

*МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П.КОРОЛЁВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»*

***ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕН-  
НОСТЕЙ ПРОШИВКИ  
ДЕТАЛЕЙ ГТД  
ИЗ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ  
СПЛАВОВ***

*методические указания  
к практической работе*

САМАРА  
2011

Составитель: *Нехорошев М.В.*

Рецензент: д-р техн. наук, проф., М а т в е е в В.Н.

*Исследование особенностей прошивки деталей ГТД из хромоникелевых сплавов: метод. указания / Сост.: М.В. Нехорошев – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 16 с.*

В практикум вошла лабораторная работа, посвященная особенностям прошивки деталей ГТД из хромоникелевых сплавов. В работе на примере рассмотрены основные виды электроэрозионной обработки.

Методические указания предназначены для бакалавров, обучающихся по специальности: 151900 - Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, изучающих курс «Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов».

Учебное пособие разработано на кафедре производства двигателей летательных аппаратов.

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2011

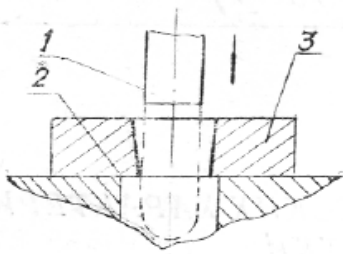
Цель работы: закрепление теоретических знаний по курсу "Технология двигателей летательных аппаратов", получение практических навыков работы на электроэрозионных станках, приобретение опыта экспериментальных исследований.

## *1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ*

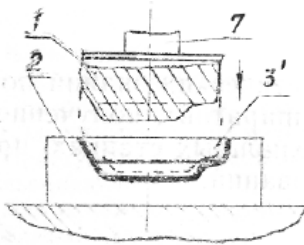
Широкое использование в современной машиностроительной, приборостроительной и инструментальной промышленности всевозможных металлов и сплавов, обладающих высокими механическими свойствами, вызывает большие трудности при их механической обработке. Ряд материалов не поддается обработке резанием лезвийным 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 не электропроводную) 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.1, а, ..., к).

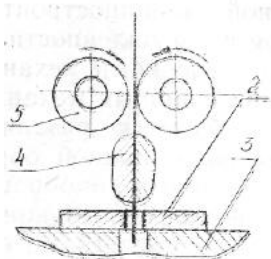


а) Изготовление круглых и фасонных сквозных отверстий

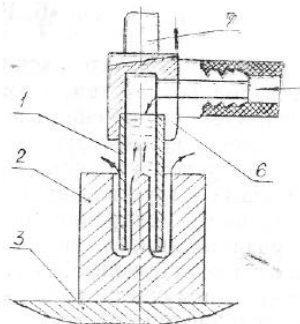


б) Изготовление круглых и фасонных глухих отверстий и полостей

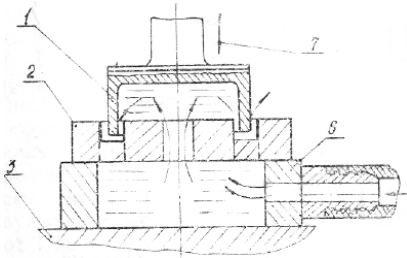
Рис. 1. Принципиальные схемы электроэрозионной обработки поверхностей:  
 1 - электрод-инструмент, 2 - заготовка, 3 - стол станка, 4 - кондукторная втулка,  
 5 - подающие ролики, 6 - оправка для подвода рабочей жидкости в зону обработки,  
 7 - хвостовик для крепления инструмента в шпинделе электроэрозионного станка



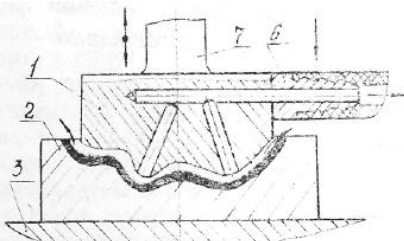
в) Обработка отверстий малых размеров



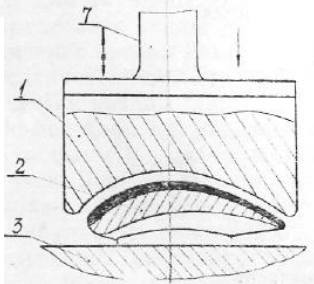
з) Обработка глубоких отверстий с принудительной подачей рабочей жидкости через внутреннюю полость инструмента



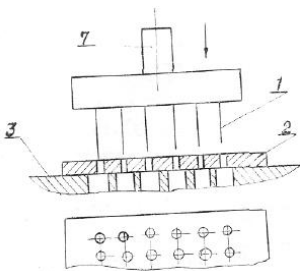
д) *Обработка простых и сложных отверстий больших размеров методом трепанации с подачей рабочей жидкости через технологическое отверстие в заготовке*



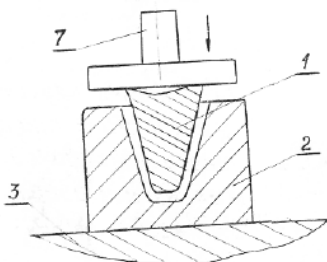
г) *Обработка глухих плоскостей с принудительной подачей жидкости и вибрацией электрода-инструмента*



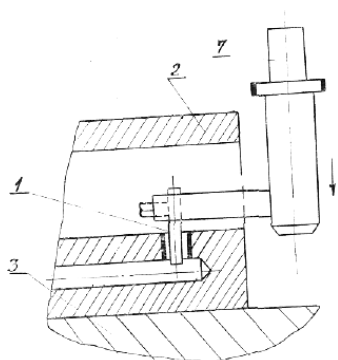
ж) *Электроэрозионное формообразование профиля пера лопатки ГТД с вибрацией электрода-инструмента*



з) *Одновременная обработка большого (до 8000-10000 шт) количества отверстий различной формы*



и) *Обработка конических и других сложно-пространственных сквозных и глухих отверстий*



к) *Обработка соединительных каналов в труднодоступных местах*

Рис. 1. Окончание

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

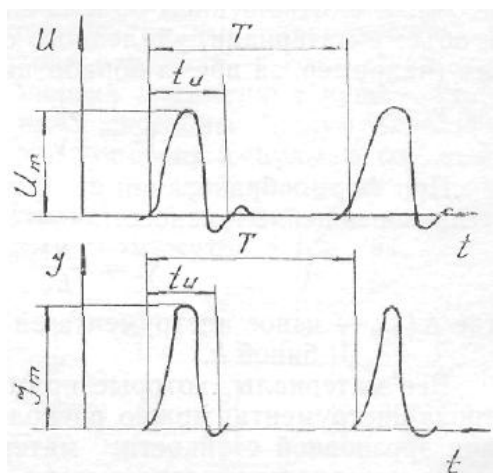


Рис. 2. Импульсы напряжения и тока:  $U$  - импульс на электродах,  
 $I$  - ток в межэлектродном промежутке

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

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 ( $t_n = 10^{-8} \dots 10^{-5}$ с) электроэрозионной обработки энергия преимущественно поступает на анод, в качестве которого здесь следует использовать заготовку (прямая полярность). При увеличении длительности импульса ( $t_n = 10^{-4} \dots 10^{-1}$ с) 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 эро-

зионному износу (разрушению). Стойкость материала электрода-инструмента (э. и.) 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):

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

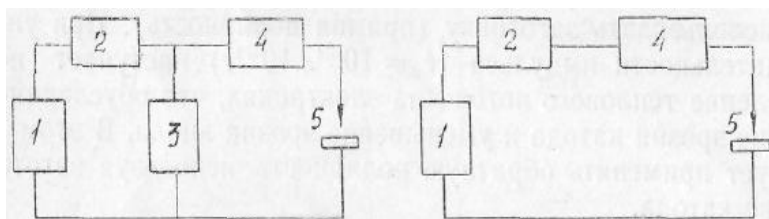
При формообразовании отверстий удобно пользоваться относительным линейным износом:

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

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 углеродистого графита, 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. 3, а) и с прямой коммутацией энергии источника питания (рис. 3, б).





а)

б)

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).

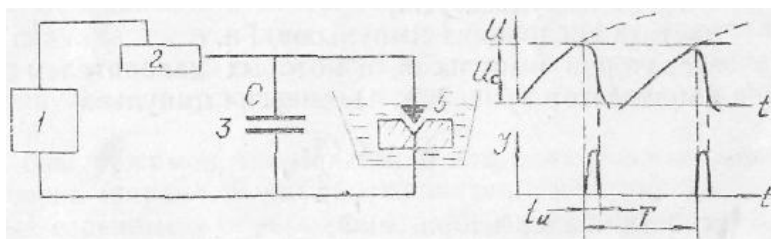


Рис. 4. Принципиальная схема генератора RC: 1 - источник тока, 2 - токоограничивающее сопротивление, 3 - конденсатор, 4 - межэлектродный промежуток

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.

## 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

### 2.1. Производительность обработки

Производительность обработки импульсами электрического тока определяется количеством металла, снятого с обрабатываемой заготовки в единицу времени. Обычно производительность измеряется в мм<sup>3</sup>/мин или г/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:

$$Q = K P, \quad (1)$$

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. 3, а, 4), энергия импульса

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

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).

## 2.2. 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:

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

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

Режим обработки	Мощность, кВт	$t_n$ , мкс	$f$ , $c^{-1}$	$Q$ , $мм^3/мин$	$R_z$ , 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  $\delta$  и микротрещин  $h$ , наблюдаемых иногда под этим слоем, зависит от энергии импульсов, их длитель-

ности 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

Тип генерат. имп.	W, Дж	$t_{ip}$ , мкс	Твердый сплав ВК20			Сталь У10А	
			$R_z$ , мкм	$\delta$ , мкм	h, мкм	$R_z$ , мкм	$\delta$ , мкм
I	0,0003	2	3	4	Отсутствуют	4	6
	0,003	4	6	8		10	14
	0,03	20	14			22	
	0,6	300	25	(1...1,5)		45	(1..1,5)
	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

### 2.3. 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.

### *3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ*

Зависимости (1), (2), (3), (4), (5), (6), приведенные выше, раскрывают связь параметров, характеризующих режим обработки, с ее технологическими характеристиками. 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 хромоникелевый сплав, 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  $U_c$  ( $100 \dots 150$  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.

#### *БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК*

1. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов (в двух томах). Т. 1. Обработка материалов с применением инструмента. Б.А. Артамонов, Ю.С. Волков, В.И. Дрожалова и др. - М.: Высшая школа, 1983. - 246 с.
2. Попилов Л.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: Справочник. - М.: Машиностроение, 1982. - 400 с.