}$ или шлифование до $Ra=2,5\text{мкм}$.

Для того чтобы управлять ходом технологического процесса с целью получения параметров шероховатости поверхности готового изделия необходимо получить математическую модель этого процесса, т.е. уравнение, устанавливающее связь получаемой при накатывании шероховатости с режимом накатывания и исходной шероховатостью.

Вывод подробного уравнения на основе теоретического анализа весьма сложен. В то же время построение эмпирической модели довольно просто позволяет решить поставленную задачу.

Построение эмпирической модели процесса

Известно, что математическую модель процесса накатывания можно представить в виде

$$R_a = C \cdot S^m \cdot R_{z3}^n \cdot P^k, \quad (1)$$

где R_a – среднее арифметическое отклонение профиля после накатывания, мкм;

S – продольная подача, мм/об;

R_{z3} – средняя высота микронеровностей поверхности заготовки, мкм;

P – нагрузка на ролик, Н;

C, m, n, k – коэффициенты, определяемые экспериментально.

Экспериментальные исследования процесса накатывания с целью определения численных значений коэффициентов C, m, n и k целесообразно провести с использованием метода планирования многофакторных экспериментов в определенном порядке. Уравнение (1), описывающее процесс накатывания, путем логарифмирования преобразуется к линейному виду:

а) в натуральных координатах:

$$\ln(R_a) = \ln(C) + m \ln(S) + n \ln(R_{z3}) + k \ln(P); \quad (2)$$

б) в кодовых координатах:

$$Y = v_0 X_0 + v_1 X_1 + v_2 X_2 + v_3 X_3, \quad (3)$$

где v_0, v_1, v_2, v_3 – коэффициенты, являющиеся оценками неизвестных параметров $\ln(C), m, n, k$ соответственно;

Y, x_1, x_2, x_3 – кодовое обозначение переменных $\ln(R_a), \ln(S), \ln(R_{z3}), \ln(P)$.

Для определения четырех коэффициентов (v_0, v_1, v_2, v_3) линейного уравнения достаточно поставить четыре опыта ($N=4$) при двух уровнях варьирования независимых переменных (табл.1).

Уровни варьирования: В-верхний уровень, Н-нижний уровень. Они имеют числовые значения в кодовых координатах: В=+1, Н=-1.

Кодирование проведено по формуле

$$x_i = \frac{2(\ln \tilde{x}_i - \ln \tilde{x}_{i0})}{\ln \tilde{x}_i - \ln \tilde{x}_{in}}, \quad (4)$$

где \tilde{x}_i - натуральное значение i - фактора;

$\tilde{x}_{i0}, \tilde{x}_{in}$ - натуральные значения фактора на верхнем и нижнем уровнях.

Таблица 1. Уровни варьирования переменных

Уровни факторов	Числовые значения уровней варьирования в натуральных координатах		
	Продольная подача, мм/об (S) $\tilde{X}_{1В}, \tilde{X}_{1Н}$	R _{z3} -чист. поверх. заготовки, мкм $\tilde{X}_{2В}, \tilde{X}_{2Н}$	Нагрузка на ролик Р, Н $\tilde{X}_{3В}, \tilde{X}_{3Н}$
В(+1)			
Н(-1)			

Принятое кодирование переменных и уровней их варьирования необходимо при получении ортогональной матрицы планирования, позволяющей при математической обработке результатов эксперимента искомые коэффициенты определять независимо друг от друга.

План проведения эксперимента и результаты опытов записываются в табл.2.

Таблица 2. План проведения эксперимента

Номер опыта	План эксперимента в кодовых координатах				План эксперимента в натуральных координатах			Результаты натуральных опытов П=2	
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	S	R _{z3}	P	Y _{i1}	Y _{i2}
1	+1	-	-	+					
2	+1	+	-	-					
3	+1	-	+	-					
4	+1	+	+	+					

Согласно приведенному в табл.2 плану эксперимента, изготавливаются образцы с заданными уровнями исходной шероховатости, после чего производятся опыты с заданным режимом обкатывания. Коэффициенты С, m, n, k уравнения (1) определяются в следующем порядке.

Определяем коэффициенты B_0, B_1, B_2, B_3 по формулам:

$$B_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Y_j, \quad (5)$$

$$B_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} \bar{Y}_j, \quad (6)$$

$$\bar{Y}_j = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n Y_{jr}, \quad (7)$$

где N – число опытов в матрице;

i – номер фактора;

j – номер опыта;

n – число параллельных опытов;

r – номер параллельного опыта

По результатам вычислений получим уравнение в кодовых уравнениях к значимости коэффициентов.

С целью оценки отклонений параметра оптимизации от его среднего значения для каждой строки матрицы планирования вычисляем дисперсии S_j^2 опыта по данным и параллельным опытам:

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{r=1}^n (Y_{jr} - \bar{Y}_j)^2. \quad (8)$$

Далее проверяем однородность дисперсии. При одновременном дублировании опытов однородность ряда дисперсии проверяют с помощью критерия Кохрена, представляющего собой отношение максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{S_1^2 + S_2^2 + S_N^2} = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2}. \quad (9)$$

Дисперсии однородны, если расчетное значение G – критерия не превышает табличное значение G_T – критерия (табл.14, с.24[1]).

Если дисперсии S_j^2 опытов однородны, то дисперсию воспроизводимости эксперимента вычисляем по выражению

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2. \quad (10)$$

После вычисления коэффициентов уравнения проводим проверку их значимости сравнением абсолютной величины коэффициента с доверительным интервалом. При этом вычисляются дисперсии коэффициентов по формуле:

$$S^2\{B_i\} = \frac{1}{n \cdot N} \cdot S_y^2, \quad (11)$$

и определяется доверительный интервал

$$\Delta B_i = \pm t_T \cdot S\{B_i\}, \quad (12)$$

где t_T – табличное значение критерия (табл.14, с.26[1]) при принятом уровне значимости и числе степеней свободы f , с которым определялась дисперсия S_y^2 . При равномерном дублировании опытов число степеней свободы находится по выражению

$$S = N(n - 1). \quad (13)$$

Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала. Статически незначимые коэффициенты могут быть исключены из уравнения.

После расчета коэффициентов модели и проверки их значимости определяем дисперсию адекватности S_{ag}^2 , характеризующую расстояние эмпирических значений Y относительно расчетных Y , определяемых по найденному уравнению регрессии:

$$S_{ag}^2 = \frac{n \cdot \sum_{j=1}^N (\bar{Y}_j - Y_j)^2}{f} = \frac{n \cdot \sum_{j=1}^N (\bar{Y}_j - Y_j)}{N - (t + 1)}, \quad (14)$$

\bar{Y}_j – значение параметра оптимизации вычисленное по модели для условий j опыта;

f – число степеней свободы, равное $f = N - (t + 1)$;

t – число факторов.

Далее проводим проверку гипотезы адекватности найденной модели. Проверку этой гипотезы проводим по F -критерию Фишера:

$$F_p = \frac{S_{ag}^2}{S_Y^2}. \quad (15)$$

Если значение $F_p < F_T$ для принятого уровня значимости и соответствующих чисел степеней свободы, то модель считается адекватной.

Значение F_T берется из справочника.

Для перехода от кодированных значений факторов к натуральным в уравнении (3) подставляется значение факторов x_1, x_2, x_3 по выражениям (4):

$$\begin{aligned} \ln Ra = & B_0 + B_1 \left[\frac{2(\ln \tilde{x}_1 - \ln \tilde{x}_{1B})}{\ln \tilde{x}_{1B} - \ln \tilde{x}_{1H}} + 1 \right] + B_2 \left[\frac{2(\ln \tilde{x}_2 - \ln \tilde{x}_{2B})}{\ln \tilde{x}_{2B} - \ln \tilde{x}_{2H}} + 1 \right] + \\ & + B_3 \left[\frac{2(\ln \tilde{x}_3 - \ln \tilde{x}_{3B})}{\ln \tilde{x}_{3B} - \ln \tilde{x}_{3H}} + 1 \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

Проводим алгебраические преобразования этого уравнения к виду (2), затем потенцируем и получаем уравнение в виде (1).

В связи с трудоемкостью вычисления коэффициентов обработку экспериментальных данных целесообразно проводить на ЭВМ с использованием разработанной программы.

В процессе анализа полученных результатов по величине и знаку коэффициентов m, n, k можно судить о степени и характере влияния соответствующих параметров (S, R_{z3}, P) на величину шероховатости.

Так, если знак при m положительный, то с увеличением подачи S шероховатость увеличивается, и наоборот.

При проведении анализа для наглядности необходимо построить графики зависимости $Ra=f(S)$; $Ra=f(R_{z3})$; $Ra=f(P)$ при фиксированных значениях остальных параметров.

Порядок выполнения работы

1. Измерить шероховатость поверхности образцов-заготовок.
2. Провести накатывание образцов.
3. Измерить полученную шероховатость поверхности после накатывания.
4. Ознакомиться с инструкцией обработки экспериментальных данных на ЭВМ.
5. Провести математическую обработку результатов.
6. Дать анализ результатов с построением графиков функций $Ra=f(S)$, $Ra=f(R_{z3})$, $Ra=f(P)$.

Отчет

1. Наименование работы.
2. Характеристика оборудования, оснастки, приборов, образцов.
3. Схема накатывания.
4. Таблица с исходными данными.
5. Таблица с планом эксперимента и результатами эксперимента.
6. Модель в кодированных координатах.
7. Математическая модель в натуральных значениях переменных.
8. Зависимости шероховатости от параметров процесса накатывания.

Контрольные вопросы

1. К какому методу обработки относится метод обкатки роликом?
2. Применительно к каким деталям используется метод обкатки роликом?
3. Каков характер влияния обкатки роликом на эксплуатационные свойства деталей?
4. Какие технологические характеристики процесса обкатывания роликом оказывают влияние на шероховатость поверхности после обработки?

ВЫЯВЛЕНИЕ ШЛИФОВОЧНЫХ ПРИЖОГОВ НА ДЕТАЛЯХ

Цель работы: ознакомить студентов с причинами возникновения и методами выявления прижогов при обработке деталей шлифованием и дать практические навыки по их выявлению.

Понятие о природе и причинах возникновения шлифовочных прижогов

Одним из типичных дефектов механической обработки, особенно шлифования, является прижог.

Процесс шлифования стальных деталей выполняется после закалки и отпуска. Значительное тепловое воздействие на поверхностный слой деталей при шлифовании ухудшает его свойства. Это связано с наличием следующих особенностей:

- температура тонкого поверхностного слоя при шлифовании может достигать 700...1200 °С ;
- скорость локального нагрева составляет 5000...10000 град/с;
- скорость охлаждения поверхностного слоя также очень велика - до 1000 град/с;
- температурное воздействие при шлифовании протекает в условиях повышенных воздействий.

Названные причины могут изменять структуру поверхностного слоя и создавать в них значительные напряжения.

При исследовании микроструктуры поверхностного слоя наблюдается:

- наружный плохо травящийся, светлый слой;
- никележащая темнотравящаяся зона, переходная зона к основной структуре.

Светлый слой имеет аустенитно-мартенситную структуру и является продуктом вторичной закалки, происходящей в условиях шлифования.

Аустенит, образовавшийся при быстрых нагревах и охлаждении и значительных давлениях, обладает:

- высокой устойчивостью при охлаждении и сохраняется в светлом слое в повышенном количестве;
- высокой твердостью (≈ 1000 HV).

Темнотравящаяся зона представляет дискретную ферритно-карбидную смесь. Она возникает в области меньшего теплового воздействия и является продуктом отпуска. Ее твердость снижается по сравнению с основным металлом.

Вышеописанные локальные структурные изменения в поверхностном слое приводят к появлению значительных остаточных напряжений и, как следствие, к образованию шлифовочных трещин.

К причинам возникновения прижога при шлифовании можно отнести:

- теплофизические свойства обрабатываемого материала;
- особенности шлифовального инструмента, условия травления;
- режимы обработки;
- состояние режущей поверхности инструмента;
- наличие или отсутствие охлаждения.

Все ответственные и тяжелонагруженные детали авиационных двигателей (лопатки, зубчатые колеса, валы, диски, точные сопрягаемые детали плунжерных пар и др.) подвергаются обязательному контролю на прижог и при наличии такового к постановке на изделие не допускаются.

Если грубый прижог обнаруживается визуально, по наличию цветов побежалости на обработанной поверхности, то слабые прижоги для невооруженного глаза незаметны. На некоторых материалах, например на титановых сплавах, они могут быть обнаружены при люминесцентном контроле (цель его - выявление поверхностных трещин). Обычно же для выявления прижога детали, как сказано выше, проходят специальный контроль - травление. Так, стальные детали травятся в течение 30 с в растворе $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ (150 г/л воды), а затем - в растворе HCl (100 г/л воды) и уротропина (50 г/л воды) в течение одной минуты.

С прижогом связано и появление разброса значений микротвердости при шлифовании грубо обработанной на предшествующей операции поверхности. Шлифовальный круг создает на выступах микронеровностей поверхности тепловые удары, вызывающие мгновенный нагрев и структурные изменения металла поверхностного слоя. При этом, если обработка ведется на мягких режимах, на участках под гребешками шероховатости возникают зоны отпущенного металла с пониженной твердостью. Если же обработку осуществляют на напряженных режимах, то под гребешками можно обнаружить зоны более твердого металла, претерпевшего вторичную закалку.

В целом же и в том, и в другом случае на обработанной шлифованием поверхности наблюдается разброс замеров микротвердости, что снижает работоспособность детали (питтинговое разрушение).

Качество шлифованного слоя определяется микроанализом и рентгеноструктурным анализом по количеству аустенита.

Темнотравящийся слой на поверхности выявляется также макроанализом - травлением 10% - ным водным раствором азотной кислоты. Участки пониженной твердости с тросто-мартенситной структурой травятся интенсивнее и обнаруживаются в виде пятен темно-коричневого цвета.

На гладких поверхностях можно также измерять твердость вдавливанием алмазной пирамиды с разными нагрузками.

Содержание работы

Содержанием лабораторной работы является:

1. Нахождение оптимального режима плоского шлифования стальных и закаленных образцов.
2. Определение мест прижога путем травления и изменения микротвердости материала в месте прижога.
3. Определение разброса микротвердости.

Методика и порядок проведения работы

Оптимальным режимом плоского шлифования будем считать режим, сочетающий максимальную производительность по съему металла с отсутствием прижогов на обрабатываемой поверхности.

Исследуется процесс плоского шлифования периферией круга с использованием метода продольных проходов.

Шлифование ведется на плоскошлифовальном станке мод.3711. Образцы устанавливаются на магнитном столе станка.

В качестве образцов используются пластины (рис. 1) из инструментальной углеродистой стали У10А, закаленные на твердость $HRC_s \cong 60$. Размеры образца $70 \times 25 \times 4$ мм. Шероховатость исходной (до шлифования) обрабатываемой поверхности образцов $R_z = 40 \dots 50$ мкм. Такая шероховатость достигается при торцевом фрезеровании до закалки образцов.

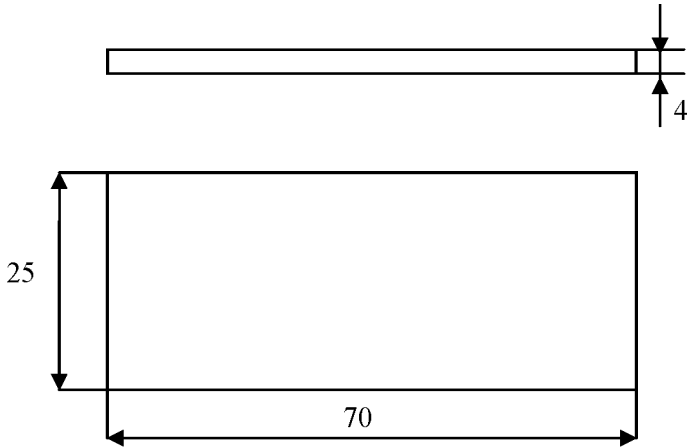


Рис. 1. Образец

Режущий инструмент - шлифовальный круг марки ПП 250×25×75 (ГОСТ 2424 - 87) с характеристиками 25A40M17K5 по ГОСТ. Шлифовальный круг должен иметь хорошие режущие свойства. Следы "засаливания" на круге не допускаются.

Режимы шлифования:

1. Скорость резания равна скорости вращения шлифовального круга:

$$V_{рез} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot 1000} = \left[\frac{M}{c} \right],$$

где D и n - соответственно диаметр (мм) и частота вращения (1/мин) шлифовального круга, $V_{рез} = 15...18$ м/с.

2. Величина продольной подачи $S_{\text{ПР}}$ равна скорости перемещения стола вдоль круга и устанавливается при настройке станка $S_{\text{ПР}} = 8...10$ м/мин.
3. Величина поперечной подачи $S_{\text{ПП}}$ (мм/ход стола).
 $S_{\text{ПП}} = (0,2...0,3) B$, мм/ход стола, где B - ширина круга.

4. Глубина шлифования устанавливается до обработки и изменяется в пределах 0,1...0,4 мм (об изменении глубины - см. ниже).

Каждый образец для исследования обрабатывается при установке круга на глубину шлифования $t = 0,1 - 0,2 - 0,4$ мм. Обработке на каждой из указанных величин t подвергается 1/3 образца по ширине. Шлифование на каждом из этих режимов продолжается до удаления следов предыдущей обработки. После обработки на каждой из глубин t образец подвергается травлению на прижог. Первый из бесприжоговых режимов можно считать оптимальным.

Травление проводится по инструкции, описанной в Приложении.

О наличии прижога свидетельствуют темные пятна на блестящей поверхности после шлифования.

Измерение микротвердости проводится на приборе - микротвердомере мод. ПМТ - 3 по инструкции к прибору. Микротвердость измеряется 4...5 раз в местах без прижога и в местах с прижогом, после чего рассчитывается среднее арифметическое значение, а результаты расчета сравниваются между собой и фиксируются в протоколе лабораторного занятия, где отмечаются и соответствующие режимы шлифования.

Наличие разброса микротвердости устанавливается путем измерения микротвердости с помощью ПМТ - 3 в близко расположенных точках (шаг измерения 0,04-0,05 мм) обработанной поверхности. Измерения проводятся в направлении длины образца (параллельно длине) на удобном для этого месте. Определение разброса микротвердости следует проводить на поверхности образцов, подвергшихся самому мягкому из режимов шлифования. Результаты измерения фиксируются в протоколе.

Отчет по лабораторной работе

По результатам лабораторной работы оформляется отчет. В отчете указываются:

- модель станка;
 - марка круга;
 - режимы шлифования, на которых отмечен прижог, и бесприжоговые;
 - результат травления на прижог (появление пятен с прижогом);
 - результат измерения микротвердости в местах с прижогом и ее разброс, а также дается объяснение наблюдаемым результатам.
- Отчет предъявляется преподавателю при сдаче отчета.

Контрольные вопросы

1. Какие причины могут изменить структуру поверхностного слоя при шлифовании?
2. Какова природа возникновения прижога при шлифовании?
3. Какие методы выявления прижога используются в производстве?
4. В какой последовательности выполняется травление «на прижог»?

ПРИЛОЖЕНИЕ

Инструкция по травлению "на прижог" стальных деталей

1. Обезжиривание в течение 5... 10 мин в водном растворе:
тринатрий фосфат 30... 70 г/л;
жидкое стекло 10...20 г/л;
каустическая сода 5... 10 г/л.
При температуре 30...60 °С.
2. Промывка в горячей воде.
3. Промывка в холодной воде.
4. Травление первое в водном растворе надсернистого аммония $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 100...150 г/л при комнатной температуре, в течение 15...30 с.
5. Промывка в холодной воде.
6. Травление второе в водном растворе соляной кислоты HCl (50..100 г/л) и уротропина (40...50 г/л) в течение одной минуты при комнатной температуре.
7. Промывка в холодной воде.
8. Нейтрализация - в водном растворе углекислого натрия (30...50 г/л) в течение 1...3 мин при комнатной температуре.
9. Антикоррозионная обработка в водном растворе нитрата натрия (200...250 г/л) в течение 1...3 мин.

Реактив для травления "на прижог" титановых сплавов.

Травитель – HNO_3 (140..170 г/л); HF (15...20 г/л).

Температура ванны с раствором 15...40 °С, время выдержки 15...90 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Цель работы: закрепление теоретических знаний по электрохимической обработке (ЭХО) деталей, освоение методики выбора оптимальных режимов (ЭХО), оценка технологических возможностей метода.

Оборудование, приборы и инструменты

1. Экспериментальная установка ЭХО-12 с источником и пультом управления.
2. Осциллограф, микрометр, штангенциркуль, секундомер, счетчик импульсов.
3. Микрокалькулятор.

Теоретические сведения

Прогресс в двигателестроении идет в направлении совершенствования эксплуатационных характеристик материалов деталей: прочности, твердости, жаропрочности и т.д., но при этом возрастают трудности, связанные с обработкой этих материалов. В значительной мере преодолеть эти трудности позволяют т. н. электротехнологии, к которым относится и электрохимическая

обработка материалов (ЭХО). С физической точки зрения в основе ЭХО лежит процесс локального анодного растворения материала под действием электрического тока в растворе электролита. При этом электролит, как правило, интенсивно прокачивается между электродами в узком межэлектродном зазоре (МЭЗ). Метод ЭХО обладает следующими преимуществами по сравнению с традиционными методами механической обработки:

1. Возможность формирования сложных поверхностей при относительно простой кинематике рабочих органов станка.
2. Значительно меньшая зависимость основных технологических показателей обработки от физико-механических свойств обрабатываемых материалов.
3. Отсутствие износа инструмента.
4. Резкое снижение силового и температурного воздействия на обрабатываемую поверхность.
5. Съем обрабатываемого материала одновременно со всей поверхности.
6. Минимальное влияние ЭХО на физико-механические характеристики поверхностного слоя.

Основными недостатками ЭХО являются: высокая энергоемкость процесса, необходимость специальных источников питания, сложность изготовления электрода-инструмента, необходимость высокой технологической культуры рабочего, обслуживающего электрохимическое оборудование.

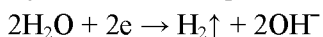
Технологические характеристики электрохимической обработки определяются электродными процессами (т.е. процессами, протекающими на поверхностях анода и катода).

Катод и анод являются проводниками 1-го рода (ток – движение электронов). Раствор является проводником 2-го рода (ток – движение ионов). Скорость процессов, протекающих на границе раздела электрод – электролит, характеризуется

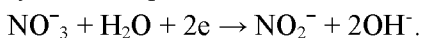
потенциалами соответственно на катоде – φ_k , а на аноде – φ_a . Поэтому на границе электрод – электролит должна протекать электрохимическая реакция.

Катодная реакция

Суть катодного процесса – выделение водорода по схеме



или восстановление анионов электролита. При этом на поверхности катода формируется газожидкостный слой, обладающий повышенным электрическим сопротивлением. Этот слой может оказывать влияние на процесс насыщения поверхностного слоя обрабатываемой заготовки водородом, т.е. наводороживания. Кроме того, газонаполнение электролита является одной из главных причин неравномерного распределения тока по длине межэлектродного промежутка в направлении потока электролита. Это в конечном счете ведет к снижению точности ЭХО. В нитратосодержащих электролитах (содержащих анион NO_3^-) наряду с процессом выделения водорода происходит восстановление иона NO_3^- . Первую стадию этого процесса можно записать следующим образом:



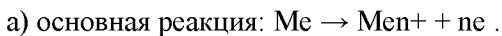
В благоприятных условиях реакция может идти дальше через ряд стадий вплоть до образования аммиака (NH_3 .) Т.е. при обработке в нитратосодержащих электролитах газонаполнение межэлектродного промежутка меньше и точность обработки при прочих равных условиях выше.

Анодные процессы

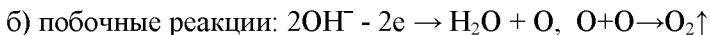
Процессы, протекающие на поверхности анода (обрабатываемой заготовки) при прохождении тока через границу раздела фаз

электролит – электрод, определяют весь комплекс технологических характеристик ЭХО, а также режимы обработки.

На аноде происходят основные процессы – ионизация металла заготовки и побочные процессы, наиболее важным из которых является выделение кислорода. Реакции в общем виде можно записать:



Продуктом анодной реакции может быть соединение ионов металла с какими-либо частицами из раствора. Переходящие в раствор ионы металла взаимодействуют с водой – гидратируют. Частичная диссоциация гидратированных ионов приводит к образованию гидроокиси и подкислению раствора:



При этом происходит выделение молекулярного кислорода. Для того чтобы процесс анодного растворения протекал непрерывно, необходимо удалять с обрабатываемой поверхности гидроокиси и газообразные продукты потоком электролита. Валентность (n) основной реакции и интенсивность побочного процесса (выделения кислорода) определяют величину выхода по току на аноде (η). Эта характеристика определяется отклонением практического удельного съема металла на единицу пропущенного электричества к его теоретическому значению, определяемому законом Фарадея. Распределение выхода по току на поверхности анода определяет интенсивность растворения в данной точке, т.е. скорость выравнивания припуска.

Закономерности электрохимического съема припуска металла

При электрохимической обработке закономерности анодного растворения определяются законами Ома и Фарадея. В соответствии

с этими законами скорость электрохимического растворения металла в точке анода может быть определена по уравнению

$$V_{\text{эx}} = \frac{\eta \epsilon \chi (U - \varphi_a - \varphi_k)}{a}, \quad (1)$$

где η – выход по току материала,

ϵ – электрохимический эквивалент материала анода,

χ – электропроводность электролита,

U – напряжение на электродах,

φ_a, φ_k – потенциалы катода и анода,

a – величина межэлектродного зазора.

Анализ показывает, что скорость растворения зависит от межэлектродного зазора и величины напряжения на электродах, а также электрохимических свойств пары материал – электролит, которые характеризуются параметрами $\eta, \epsilon, \lambda, \varphi_a, \varphi_k$.

При стабилизации внешних параметров процесса напряжения на электродах, температуры электролита, скорости растворения на различных участках анода будут определяться величиной зазоров между анодом и катодом на этих участках.

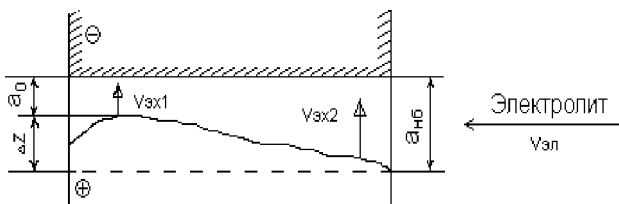


Рис.1 Схема распределения припусков и зазоров при ЭХО

Если обрабатывать заготовку, имеющую начальную неравномерность припусков ΔZ , плоским электродом-инструментом, то с течением времени обработки вследствие различия скорости растворения межэлектродные зазоры стремятся

выровняться, а форма поверхности заготовки – приближается к форме электрода-инструмента. Погрешность формы поверхности Δk можно определить как разность наибольшего и наименьшего конечных межэлектродных зазоров.

Величина погрешности Δk зависит от многих факторов: величины наименьшего начального размера a_0 , режима обработки (напряжения на электродах, скорости подачи инструмента), химического состава электролита и скорости его движения между электродами, а также от характера подаваемого на электроды напряжения – постоянный или импульсный.

В общем случае погрешность Δk снижается при уменьшении a_0 и поддержании его в течение всего времени обработки на заданном уровне, увеличении суммарной величины припуска на обработку $Z_{\text{нм}}$. Кроме того, выравнивание зазоров в большей степени зависит от химического состава электролита, его избирательной способности, т.е. различия скоростей $V_{\text{ЭХ}}$ для разных зазоров. Для практического использования процесса ЭХО важно, чтобы разница в скоростях была максимальна и существовал зазор, при котором процесс растворения совсем прекращается, т.е. имеет место локализация процесса. Поэтому, сравнивая между собой различные электролиты, говорят об их избирательной способности (разнице скоростей) и локализующей способности (наличия и величины зазора, при котором $V_{\text{ЭХ}}=0$). При съеме небольших припусков, например при прошивке тонких листов, маркировке и многих других случаях, применяют схему с неподвижным электродом-инструментом. Эта же схема широко используется в так называемой импульсно-циклической электрохимической обработке – наиболее современном способе реализации ЭХО, при котором обработка состоит из повторяющихся циклов: подвод электродов до касания с заготовкой (ощупывание), отвод на заданный (начальный) зазор, включение технологических импульсов напряжения, в течение

которых происходит собственно растворение металла, отвод на большой зазор для лучшей промывки МЭЗ, затем повторение цикла до полного съема припуска. В этом случае за один цикл съема зазор возрастает от a_0 до конечного a_k .

Если текущий зазор обозначить через a_k , а линейный съем металла с заготовки Δa_k за время $\Delta \tau$, то уравнение (1) можно записать в виде

$$\frac{\Delta a_k}{\Delta \tau} = \frac{\frac{\eta \cdot \varepsilon}{\gamma} \cdot \chi(U - \Delta U)}{a_k},$$

где γ – удельный вес обрабатываемого материала, г/см³.

Откуда после ряда математических преобразований получим

$$Z = \frac{2\eta\varepsilon\chi(U - \Delta U)}{\gamma(a_k + a_0)} \tau_0, \quad (2)$$

откуда время обработки определяется по формуле

$$\tau_0 = \frac{Z\gamma(a_k + a_0)}{2\eta\varepsilon\chi(U - \Delta U)}, \quad (3)$$

тогда величину конечного зазора a_k можно определить как

$$a_k = \sqrt{(2\eta\varepsilon\chi(U - \Delta U)\tau_0)/(\gamma + a_0^2)}. \quad (2')$$

Величина $Z=a_k-a_0$ определяет линейный съем металла за время τ_0 . При обработке в импульсном режиме эффективная величина напряжения определяется по схеме.

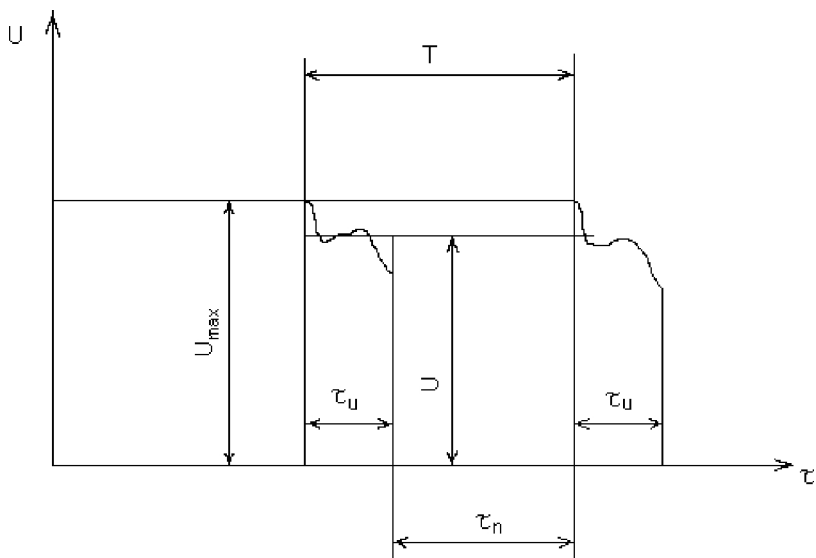


Рис.2. К расчету эффективной величины напряжения при импульсной ЭХО

$$U = \int_0^{\tau} \frac{f(U)d\tau}{\tau_u} \text{ или } \approx \frac{U_{\max} + U_{\min}}{2},$$

т.к. реальное время обработки τ_0 будет отличаться от машинного τ_p за счет пауз между импульсами, то τ_0 подсчитывается по формуле (3):

$$\tau_p = \frac{T^2}{\tau_u}. \quad (5)$$

Шероховатость поверхности заготовки после ЭХО колеблется в широких пределах и зависит от химического состава электролита и режимов обработки. Достижимы величины $Ra = 0.32 \dots 0.16$ мкм. Благодаря тому, что процесс съема материала при ЭХО идет на атомарном уровне без силовых и температурных нагрузок в поверхностный слой заготовки не вносятся остаточные напряжения, что чрезвычайно важно для деталей современных,

высоконагруженных ГТД. По данным исследователей введение ЭХО в технологический процесс благотворно сказывается на увеличении ресурса детали и предела длительной прочности.

Возможный дефект после ЭХО – растравливание по границам зерен по границе металла из-за неравномерности скоростей растворения. Для устранения дефекта оптимизируют состав электролита, с тем, чтобы выровнять скорости растворения фаз, входящих в материал в виде зерен и их границ.

Производительность обработки зависит в основном от мощности источника питания, скорости прокатки и электропроводности электролита.

Содержание работы

Работа состоит из двух частей. В первой части студенты изучают сущность ЭХО, закономерность формообразования поверхности, расчетным путем определяют время, необходимое для съема припуска заданной величины по схеме с неподвижным электродом-инструментом для разных величин начальных зазоров a_0 .

Во второй части работы – экспериментальной – студенты проводят исследования на экспериментальной установке ЭХО-12: снимают заданную величину припуска при разных величинах начального зазора, определяют избирательную способность электролита, измеряют шероховатость поверхности после ЭХО, сопоставляют расчетную и экспериментальную величины времени обработки.

Краткое описание конструкции установки ЭХО-12 и работы на ней

Принципиальная схема установки приведена на рис.3. Заготовка 1 устанавливается на стол 2 и прижимается прихватом

3 с закрепленным на нем токопроводе 4. Управление установкой осуществляется с помощью пульта управления. После закрепления детали включается прокачка электролита через электрод-инструмент 5. Электролит выбирается из бака 6 и прокачивается насосом 7. Электрод с помощью механического привода 8 подводится до касания с заготовкой, которое фиксируется по механическому индикатору 9. Затем электроды отводятся на заданный зазор. Величина зазора определяется по индикатору. Рабочие импульсы напряжения подаются на электроды от источника питания 10. Величины напряжения и тока контролируются по осциллографу 11. Для этого на пульте источника выведены две соответствующие клеммы.

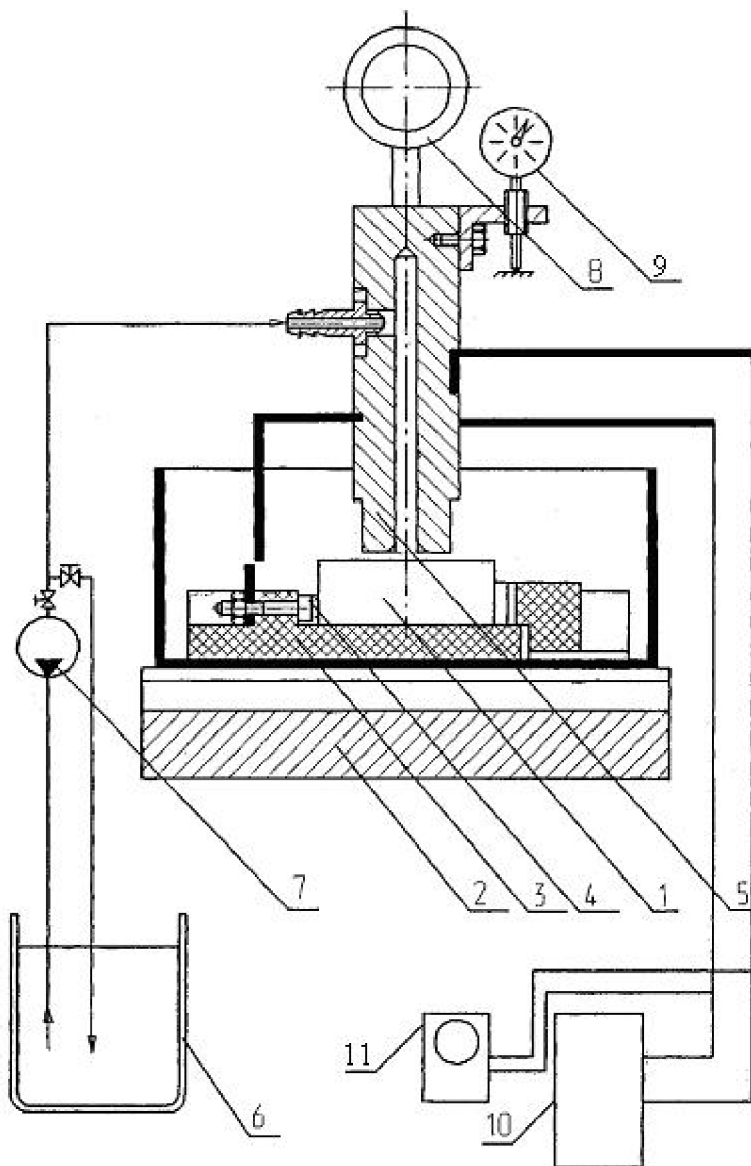


Рис. 3. Принципиальная схема экспериментальной установки

Порядок проведения эксперимента

1. Студент получает от преподавателя исходные данные для расчета:

a_0 , Z , $\Delta U=25\text{В}$, $\chi=6.72 \text{ Ом/м}$, $\varepsilon=0.0022 \text{ см}^3/\text{А}$, $\gamma=2.8 \text{ г/см}^3$, $\eta=1.0$.

2. Рассчитывается величина τ_0 , необходимая для съема величины припуска $Z=a_k - a_0$ для начальных зазоров a_{01} , a_{02} , a_{03} .

3. Взвесить на аналитических весах заготовки (образцы)

(Внимание! Нагружение весов осуществляется только в зафиксированном положении.)

4. Установить и закрепить заготовку на столе установки, включить прокачку электролита, выставить необходимую величину начального зазора a_{01} , включить источник питания, обработать заготовку на заданном режиме и в течение времени τ_0 .

По осциллографу определить величины U_{\max} , U_{\min} (посчитать $U_{\text{ср}}$), определить величины J_{\max} , J_{\min} ($J_{\text{ср}}$), определить по формуле (5) реальное время τ_p .

По окончании обработки и достижении времени τ_0 отключить ИП, извлечь образец, промыть, вытереть, взвесить на аналитических весах. Рассчитать величину объемного и линейного съема.

Величина линейного съема рассчитывается по формуле

$$a_k - a_o = \frac{\Delta P}{\gamma F_{\text{обр}}},$$

где $F_{\text{обр}}$ – площадь обрабатываемой поверхности (см^2);

ΔP – разность весов заготовки и обработанной детали (г).

5. Повторить переход 4 для зазоров a_{02} , a_{03} .

6. Построить теоретическую и экспериментальную зависимости $\tau_p = f(a_0)$ и $\tau_s = f(a_0)$. Сделать вывод о влиянии

начального зазора на производительность, шероховатость поверхности и локализацию процесса, о соответствии теоретических и экспериментальных результатов.

Контрольные вопросы

1. Какие классические законы используют при описании процесса ЭХО?
2. Какие химические реакции протекают на электроде-инструменте и заготовке в процессе ЭХО?
3. Назовите основные технологические показатели процесса ЭХО и их взаимосвязь.
4. Какие технологические схемы используются при электрохимической обработке деталей?
5. Назовите основные узлы установки ЭХО-12.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСОВ ТОКА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Цель работы: изучение основных закономерностей электроэрозионной обработки и закрепление теоретических знаний, полученных в лекционном курсе.

Теоретическая часть

Электроэрозионная размерная обработка (ЭЭО) в настоящее время не может считаться новым методом, однако она имеет исключительно важное значение для производства авиадвигателей, т.к. многие технологические проблемы двигателестроения без этого метода решить было бы невозможно. Такое значение ЭЭО обусловлено следующими достоинствами метода:

- могут обрабатываться электропроводные материалы любой твердости;
- сложность формы поверхностей заготовки не снижает технологичности детали;
- отсутствует силовое воздействие инструмента на заготовку, поэтому низкая жесткость деталей не снижает их технологичности.

Все эти факторы являются определяющими для авиадвигателестроения. Основными недостатками метода являются

его высокая энергоемкость, износ электрода инструмента, интенсивное тепловое воздействие на поверхностный слой и снижение его качества.

Развитие ЭЭО идет в настоящее время за счет совершенствования оборудования, схем обработки, и ограничения, обусловленные недостатками метода, ослабляются.

Электрической эрозией называют разрушение поверхностей под действием электрических разрядов. При ЭЭО удается сделать это разрушение управляемым.

При ЭЭО на заготовку и инструмент, помещенные в ванну с жидким диэлектриком, подается импульсное напряжение (до 200 В). При уменьшении межэлектродного зазора ($a=0,01\dots 0,15$) происходит пробой слоя диэлектрика с образованием канала разряда ($t_{\text{раз}} \approx 40000^\circ\text{C}$), при этом выделяется большое количество тепла, на поверхностях электрода образуются лунки, а металл из них испаряется ($t_{\text{пов}} \approx 10000^\circ\text{C}$).

Продукты эрозии выбрасываются в рабочую жидкость. Этот процесс многократно повторяется в пределах каждого импульса, при этом обеспечивается сьем материала с поверхности, а случайная комбинация лунок формирует микрогеометрию поверхностного слоя.

Механизм развития эрозионного процесса включает стадию повышения напряженности электрического поля в диэлектрике при уменьшении зазора (если $U_{\text{пр}}=160$ В, межэлектродный зазор $a=0,05$ мм, то $E_{\text{пр}} = U_{\text{пр}} / a = 3,2 \cdot 10^6$ В/м). При высокой напряженности свободные электроны в диэлектрике двигаются направленно и ионизируют атомы рабочей жидкости, образуется канал проводимости ($d_{\text{к.л}} \approx 0,1\dots 1$ мм), в котором электроны движутся к аноду, а положительные ионы к катоду (время пробоя $t_{\text{пов}} \approx 10^{-7}$ с), канал проводимости заполняется плазмой, в которой заметную долю

составляют электроны и ионы с поверхности электродов, мощность разряда может составлять $\approx 10^8$ кВт/см².

За время прохождения импульса в канале проводимости протекают сложные физические процессы – рабочая жидкость разлагается с образованием газового пузыря, свободного углерода и смолистых веществ, газовый пузырь быстро расширяется под действием внутреннего давления (до 20 МПа) и создает ударную волну (скорость до 200 м/с), смолистые вещества и углерод осаждаются на электродах и частичках металла.

После прекращения действия импульса давление в газовом пузыре постепенно падает, расплавленный металл выплескивается из лунок, ударная волна гасится. Далее все процессы в зазоре постепенно затухают и свойства диэлектрика восстанавливаются. Время ионизации рабочей жидкости $t_d = 10^{-6} \dots 10^{-2}$ с.

Подключение источника питания может осуществляться двумя способами:

- прямая полярность – заготовка подключена к аноду, реализуется при обработке короткими мощными импульсами ($t_u = 10^{-4} \dots 10^{-7}$), т.к. более интенсивный съем идет от воздействия легких, быстрых электронов. При этом тяжелые положительные ионы имеют небольшую кинетическую энергию, т.к. не успевают набрать скорость, поэтому они направляются на электрод-инструмент;
- обратная полярность – заготовка подключена к катоду, реализуется при обработке длинными импульсами ($t_u = 10^{-1} \dots 10^{-4}$), т.к. как интенсивный съем идет от воздействия тяжелых положительных ионов, набравших высокую скорость.

Правильный выбор полярности ЭЭО является важным условием снижения износа электрода-инструмента (ЭИ) и увеличения

производительности процесса. Относительный объемный износ ЭИ можно рассчитать по формуле $K_{об} = V_{эи} / V_{эз} \cdot 100\%$, где $V_{эи}$ и $V_{эз}$ – объемы металла, снятые с заготовки и инструмента за время обработки.

При прошивке отверстий оценка износа может быть проверена линейными характеристиками $K_{лин} = L_{эи} / L_{эз} \cdot 100\%$, где $L_{эи}$ и $L_{эз}$ – линейный сьем на заготовке и инструменте.

Величина износа инструмента при ЭЭО в значительной степени определяется выбором материала, из которого он изготовлен, все материалы, которые применяются для ЭИ в порядке убывания эрозионной стойкости можно расположить в ряд: графитовые материалы ($K_{об} = 0,5 \dots 70\%$), вольфрам ($K_{об} = 2 \dots 120\%$), медь ($K_{об} \leq 10 \dots 300\%$), латунь ($K_{об} = 10 \dots 300\%$), серый чугун ($K_{об} = 20 \dots 350\%$), алюминий и его сплавы ($K_{об} \leq 20 \dots 400\%$).

В настоящее время разработаны «безизносные» схемы источников питания для ЭЭО. На рис. 1 приведены гребенчатые импульсы, которые могут существенно снизить величину износа ЭИ. Гребенчатый импульс состоит из рабочих импульсов (5...20) и защитного импульса.

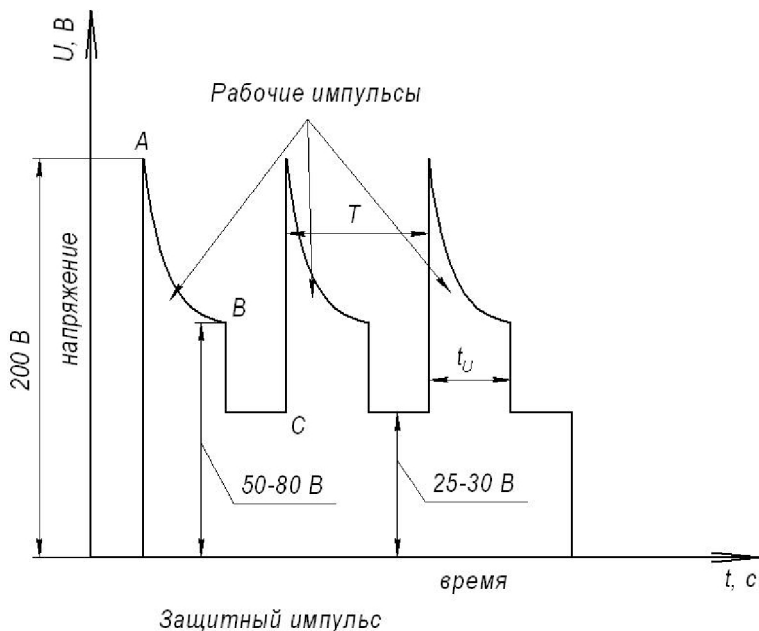


Рис. 1. Форма гребенчатого импульса

Рабочий импульс поджигает разряд и осуществляет съем металла. Защитный импульс поддерживает тепловой режим, способствующий разложению рабочей среды и осаждению на ЭИ защитной графитовой пленки. Далее разрушается в основном эта пленка и износ может снижаться в 10...50 раз.

Для проведения ЭЭО необходимо выбрать рабочую жидкость, которая должна выполнять ряд функций: предотвращать переход искрового разряда с дуговой; охлаждать зону обработки, удалять продукты эрозии с поверхности электродов. Все эти функции будут достигнуты, если рабочая жидкость будет иметь оптимальную вязкость, высокую электрическую прочность, низкую испаряемость и химическую активность, высокую температуру вспышки (более 60°C), хорошую фильтруемость, высокую охлаждающую и моющую способность, низкую токсичность и стоимость. В современных

процессах ЭЭО находят применение керосин, масла индустриальные с пониженной вязкостью (трансформаторное и др.), специальные углеводородные жидкости, дистиллированная вода. Совмещенная ЭЭО и ЭХО проводится в электролитах.

Для оценки электроэрозионной обрабатываемости различных материалов можно оценить по критерию Л.С. Палатника:

$$P = c \rho \lambda T_{пл}^2,$$

где c – удельная теплоемкость, ρ – плотность материала, λ – коэффициент теплопроводности, $T_{пл}$ – температура плавления материала. Чем меньше величина критерия P , тем больше съем и выше обрабатываемость. Для оценки обрабатываемости можно использовать стандартный коэффициент обрабатываемости (по отношению к Ст 45). Величина этого коэффициента для различных материалов может составлять для твердых сплавов $K_{обр}=0,1..0,3$; для жаропрочных сплавов $K_{обр}=1,3..1,7$; для нержавеющей сталей $K_{обр}=1,2..1,3$; для чугунов $K_{обр}=0,6..1,0$ и т.д.

Опыт использования ЭЭО, накопленный в авиадвигателестроении, позволяет рекомендовать следующие режимы обработки (табл. 1).

Таблица 1. Режимы и технологические показатели ЭЭО.

Параметры ЭЭО	Электроискровой режим	Электроимпульсный режим
Напряжение, В	$U \leq 200 \dots 250$	$U = 200 \dots 250$
Длительность импульсов, с	$t_{\text{и}} = 10^{-4} \dots 10^{-7}$	$t_{\text{и}} = 10^{-1} \dots 10^{-4}$
	$q \geq 5 \dots 10$	$q < 5$
Частота импульсов, кГц	$f = 1 \dots 880$	$f = 0,1 \dots 2$
Средняя величина тока, А	$J_{\text{ср}} = 40 \dots 50$	$J_{\text{ср}} = 30 \dots 500$
Энергия импульсов, Дж	$W_{\text{и}} = 2 \dots 3$	$W_{\text{и}} \geq 5 \dots 10$
Полярность	прямая	обратная
Рабочая жидкость	керосин, вода, эмульсии, углеводородные жидкости	Индустриальное масло
Межэлектродный зазор, мм	$0,02 \dots 0,1$	$0,05 \dots 0,2$
Интенсивность съема, мм ³ /мин	до 500	15000
Шероховатость	от $R_z = 40 \dots 80$ до $R_a = 0,63$	$R_z = 200 \dots 500$
Точность, мм	$0,02 \dots 0,2$	$0,1 \dots 0,5$
Дефектный слой, мм	$0,04 \dots 0,3$	$0,25 \dots 0,55$
Энергетические затраты, кВт·ч/кг	$15 \dots 70$	$8 \dots 25$

Аналитически рассчитать съем металла при электроэрозионной обработке (ЭЭО) практически невозможно из-за большого числа неизвестных и непостоянных факторов. В общем виде съем металла оценивают по формуле

$$V = 60 \psi V_{\text{и}} f, \quad (1)$$

где V – объем снятого металла в единицу времени, мм³;

ψ – коэффициент, учитывающий количество рабочих импульсов (вызывающих эрозию);

$V_{\text{и}}$ – объем металла, удаляемый за один импульс, мм³;

f – частота следования импульсов, Гц.

Объем металла, удаляемого за один импульс $V_{\text{и}}$, определяется экспериментально и зависит от мощности и длительности импульсов

тока, материалов электрода-заготовки (ЭЗ) и электрода-инструмента (ЭИ), рабочей среды, скорости ее прокачки.

Коэффициент ψ также определяется экспериментально. При оптимальных режимах ЭЭО $\psi = 0,75 \dots 0,85$.

Важными факторами, влияющими на съем металла при ЭЭО, являются временные параметры импульсов тока: длительность импульса t_u , частота f , период T , скважность $q=T/t_u$ (Рис. 1).

Увеличение длительности импульса t_u при постоянных значениях T , U , J приводит к увеличению энергии импульса, следовательно, к увеличению съема металла с электродов.

Увеличение частоты следования импульсов f , как следует из формулы (1), должно приводить к увеличению съема металла с электродов. Однако превышение оптимальных для данных условий значений частоты импульсов f уменьшает число рабочих импульсов, т.е. коэффициент ψ . Это происходит из-за того, что диэлектрическая прочность межэлектродной среды не успевает восстанавливаться после очередных разрядов. Кроме того, увеличение частоты следования импульсов f приводит к уменьшению длительности t_u , а, следовательно, и к уменьшению съема металла.

Порядок выполнения работы

Лабораторную работу можно разделить на два этапа, раскрывающие основные закономерности процесса ЭЭО.

В первом этапе исследуется влияние частоты следования импульсов ($f=1/T$) на скорость обработки, износ электрода-инструмента, разбивку (погрешность) диаметра обработанного отверстия ($\Delta d=d_{отв}-d_{эи}$).

Во втором этапе работы изучается влияние на эти технологические характеристики скважности импульсов ($q=T/t_u$). Экспериментальные исследования выполняются на

электроэрозионном станке 4Г721М, который работает с источником питания ШГИ. Перед началом выполнения работы студенты изучают инструкции по работе с оборудованием и по технике безопасности.

В качестве образцов используются пластины из различных материалов толщиной S (по заданию преподавателя), в качестве электрода-инструмента используются цилиндрические стержни длиной $L_{\text{нач}}$ и диаметром $d_{\text{эл}}$ (по заданию преподавателя).

Последовательность выполнения работы

ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

1. Изучить инструкцию по работе на станке и инструкцию по технике безопасности.
2. Изучить инструкцию к лабораторной работе.
3. Ответить на вопросы преподавателя и получить индивидуальное задание.
4. Измерить толщину заготовки S и результаты занести в протокол.
5. Измерить длину электрода-инструмента $L_{\text{нач}}$ и его диаметр $d_{\text{эл}}$ и занести в протокол.
6. Установить электрод-инструмент на станке.
7. Установить заготовку на столе станка, используя специальную оснастку и обеспечивая перпендикулярность пластины и электрода-инструмента.
8. Установить на панели генератора импульсов переключатели режима ЭЭО в заданные положения (по указанию преподавателя) и записать в протокол.
9. Установить частоту следования импульсов 8 кГц.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

I этап

1. Провести обработку сквозного отверстия, регистрируя время $t_{обр}$, величины тока J , напряжения U . Полученные значения записать в протокол (табл. 3).
2. Снять электрод-инструмент, измерить его длину $L_{кон}$, результаты измерения записать в протокол.
3. Провести обработку и измерения по пунктам 1 и 2 еще два раза при частотах, указанных преподавателем ($f=22, 44, 66, 200$ кГц в соответствии с параметрами источника).
4. Измерить диаметры полученных отверстий и занести в протокол $d_{отв}$.

II этап

1. Установить частоту следования импульсов напряжения по указанию преподавателя. Измерить начальную длину $L_{нач}$ ЭИ и записать в протокол (табл. 3).
2. Установить скважность импульсов q_1 (задается преподавателем q_1, q_2, q_3 для проведения трех экспериментов)
3. Провести обработку трех сквозных отверстий для скважностей q_1, q_2, q_3 , измеряя после обработки каждого отверстия длину электрода $L_{кон}$ и регистрируя время прошивки, величины тока и напряжения. Результаты занести в протокол.
4. Измерить диаметры полученных отверстий и занести в протокол.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1. Вычислить величину торцевого износа ЭИ для каждого опыта по формуле $\Delta L_{\text{изн}} = L_{\text{нач}} - L_{\text{кон}}$ и рассчитать коэффициент линейного износа
$$K_{\text{лин}} = \frac{\Delta L_{\text{изн}}}{S} \cdot 100\% .$$
2. Определить величину скорости прошивки $v = S/t_{\text{обр}}$.
3. Определить величину «разбивки» диаметра $\Delta d = d_{\text{отв}} - d_{\text{эи}}$.
4. Построить графические зависимости $K_{\text{лин}} = \varphi_1(t)$, $v = \varphi_2(t)$, $\Delta d = \varphi_3(t)$ (рис. 3).
5. Построить графические зависимости $K_{\text{лин}} = \psi_1(q)$, $v = \psi_2(q)$, $\Delta d = \psi_3(q)$ (рис. 3).

Контрольные вопросы

1. От каких факторов зависит съём металла с электродов при ЭЭО?
2. Нарисуйте форму импульсов тока и назовите их параметры. Напишите формулы, связывающие f , T , q , v , t .
3. Объясните влияние скважности импульсов q на скорость прошивки отверстия v , торцевой износ ЭИ и диаметр отверстия $d_{\text{отв}}$.
4. Объясните понятия прямой и обратной полярностей.
5. Назовите пути уменьшения износа электрода-инструмента.

Отчет по лабораторной работе

студент (Ф.И.О., № группы)

Характеристики ЭИ и ЭЗ:

материал ЭИ ; = мм;

материал ЭЗ ; = мм.

Рабочая среда

Полярность

Таблица 2. Режим ЭЭО

Назначение переключателя на лицевой панели генератора импульсов	Номер позиции в схеме описания установки*	Положение переключателя	Значение параметра режима
Переключатель числа силовых импульсов	23		
Переключатель числа выходных каскадов силовых блоков	24		
Переключатель скважности силовых импульсов	3		
Переключатель напряжения поджигающих импульсов	2		
Переключатель скважности поджигающих импульсов	4		
Переключатель частоты силовых импульсов	5	-	8;22;44;66;88;200 кГц
Переключатель силовых и защитных импульсов	6		
Переключатель паузы между защитными импульсами	7		
Переключатель длительности защитных импульсов	8		

*Номера позиций представлены на рис. 2.

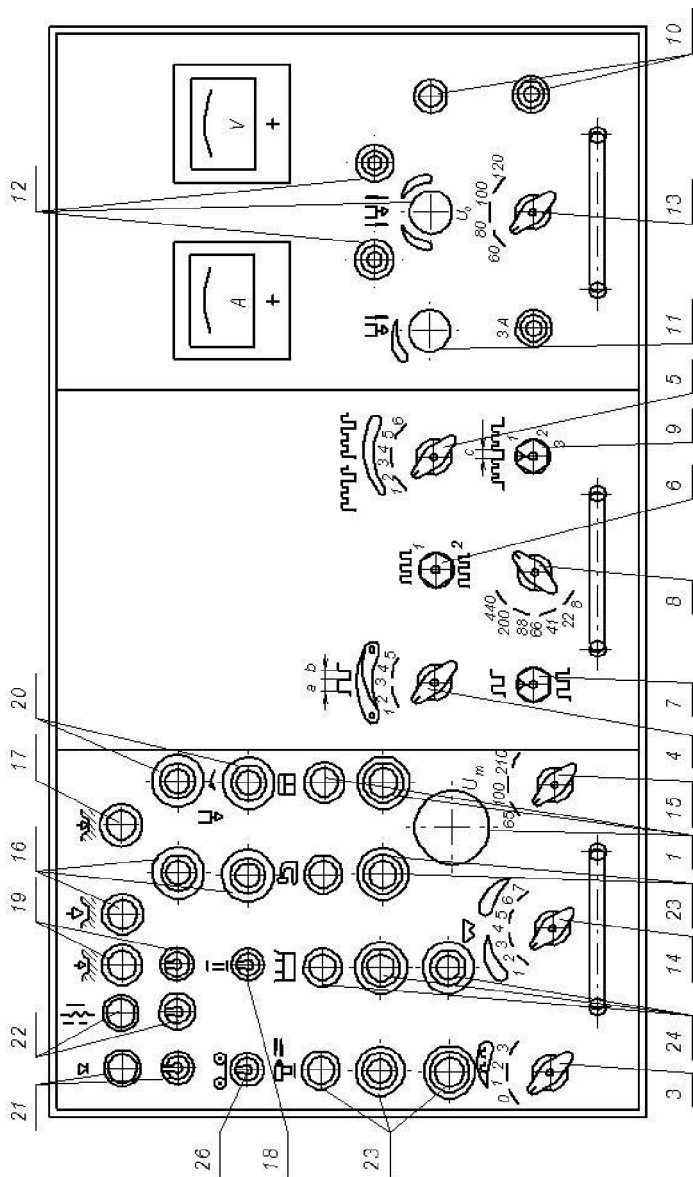


Рис. 2. Лицевая панель генератора

Таблица 3. Результаты эксперимента

Этап	№ опыта	f , Гц	q	$t_{обр}$, с	U , В	J , А	$L_{нач}$, мм	$L_{кон}$, мм	$\Delta L_{узн}$, мм	$d_{отв}$, мм	v , мм/МИН	Δd , мм	$K_{плн}$, %
I	1												
	2												
	3												
II	1												
	2												
	3												

Расчет параметров

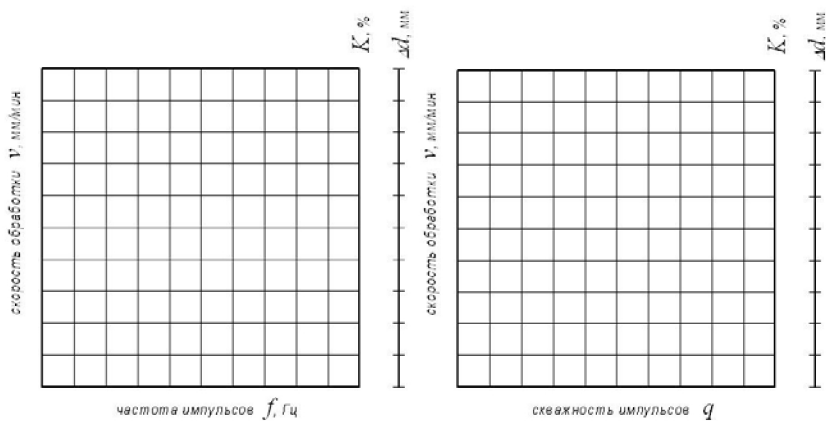


Рис. 3. Форма графиков экспериментальных зависимостей

Выводы по работе

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РАЗМЕРНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ

Цель работы: закрепить теоретические знания в области технологии физико-химических методов обработки материалов, изучить конструкцию и работу ультразвукового станка, определить влияние различных факторов на производительность ультразвуковой размерной обработки.

Общие сведения

Быстрое развитие машиностроения, радиотехники, электроники и приборостроения потребовало широкого применения различных материалов, среди которых много труднообрабатываемых обычными методами резания. К таким материалам можно отнести жаропрочные, магнитные стали и твердые сплавы, полупроводниковые материалы (кремний, германий), радиокерамику, алмазы, ферриты, рубин, кварц, керсил, люкор, термосил, ситалы и другие. Они характеризуются высокой твердостью и повышенной хрупкостью.

При изготовлении деталей из перечисленных материалов широкое распространение получила ультразвуковая размерная обработка. Она представляет собой разновидность процесса механической обработки. Принцип ее заключается в скалывании

микрочастиц материала с обрабатываемой поверхностью зернами абразива, получающими энергию от инструмента, совершающего колебания с ультразвуковой частотой (16—30 кГц).

Большое число одновременно ударяющихся о поверхность зерен, высокая частота повторения ударов обеспечивают интенсивный съем обрабатываемого материала. Образующееся при этом углубление копирует форму рабочей части инструмента. Ультразвуковая обработка наиболее эффективно протекает в жидкой среде, так как кавитационные явления в жидкости, возникающие в результате колебаний инструмента, способствуют более интенсивному перемешиванию абразивных зерен в рабочей зоне и замене изношенных зерен новыми (рис. 1).

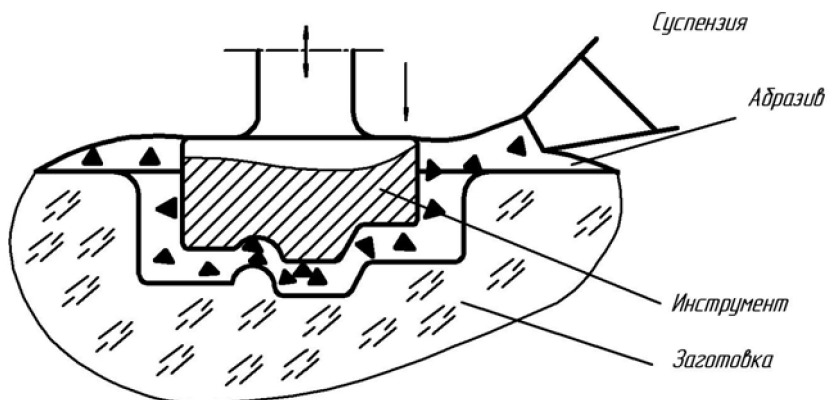


Рис. 1. Схема процесса обработки

Размерная ультразвуковая обработка твердых и хрупких материалов получила в настоящее время практическое применение при осуществлении самых разнообразных технологических операций: разрезания, обработки сквозных и глухих отверстий, гравирования, нанесения рельефных изображений, вырезания по контуру инструментом-проволочкой и др.

Принципиальная схема ультразвуковой установки

Основными узлами ультразвуковой установки являются: I — колебательная система с рабочим инструментом; II — источник питания; III — система подачи абразивной суспензии и прижима инструмента к детали (рис. 2).

Колебательная система преобразует электрические колебания источника тока в механические колебания инструмента. Это осуществляется при помощи магнитострикционного сердечника 1, обладающего способностью изменять свои размеры в зависимости от величины проходящего через сердечник магнитного потока, который наводится током ультразвуковой частоты, пропускаемым через обмотку 2. Если по последней будет протекать только переменный ток от ультразвукового генератора 3, то сердечник будет деформироваться с удвоенной частотой. Это происходит по той причине, что изменение размеров сердечника не зависит от направления магнитного поля. Чтобы частота колебаний излучателя была равна частоте возбуждающего тока, на обмотку подается постоянное напряжение, называемое напряжением поляризации (источник постоянного тока 4). Преобразователь, работающий на таком принципе, называется поляризованным. Без подмагничивания величина относительной деформации магнитострикционного стержня

$\left(\frac{\Delta l}{l} \right)$ очень мала (10^{-4} - 10^{-6} мкм). Наличие же поляризации

увеличивает амплитуду деформации A во много раз при одинаковых значениях амплитуды переменной магнитной индукции B .

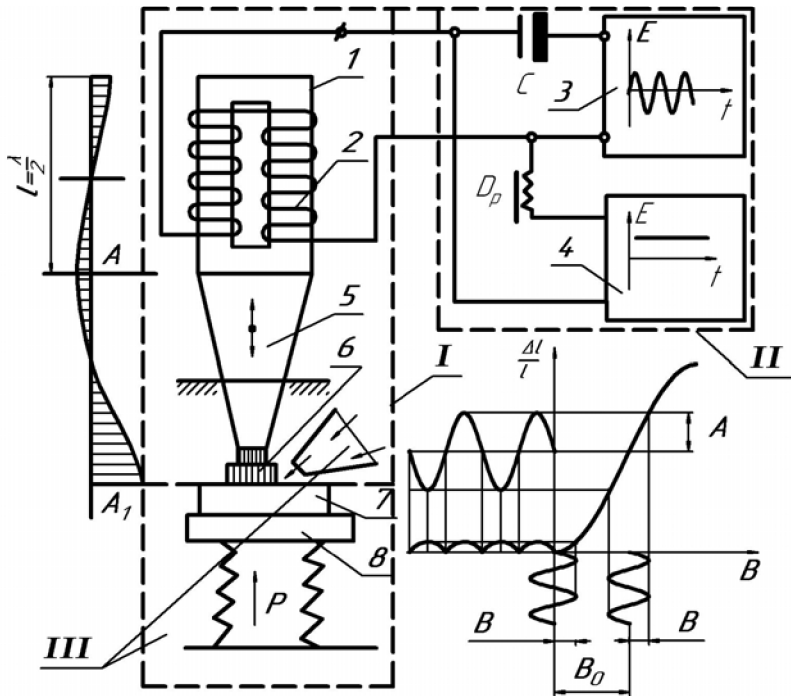


Рис. 2. Принципиальная схема ультразвуковой установки

К нижнему торцу магнестрикционного сердечника крепится концентратор 5, на конце которого устанавливается инструмент 6. Концентратор трансформирует колебания малой амплитуды (A), подводимые к большой площади, в колебания большой амплитуды, возникающие на малой площади (A_1). Среди различных концентраторов (конусный, экспоненциальный, катеноидальный, ступенчатый) широкое распространение получил ступенчатый. Он прост в изготовлении и имеет наибольший коэффициент усиления.

При ультразвуковой обработке в рабочую зону (в зазор между обрабатываемой поверхностью и рабочим торцом инструмента) подается абразивная суспензия и создается усилие прижима инструмента (P) к детали 7, установленной на предметном столике 8.

Производительность размерной ультразвуковой обработки

Производительность является одной из важнейших технологических характеристик размерной ультразвуковой обработки. Она определяется средней минутной подачей инструмента S_{1p} [мм/мин] или средним минутным объемным съемом материала V [мм³/мин]. Производительность метода зависит от многих технологических и акустических параметров и условий обработки (физико-механических свойств обрабатываемого материала, размеров зерна и режущих свойств его, частоты и амплитуды колебаний инструмента и др.).

Физико-механические свойства обрабатываемых материалов оказывают очень большое влияние на производительность обработки: чем больше критерий хрупкости материала t_x , тем лучше его обрабатываемость ультразвуковым методом:

$$t_x = \frac{\tau_p}{\sigma_p},$$

где τ_p — сопротивление сдвигу;

σ_p — сопротивление отрыву.

Наличие даже небольшой пластичности резко снижает производительность (табл. 1).

Таблица 1. Производительность обработки на разных материалах

Обрабатываемый материал	Относительная обрабатываемость	Примечание
Титанат бария	1,1	$t_x > 2$
Стекло	1,0	
Ферриты	0,75-0,85	
Кремний	0,4-0,7	
Керамика	0,4-0,5	
Агат	0,3-0,35	
Рубин	0,12-0,18	
Твердый сплав	0,02-0,05	$1 < t_x < 2$
Сталь (незакаленная), латунь, свинец	0,01-0,005	$t_x < 1$

Абразивы, применяемые при ультразвуковой размерной обработке, обладают высокой твердостью, прочностью и незначительной хрупкостью. От этих физико-механических показателей в основном и зависит относительная режущая способность абразивных материалов (табл. 2), а следовательно и производительность процесса.

Таблица 2. Режущая способность абразивных материалов

Наименование абразивного материала	Относительная режущая способность
Алмаз	1,0
Эльбор	1,1
Карбид бора	0,5-0,6
Карбид кремния	0,25-0,45
Электрокорунд	0,14-0,16

Абразивные материалы выдерживают большие удельные нагрузки и температуры. Однако ударное воздействие инструмента частично разрушает зерна, что снижает производительность обработки. Поэтому для исключения последнего в рабочей зоне

необходимо обеспечить непрерывную сменяемость абразивного материала.

Концентрация абразива в жидкости обычно составляет 30-40%. При прокачке абразивной суспензии через полый инструмент под давлением концентрация абразива может быть уменьшена до 20 %.

Влияние статического давления (усилия прижима P) инструмента на производительность процесса значительна. Экспериментально установлено, что для определенной площади обработки, амплитуды колебаний инструмента и зернистости абразива существует оптимальное давление, при котором производительность максимальна.

Чем больше амплитуда и частота колебаний инструмента, его периметр, а также размеры зерна, тем выше производительность процесса. Однако, как показывают экспериментальные исследования, это возможно при определенном соотношении амплитуды и размеров абразивного зерна.

Отношение $\frac{2A}{d_a}$, при котором наблюдается максимальное значение производительности, равно 0,6—0,8. При очень малых зернах и больших амплитудах колебаний ($\frac{2A}{d_a} > 1$) наблюдается чрезмерная нагрузка на абразив, приводящая к дроблению зерен, а не к внедрению их в обрабатываемую поверхность. В случае использования крупных зерен при малых амплитудах колебаний инструмента ($\frac{2A}{d_a} < 0,5$) снижение производительности можно объяснить недостаточным для внедрения зерен и разрушения материала импульсом ударной силы.

Увеличение площади инструмента приводит к снижению производительности процесса ультразвуковой обработки. Это

объясняется ухудшением условий поступления в рабочую зону свежего абразива и удаления частиц обрабатываемого материала, а также возможным снижением амплитуды колебаний. Аналогично изменение производительности процесса с увеличением глубины обрабатываемой полости. Все это подтверждается на практике.

Содержание работы

Лабораторную работу можно подразделить на две части. В первой студент знакомится с материалами, раскрывающими физическую сущность ультразвуковой обработки, принципиальную схему и конструкцию ультразвукового станка, а также влияние различных факторов на производительность процесса ультразвуковой обработки. Во второй - проводит исследование по установлению влияния статического давления на производительность метода.

Экспериментальные исследования выполняются на ультразвуковом станке 4770У.

Технические характеристики станка

Диаметр обрабатываемого отверстия		1-5 мм
Максимальная глубина обработки		5мм
Максимальная площадь обработки		20 мм ²
Точность отсчета глубины обработки		0,01 мм
Механическая производительность по стеклу		50 мм ³ /мин
Предел регулирования статического давления		0,1—0,8 даН
Резонансная частота колебаний системы		22 ± 7,5% кГц
Максимальная амплитуда инструмента		15—20 мкм
Акустическая мощность		0,05—0,10 кВт
Способ подачи суспензии		вручную
Вес станка		15 кг

Обрабатываемым материалом является стекло, материалом инструмента - сталь 45, размер зерна $-d_f = 60 - 50$ мкм (зернистость № 5). Исследования проводим при обработке отверстия $d_0 = 2$ мм.

Последовательность выполнения работы

1. Изучить инструкцию к работе и инструкцию по технике безопасности при работе на ультразвуковом станке (приложение 2).

2. Определить характер изменения производительности ультразвуковой размерной обработки от усилия прижима P (статического давления) и построить зависимость для заданных условий ведения процесса

$$Q = f(P), Q_{cp} = \frac{h}{t},$$

где h — глубина отверстия,

t — время обработки.

Статическое давление на станке устанавливается с помощью тарированных грузиков по показанию индикатора.

Порядок работы на станке

1. Проверить готовность станка к работе.
2. Включить генератор «Накал».
3. Закрепить на столике станка стеклянную пластинку.
4. Установить статическое давление.
5. Подготовить абразивную суспензию и подать кисточкой в зону обработки.
6. Включить тумблер «Анод» на генераторе и настроить резонансную частоту, засечь начало обработки по секундомеру.
7. При достижении необходимого времени обработки выключить генератор («Анод») и по индикатору определить глубину отверстия.
8. По окончании работы на станке выключить генератор («Анод», «Накал»), слить воду, охлаждающую стриктор, протереть стол и станок, убрать рабочее место.

Контрольные вопросы

1. Опишите механизм разрушения материала при ультразвуковой размерной обработке свободным абразивом.
2. Назовите основные технологические показатели ультразвуковой размерной обработки.
3. Из каких элементов состоит ультразвуковая колебательная система?
4. Каковы области использования различных технологических схем ультразвуковой размерной обработки?
5. Как влияет смена абразивной суспензии на производительность процесса обработки?

ПРИЛОЖЕНИЕ

Инструкция по технике безопасности для работы на ультразвуковом станке 4770У

1. Категорически воспрещается работать на установке при снятом кожухе генератора и выпрямителя.
2. При ремонтных работах, при установке или замене отдельных элементов всю установку следует отключить от сети.
3. Приступить к опробованию и эксплуатации установки можно только после ее заземления.
4. Для ремонта и накладки установки может быть использован только квалифицированный персонал, аттестованный комиссией и имеющий допуск IV группы.
5. Работу на станке осуществляет лаборант.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Цель работы: закрепление теоретических знаний по курсу "Технология двигателей летательных аппаратов", получение практических навыков работы на электроэрозионных станках, приобретение опыта экспериментальных исследований.

Общие сведения

Широкое использование в современной машиностроительной, приборостроительной и инструментальной промышленности всевозможных металлов и сплавов, обладающих высокими механическими свойствами, вызывает большие трудности при их механической обработке. Ряд материалов не поддается обработке резанием лезвийным инструментом. Применение электроэрозионной обработки не только позволило изготавливать детали машин и приборов из высокопрочных материалов, но и создавать новые конструкции узлов и деталей, которые ранее были невыполнимы средствами обычной технологии.

Электроэрозионный способ обработки токопроводящих материалов был предложен в 1943 году советскими учеными Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко.

Электроэрозионная обработка основана на эффекте расплавления и испарения микропорций металла под воздействием импульсов электрической энергии в канале разряда, ограниченном поверхностью обрабатываемой заготовки и электрода-инструмента, погруженных в жидкую (обычно неэлектропроводную) среду (керосин, органические масла, вода). Следующие друг за другом импульсные разряды производят выплавление и испарение материала с обрабатываемой поверхности, развивающиеся в жидкости гидродинамические силы выбрасывают расплавленный материал из зоны разрядов, электрод-инструмент получает возможность внедряться в заготовку, образуя в ней углубление, соответствующее форме инструмента (рис. 1а...к).

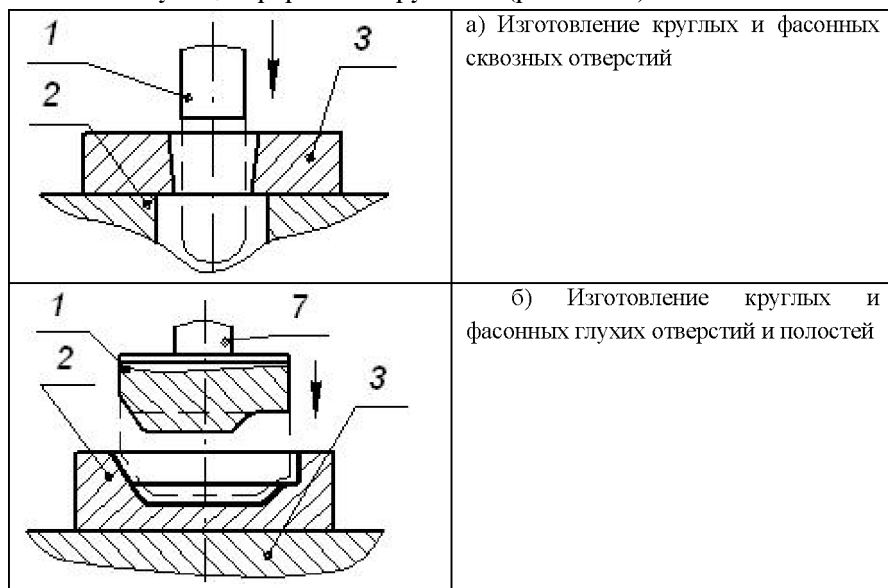


Рис. 1. Принципиальные схемы электроэрозионной обработки поверхностей:

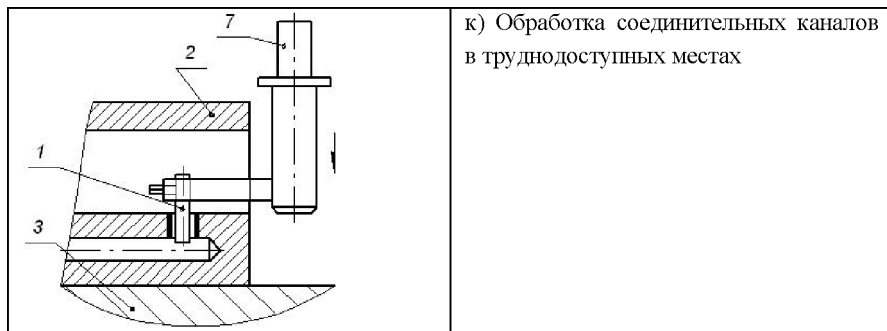
- 1 - электрод-инструмент, 2 - заготовка, 3 - стол станка, 4 - кондукторная втулка, 5 - подающие ролики, 6 - оправка для подвода рабочей жидкости в зону обработки, 7 - хвостовик для крепления инструмента в шпинделе электроэрозионного станка (см. также с. 96...98)

	<p>в) Обработка отверстий малых размеров</p>
	<p>г) Обработка глубоких отверстий с принудительной подачей рабочей жидкости через внутреннюю полость инструмента</p>
	<p>д) Обработка простых и сложных отверстий больших размеров методом трепанации с подачей рабочей жидкости через технологическое отверстие в заготовке</p>

Продолжение рис 1.

	<p>е) Обработка глухих плоскостей с принудительной подачей жидкости и вибрацией электрода-инструмента</p>
	<p>ж) Электроэрозионное формообразование профиля пера лопатки ГТД с вибрацией электрода-инструмента</p>
	<p>з) Одновременная обработка большого (до 8000-10000 шт.) количества отверстий различной формы</p>
	<p>и) Обработка конических и других сложно-пространственных сквозных и глухих отверстий</p>

Продолжение рис 1.



Окончание рис. 1.

Основными параметрами электрических импульсов, подаваемых к межэлектродному промежутку, является их частота повторения f , длительность $t_{и}$, амплитуда технологического напряжения и тока (U_m , I_m) и скважность q , а также форма импульса (рис. 2):

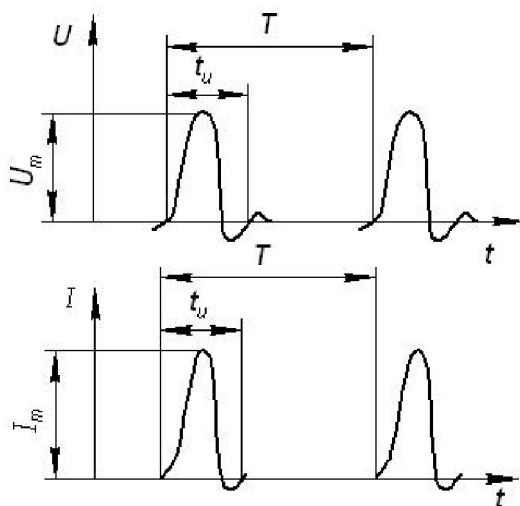


Рис. 2. Импульсы напряжения и тока: U - импульс на электродах, I - ток в межэлектродном промежутке

$$f = \frac{I}{T}, \quad q = \frac{T}{t_u} \text{ или } q = \frac{I}{t_u f}.$$

При электроэрозионной обработке амплитуда напряжения изменяется от нескольких вольт до нескольких сотен вольт, а амплитуда тока - от долей ампера до десятков тысяч ампер. Скважность импульсов q может изменяться от 1 до 30.

Высокие температуры (до 10000°C) в канале разряда и происходящие динамические процессы вызывают эрозию обоих электродов. Повышение эрозии одного электрода по сравнению с другим электродом называется полярным эффектом. Полярный эффект определяется материалом электродов, энергией и длительностью импульсов, знаком подаваемого на электрод потенциала. Обрабатываемую заготовку присоединяют к тому полюсу, эффект эрозии которого в данных условиях больше. Например, при коротких импульсах ($t_{и} = 10^{-8} \dots 10^{-5}\text{c}$) электроэрозионной обработки энергия преимущественно поступает на анод, в качестве которого здесь следует использовать заготовку (прямая полярность). При увеличении длительности импульса ($t_{и} = 10^{-4} \dots 10^{-1}\text{c}$) наступает перераспределение теплового потока на электродах, что обуславливает увеличение эрозии катода и уменьшение эрозии анода. В этом случае следует применять обратную полярность, используя заготовку в качестве катода.

Эффект эрозии различных металлов и сплавов, производимый одинаковыми по своим параметрам электрическими импульсами, различен. Зависимость интенсивности эрозии от свойств металлов называют электроэрозионной обрабатываемостью. Различное влияние импульсных разрядов на металлы и сплавы зависит от их теплофизических констант: температуры плавления и кипения, теплопроводности и теплоемкости. Механические свойства металлов, их твердость и вязкость на эффект эрозии не влияют.

Установлено, что чем выше температура плавления и кипения материала, тем ниже его электроэрозионная обрабатываемость.

В электроэрозионном процессе участвуют электрод-заготовка и электрод-инструмент. Как первый, так и второй подвергаются эрозионному износу (разрушению). Стойкость материала электрода-инструмента (ЭИ) оценивается объемным относительным износом, т.е. отношением объема материала, снятого с инструмента, к объему материала, удаленного с заготовки за одно и то же время (например, за время обработки на данной операции):

$$\gamma_v = \frac{V_{э.и}}{V_{заг}} \cdot 100\% .$$

При формообразовании отверстий удобно пользоваться относительным линейным износом:

$$\gamma_l = \frac{\Delta l_{э.и}}{h_{отв}} ,$$

где $\Delta l_{э.и}$ — износ инструмента за время обработки отверстия глубиной h .

Все материалы, которые применяются для изготовления электрода-инструмента, можно расположить в ряд в порядке уменьшения эрозионной стойкости: материалы на основе углеграфита, медь, материалы на основе меди, серый чугун, алюминиевые сплавы.

Формирование импульсов электрической энергии, подводимых к межэлектродному промежутку, осуществляется с помощью специальных генераторов импульсов. Разработано много различных схем и конструкций генераторов, создающих электрические импульсы самых различных энергий, длительности и частоты повторения. В большинстве схем применяются два основных метода генерирования импульсов: с использованием различных

накопителей энергии (рис. 3а) и с прямой коммутизацией энергии источника питания (рис. 3б).

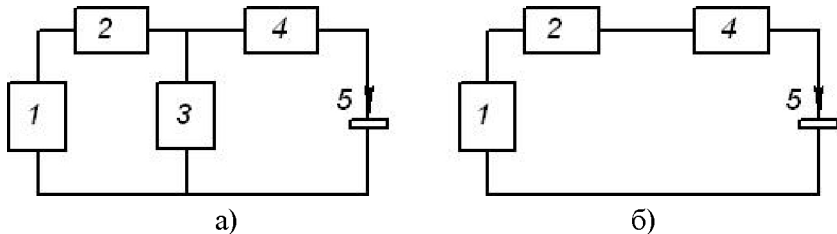


Рис. 3. Принципиальная схема генератора электрических импульсов:
а - с большой скважностью, б - с малой скважностью

В первом случае генератор импульсов работает по следующему циклу. От источника электрической энергии *1* через токоограничивающую цепь *2* накопитель *3* запасает некоторое количество электрической энергии. Последняя с помощью коммутирующего устройства *4* направляется в межэлектродный промежуток *5*, где выделяется в виде импульса большой мощности, вызывая эрозию. В качестве источника электрической энергии используется источник постоянного тока низкого напряжения (100...250 В). Токоограничивающая цепь *2* обеспечивает поступление электрической энергии в накопитель *3* в паузы между рабочими импульсами и, по возможности, предотвращает ее поступление в накопитель и межэлектродный промежуток непосредственно от источника питания в момент прохождения импульса. В качестве накопителя энергии применяют чаще всего электрические конденсаторы, которые способны аккумулировать энергию, а затем отдавать ее в виде коротких импульсов большой мощности. В рассматриваемом методе генерирования импульсов специальные коммутирующие устройства *5* не применяются. Их функции выполняет межэлектродный промежуток *5* (рис. 4).

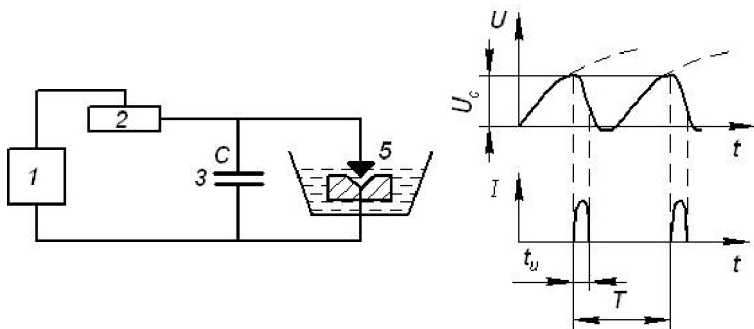


Рис. 4. Принципиальная схема генератора R C: 1 - источник тока, 2 - токоограничивающее сопротивление, 3 - конденсатор, 5 - межэлектродный промежуток

При генерировании импульсов по второму методу (рис. 3, б) от источника питания *1* через токоограничивающую цепь *2* и коммутирующее устройство *4* в межэлектродный промежуток *5* поступает электрическая энергия в те моменты, когда коммутирующее устройство находится в проводящем состоянии. Длительность и скважность получаемых импульсов задаются коммутирующим устройством, а амплитуда тока - величиной напряжения источника питания *1* и сопротивлением токоограничивающей цепи.

Технологические характеристики электроэрозионной обработки

Производительность обработки

Производительность обработки импульсами электрического тока определяется количеством металла, снятого с обрабатываемой заготовки в единицу времени. Обычно производительность измеряется в $\text{мм}^3/\text{мин}$ или $\text{г}/\text{мин}$.

Производительность электроэрозионной обработки зависит от большого числа факторов: электроэрозионной обрабатываемости

материала заготовки; мощности, реализуемой в межэлектродном промежутке; рабочей среды; правильного выбора материала электрода-инструмента, глубины и площади обрабатываемой поверхности и др.

В первом приближении можно считать, что производительность обработки (при прочих равных условиях) пропорциональна мощности, полезно используемой в межэлектродном промежутке:

$$Q = KP, \quad (1)$$

где K - коэффициент, зависящий от теплофизических констант материала заготовки и условий обработки;

P - мощность, Вт.

$$\text{Здесь } P = W f, \quad (2)$$

где W - энергия импульса, Дж;

f - частота следования импульсов, Гц.

Для генераторов импульсов, в которых накопителем энергии является конденсатор (рис. 3а, 4), энергия импульса

$$W = \frac{CU_c^2}{2}, \quad (3)$$

где C - емкость конденсатора, мкФ;

U_c - напряжение на конденсаторе (на электродах), В, при котором наступает пробой промежутка.

Частота следования импульсов

$$f = \left[RC \ln \left(\frac{U}{U - U_c} \right) \right]^{-1}, \quad (4)$$

где R - токоограничивающее сопротивление, Ом;

U - напряжение источника тока, В.

Величину R можно определить из формулы $R = \frac{U}{I_{к.з}}$, где $I_{к.з}$ -

ток короткого замыкания, наблюдаемый в момент контакта

электродов (определяется по выбору - амперметру, установленному на электроэрозионном станке).

Качество поверхности

Качество поверхности заготовки, обработанной импульсами электрического тока, характеризуется степенью шероховатости и глубиной дефектного слоя.

Микрорельеф поверхности после электроэрозионной обработки образуется путем наложения друг на друга лунок, образованных в материале единичными электрическими разрядами.

Геометрические параметры лунок можно установить из следующих эмпирических зависимостей:

$$D_{л} = K_1 W^{\frac{1}{3}}; H_{л} = K_2 W^{\frac{1}{3}}, \quad (5)$$

где $D_{л}$ - диаметр лунки;

$H_{л}$ - глубина лунки, мкм;

W - энергия импульса, Дж;

K_1 ; K_2 - коэффициенты, зависящие от материала электродов и состава рабочей жидкости (при обработке медным инструментом в керосине $K_1 = 4$, $K_2 = 0,5$).

Средняя высота неровностей поверхности после электроэрозионной обработки

$$R_z \approx \frac{1}{3} H_{л}. \quad (6)$$

Для достижения наивысшей производительности и получения требуемой шероховатости поверхности съем металла следует производить сначала импульсами большой энергии для удаления основной массы металла, подлежащей съему, а затем снижением энергии импульсов осуществлять окончательную отделку поверхности.

Диапазоны режимов, применяемых для электроэрозионной обработки, очень широки. В табл. 1 приведены некоторые обобщенные данные о режимах обработки сталей и твердых сплавов, производительности и шероховатости поверхности.

Таблица 1. Производительность процесса и шероховатость поверхности при различных режимах обработки

Режим обработки	Мощность, кВт	t_n , мкс	f , с ⁻¹	Q , мм ³ /мин	R_z , мкм
Черновой	30...3	10000...100	50...3000	30000...100	1000...50
Чистовой	5...0,3	500...50	1000...10000	200...30	25...6
Отделочный	1 и менее	20 и менее	3000 и более	менее 30	3...1

Поверхностный слой материала обрабатываемой заготовки подвергается кратковременному, но весьма интенсивному термическому воздействию. Большая часть расплавленного металла и его паров удаляется из зоны разряда, но некоторая часть остается в лунке. При охлаждении на поверхности лунки образуется слой, по своим свойствам обычно сильно отличающийся от основного материала. Так, при электроэрозионной обработке стальных заготовок в среде, состоящей из жидких углеводородов (керосин, масло), поверхностный слой стали насыщается углеродом и образуются карбиды железа. Интенсивный теплоотвод через прилегающие к зоне разряда массы холодного металла и рабочую жидкость создает условия сверхскоростной закалки, что одновременно с науглероживанием приводит к образованию очень твердого слоя.

Глубина измененного слоя δ и микротрещин h , наблюдаемых иногда под этим слоем, зависит от энергии импульсов, их

длительности и теплофизических свойств обрабатываемого металла и электрода-инструмента. В табл. 2 приведены данные о толщине измененного слоя и высоте шероховатости поверхности при обработке заготовок из стали и твердого сплава импульсами различной энергии.

Таблица 2. Параметры качества поверхностного слоя после ЭЭО

Тип генерат. имп.	W , Дж	t_w мкс	Твердый сплав ВК20			Сталь У10А	
			R_z , мкм	δ_s , мкм	h_s , мкм	R_z , мкм	δ_s , мкм
I	0,0003	2	3	4	Отсутствуют	4	6
	0,003	4	6	8		10	14
	0,03	20	14	(1...1,5)		22	(1..1,5)
	0,6	300	25			45	
	2,0	1500	40			80	
II	0,6	700...	35	35	30	150	100
	3,0	...900	100	100	90	280	150
	70,0		Разрушение			930	400

Точность обработки

Точность геометрических параметров обрабатываемой поверхности зависит от следующих причин: 1) изменения жесткости системы СПИД; 2) наличия погрешностей установки инструмента, приспособления, заготовки; 3) теплового воздействия процесса; 4) нестабильности межэлектродного пространства; 5) некомпенсированного износа электрода-инструмента и др. Так погрешность, возникающая по причине изменения жесткости механизмов станка заготовки, приспособления и инструмента, может измениться в пределах 0,01...0,05 мм, от причин второй группы - 0,01...0,1 мм, а от износа инструмента 0,003...0,15 мм.

Экономическая точность электроэрозионной обработки соответствует 10-11-му качеству.

Экспериментальные исследования технологических характеристик электроэрозионной обработки

Зависимости (1), (2), (3), (4), (5), (6), приведенные выше, раскрывают связь параметров, характеризующих режим обработки, с технологическими характеристиками ее. Для определения этих характеристик использовать указание зависимости, очевидно, можно только при точном знании условий обработки, т.е. при знании K , K_1 , K_2 .

На практике (в производстве) отсутствие этих коэффициентов заставляет определять технологические характеристики экспериментальным путем.

В настоящей работе требуется установить экспериментально, как изменяются технологические характеристики обработки от изменения параметров режима (C , U_c , f).

Исследования проводятся на электроэрозионном копировально-прошивочном станке модели 183 (ЛК18) с машинным источником тока, генератор импульсов в качестве накопителя энергии имеет электрический конденсатор.

Последовательность проведения работы:

1. Установить в шпиндель станка электрод $\varnothing 8 \dots 10$ мм. Проверить перпендикулярность установки инструмента относительно рабочей поверхности стола станка.
2. Установить и закрепить заготовку. Материал заготовки и ее размеры (толщина) задаются руководителем занятия.
3. Установить первый режим обработки ($C=90$ мкФ).

4. Погрузить электрод-инструмент и заготовку в рабочую жидкость (керосин).

5. Включить источник тока.

6. Включить рабочий контур, установив в начале работы по прибору напряжение U_c (100... 150 В). Конкретное значение задается руководителем занятий.

7. Обработать отверстие, время обработки определяется с помощью часов.

8. После окончания обработки выключить рабочий контур, источник тока, поднять стол с заготовкой и электрод-инструмент из рабочей жидкости, развести электроды. Переместить инструмент на новое место для обработки нового отверстия.

9. Далее повторить пп. 3-8, предварительно устанавливая величину емкости конденсатора $C=210$ мкФ и $C=300$ мкФ.

10. После обработки трех отверстий определить производительность, точность и шероховатость поверхности. Погрешность обработки получают сравнением размеров инструмента и отверстия, шероховатость поверхности - путем сравнения с эталоном.

11. Оформить отчет.

Контрольные вопросы

1. Что такое электроэрозионная обработка?
2. Кто был основоположником метода?
3. Какие физические явления происходят на электродах при электроэрозионной обработке?
4. Какие технологические схемы применяются при обработке?

5. Какова методика расчета производительности процесса?
6. Что влияет на величину шероховатости поверхности после электроэрозионной обработки поверхности после электроэрозионной обработки?
7. Какие параметры влияют на точность обработки?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей: Учеб. пособие для вузов / Ю.С. Елисеев, А.Г. Бойцов, В.В. Крымов, Л.А. Хворостухин.–М.: Машиностроение, 2003.-512 с., ил.

2. Демин Ф.И., Проничев Н.Д., Шитарев И.Л. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: Учеб. пособие. – М.: Машиностроение. 2002. – 328с.; ил.

3. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей: Учеб. пособие / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, К.А. Малиновский, В.Г. Попов. – М.: Высш. шк.; 2002. – 355 с; ил.

4. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей: Учеб. пособие / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, А.А. Митрофанов и др.; Под ред. Б.П. Саушкина. – М.: Дрофа, 2002. – 656 с.: ил., 16 с. цв. вкл.

5. Абраимов Н.В., Елисеев Ю.С. Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов. – М.: Интернет Инжиниринг, 2001. – 622 с.

6. Производства зубчатых колес газотурбинных двигателей: Произв.-практ. издание / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, И.П. Нежурин и др.; Под ред. Ю.С. Елисеева. – М.: Высш. шк., 2001. – 493 с.; ил.

7. Колачев Б.А., Елисеев Ю.С., Братухин А.Г. и др. Титановые сплавы в конструкциях и производстве авиадвигателей и авиационно-космической техники / Под ред. д-ра техн. наук, проф., заслуженного деятеля науки Российской Федерации А.Г. Братухина. – М.: Изд-во МАИ, 2001. – 412 с.; ил.

8. Махаринский Е.И., Горохов В.А. Основы технологии машиностроения: Учебник. – Минск.: Высш. шк., 1997. – 423 с.; ил.

9. Надежность двигателей летательных аппаратов и пути ее обеспечения: Учеб. пособие / К.П. Крашенинников, Н.Д. Проничев, И.Л. Шитарев, А.П. Шулепов; Самар. гос. аэрокосм. ун-т, Самара, 1994. 54 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ ГТД В ПРОЦЕССЕ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ.....	5
ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАННОГО КАЧЕСТВА ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ДОРНОВАНИИ ОТВЕРСТИЙ.....	21
ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАННОГО КАЧЕСТВА ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОБКАТЫВАНИИ ЕЕ РОЛИКОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ.....	34
ВЫЯВЛЕНИЕ ШЛИФОВОЧНЫХ ПРИЖОГОВ НА ДЕТАЛЯХ.....	47
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ.....	55
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСОВ ТОКА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОЭРО- ЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ.....	68
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РАЗМЕРНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ.....	83
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ.....	94
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	110

Учебное издание

*Проничев Николай Дмитриевич
Шулепов Александр Павлович
Крашенинников Константин Петрович
Смирнов Геннадий Владиславович
Бородин Виктор Николаевич*

**СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ
РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ ГТД**

Лабораторный практикум

Редактор Т.К. Крестина
Компьютерная верстка
Доверстка

Подписано в печать _____ г. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. _____. Усл. кр.-отг. _____. Уч.-изд.л. _____.
Тираж ____ экз. Заказ _____. Арт. С- ____/2006

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.