

Министерство образования и науки Российской Федерации

---

Санкт-Петербургский государственный политехнический  
университет

---

Приоритетный национальный проект «Образование»  
Национальный исследовательский университет

*В. И. НИКИФОРОВ, Ю. М. БАРОН, М. Т. КОРОТКИХ*

# **ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**Лабораторный практикум**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением по  
университетскому политехническому образованию в качестве  
учебного пособия для студентов направлений подготовки  
бакалавров «Технологические машины и оборудование»,  
«Машиностроение», «Конструкторско-технологическое  
обеспечение машиностроительных производств»*

Санкт-Петербург

Издательство Политехнического университета

2011



УДК 378.16:621.9  
ББК 74.202.4я2  
Н627

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского института машиностроения *Ю. М. Зубарев*  
Кандидат технических наук, профессор СПбГПУ *Э. Л. Жуков*

*Никифоров В. И. Электрофизические и электрохимические технологии. Лабораторный практикум: учеб. пособие / В. И. Никифоров, Ю. М. Барон, М. Т. Коротких. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 198 с.*

В учебном пособии представлены содержание и методика проведения лабораторных работ по исследованию характеристик технологических процессов изготовления изделий с применением электрохимического, электроэрозионного, ионно-вакуумного, плазменного, ультразвукового и магнитно-абразивного методов обработки. Приведены сведения по устройству и назначению используемого технологического оснащения. Лабораторные работы предусматривают нахождение оптимальных характеристик режимов обработки, определение достижимых параметров точности, производительности и качества обработки заготовок.

Предназначено студентам высших учебных заведений, обучающимся по направлениям подготовки бакалавров «Технологические машины и оборудование», «Машиностроение», «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Работа выполнена в рамках реализации программы развития национального исследовательского университета «Модернизация и развитие политехнического университета как университета нового типа, интегрирующего мультидисциплинарные научные исследования и надотраслевые технологии мирового уровня с целью повышения конкурентоспособности национальной экономики»

Табл. 60. Ил. 45. Библиограф.: 8 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

**ISBN 978-5-7422-1924-8**

© В. И. Никифоров, 2011

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2011



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Сокращения, принятые в тексте .....	4
Введение .....	5
Обработка экспериментальных данных .....	10
1. Наладка электроискрового станка модели 57М на координатное прошивание сопряженных отверстий .....	20
2. Шероховатость поверхности и точность размеров электроискрового отрезания на станке 4А731 .....	37
3. Определение зависимостей технологических характеристик электрохимической обработки плоской поверхности заготовки от плотности тока .....	50
4. Назначение и устройство настольного электрохимического станка модели СНЭ–20МК .....	63
5. Исследование зависимостей технологических характеристик электрохимической размерной обработки отверстий на станке СНЭ–20МК от напряжения на электродах .....	108
6. Производительность и точность плазменно-воздушной резки плазматроном ПВР–402 .....	116
7. Определение периода стойкости порции порошка на операции магнитно-абразивной обработки .....	129
8. Исследование обрабатываемости материалов на ультразвуковом станке модели УЗСК–1 .....	143
Библиографический список .....	165
Приложения .....	166
Приложение 1. Измерение параметров шероховатости поверхностей деталей профилометром MarSurf PS1 .....	166
Приложение 2. Осциллограф универсальный сервисный 1С–94: устройство и наладка .....	182

## **СОКРАЩЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В ТЕКСТЕ**

МАО — магнитно-абразивная обработка;

УЗАО — ультразвуковая абразивная обработка;

ЭИСО — электроискровая обработка;

ЭФХО — электрофизические и электрохимические методы обработки;

ЭХО — электрохимическая обработка;

ЭХРО — электрохимическая размерная обработка.

## ВВЕДЕНИЕ

Широкое использование в машиностроении материалов с особыми физико-механическими характеристиками, обуславливающими их плохую обрабатываемость традиционными методами резания, создание деталей со сложными формами, повышенными требованиями к качеству поверхностного слоя и точности изготовления, а также необходимость снижения себестоимости обработки и повышения производительности труда привели к появлению и распространению в производстве электрофизических и электрохимических методов обработки (ЭФХО). Эта группа методов легла в основу современных электрофизических и электрохимических технологий.

Электрофизические и электрохимические технологии (далее — технологии ЭФХО) в настоящее время применяют на всех этапах изготовления деталей, начиная от получения заготовок и кончая их отделочной обработкой. На основе использования технологий этой группы решаются уникальные технологические задачи, обеспечивающие заданное удаление, перемещение или приращение (большого или малого) объема материала заготовки.

При весьма широких возможностях всей рассматриваемой группы конкретные технологии ЭФХО по области применения, как правило, более ограничены, а по требованиям к точности параметров технологического процесса более узки и жестки, чем технологии, использующие методы механической обработки. К тому же, многие из процессов, протекающие при их реализации, еще недостаточно изучены, в ряде случаев нет четко установленных структуры технологического процесса, содержания отдельных операций, режимов обработки, обеспечивающих требуемое качество поверхности и точность обработки. Технологическое оснащение ЭФХО специфично и сложно в наладке и эксплуатации.

В учебном процессе все эти вопросы разработки и проектирования технологий изготовления изделий непосредственно связаны с

изучением студентами таких технологических дисциплин как «Материаловедение и технология конструкционных материалов» и «Технология машиностроения». В рамках учебной дисциплины «Технология конструкционных материалов» студентам даются исходные знания о технологических методах обработки группы ЭФХО, основанных на применении не только механического, но и других видов энергетического воздействия на заготовку. Однако этих сведений весьма мало, приводятся они лишь на уровне описания процессов, не содержат, а из-за ограниченности времени на изучение дисциплины «Технология конструкционных материалов» не могут содержать сведений, позволяющих технологу правильно включать их в систему операций технологического процесса изготовления детали. Эта задача должна решаться при изучении дисциплины «Технология машиностроения».

«Технология машиностроения» как наука достаточно молода. А. А. Маталин трактует ее как науку «... об изготовлении машин требуемого качества в установленном производственной программой количестве и в заданные сроки при наименьших затратах живого и овеществленного труда». Уже в первоначальном своем содержании учебная дисциплина «Технология машиностроения» не включила в себя ряд сведений, относящихся к технологии производства машин, т. е. к науке «Технология машиностроения». К ним можно отнести сведения о технологических методах обработки, физических основах резания материалов и выборе режимов резания, о технологии получения заготовок и методах термической обработки. Эти материалы в учебном процессе выделены в такие дисциплины, как «Резание металлов», «Материаловедение и технология конструкционных материалов» [5].

За учебной дисциплиной «Технология машиностроения» в качестве предмета изучения были закреплены физические основы, принципы и последовательность проектирования технологических процессов механической обработки заготовок и сборки изделий, а также типовые технологические процессы изготовления традиционных для

машиностроения классов деталей. В этом своем содержании учебная дисциплина «Технология машиностроения» сохранилась до настоящего времени [7, 8].

В современном машиностроении необходимость изучения методов ЭФХО и соответствующих электрофизических и электрохимических технологий при подготовке специалиста-технолога стала очевидной. Назрела необходимость выпуска вузами системных технологов, способных при решении сложных технологических задач «выйти» за традиционные рамки технологий механической обработки и принимать решения на основе системного подхода к технологии как науке, строящейся на базе всей совокупности технологических методов обработки заготовок.

Эта специфика и в то же время широкое использование в промышленности технологий ЭФХО обусловили введение в учебные планы подготовки магистров по направлениям «Технологические машины и оборудование», «Машиностроение» и «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительного производства» в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете учебной дисциплины «Электрофизические и электрохимические технологии». В ней рассматриваются все элементы технологических систем, обеспечивающие реализацию технологий данной группы, в частности, технологическое оснащение, режимы обработки, основы проектирования технологических процессов. В состав учебных занятий по дисциплине «Электрофизические и электрохимические технологии» входит чтение лекций, проведение практических лабораторных занятий и выполнение курсовой работы по проектированию элементов технологической оснастки, необходимой для реализации электрофизических и электрохимических технологий.

*Лабораторные занятия* предназначены для углубленного изучения научно-теоретических основ дисциплины «Электрофизические и электрохимические технологии», элементов технологической сис-

темы, в рамках которой реализуется обработка, применительно к основным технологическим методам обработки заготовок.

Пособие содержит материалы, необходимые студентам для выполнения лабораторных работ по изучению технологий плазменно-воздушной резки, электрохимической размерной обработки, электроэрозионного прошивания отверстий и разрезания заготовок проводочным электродом-инструментом, магнитно-абразивного полирования и ультразвуковой обработки. Здесь приводятся сведения об этих процессах, базирующиеся на теоретических основах технологий ЭФХО, излагаемых в курсе «Электрофизические и электрохимические технологии». По каждой лабораторной работе даются описание технологического оборудования и его наладки, последовательность проведения работы и содержание отчета. Предполагается, что технологическое оборудование, используемое в лабораторных работах 1, 6 и 7, изучалось студентами ранее в рамках дисциплины «Технология конструкционных материалов». В связи с этим сведения по этому оборудованию в данном учебном пособии не приводятся. Их можно найти в пособии «Технология конструкционных материалов. Практикум по технологическим методам обработки заготовок: учеб. пособие / Под ред. В.И. Никифорова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008» [6] и другой литературе, указанной в разделе «Библиографический список».

Выполнение практически всех лабораторных работ предусматривает применение исследовательских методов. Это связано с необходимостью формирования компетенций студентов в области современных методов экспериментирования с применением разнообразной технологической оснастки и приобретения умений обработки экспериментальных данных с использованием компьютерных технологий.

Формирование умений в области технологических методов получения заготовок и их обработки возможно только на основе углубленной самостоятельной работы студента. В связи с этим каждая представленная в пособии работа предусматривает при наличии общей части определенную самостоятельную работу студента, осуществ-

вляемую при подготовке к занятию, при выполнении индивидуально-го задания и при подготовке отчета.

Данная книга содержит также ряд методических указаний учебным мастерам по содержанию, организации и методике проведения занятий в лабораториях по технологическим методам обработки заготовок электрофизическими и электрохимическими методами. В частности, в приложениях к основному тексту приведены сведения, необходимые им для наладки используемых студентами в работах приборов для измерения параметров шероховатости поверхности и снятия характеристик процессов, протекающих в зоне обработки.

## ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Одной из важнейших задач фундаментальных наук физики и химии, обеспечивающих их использование в прикладных науках и, в частности, в технологии машиностроения, является установление функциональных зависимостей между физическими величинами технологических процессов.

Сложность физико-химических процессов, протекающих при проведении технологий с использованием электрофизических и электрохимических методов обработки, во многих случаях не дает возможности теоретически вывести закономерности и установить математическую связь между режимом обработки и «выходными» параметрами процессов (точностью обработки, шероховатостью обработанной поверхности, производительностью обработки и др.), а, следовательно, управлять последними, используя эти закономерности. Явно недостаточно для этого и справочной литературы, в которой даются конкретные рекомендации технологу по выбору режимов обработки [4].

Отсутствие достаточных сведений, устаревание имеющихся данных в справочной литературе, появление новых методов электрохимического и электрофизического воздействия на обрабатываемую заготовку ставит перед технологом задачу самостоятельного изучения процессов, определения достижимых параметров обработки на новом оборудовании и определения оптимальных режимов, обеспечивающих минимальную себестоимость, максимальную производительность при обеспечении требуемого качества обработки. Восполнить недостаток физико-химических сведений о процессах в зоне обработки позволяет проведение экспериментов.

Представленная в пособии серия лабораторных работ в связи с этим ставит целью формирование у студента умения выполнять эксперименты по изучению электрофизических и электрохимических методов обработки заготовок, математически и графически обрабатывать полученные в эксперименте результаты измерений и делать вы-

воды, направленные на оптимизацию процессов обработки. В основе каждой лабораторной работы, по сути дела, представляющей научный эксперимент в области электрофизических и электрохимических технологий, лежит реальная обработка заготовок с целью получения деталей, имеющих указанные на чертеже параметры обработки, и измерения достигнутых в эксперименте результатов.

Лабораторные работы ставят задачу выявления функциональных связей между параметрами режима обработки и требованиями к шероховатости обработанных поверхностей, точности и производительности обработки. В связи с появлением при обработке разнообразных по создающим их физико-химическим процессам погрешностей выполняемых размеров, формы изготавливаемых поверхностей детали и их взаимного расположения решение этих задач может быть осуществлено только с использованием математических методов обработки, основанных на теории вероятностей и математической статистике.

При проведении исследований обычно стараются поставить эксперимент так, чтобы изучить взаимозависимость только двух величин, поддерживая остальные влияющие физические величины постоянными. Таким образом, эксперимент сводится к наблюдению за тем, что происходит с интересующим нас «выходным параметром» процесса  $y$ , если изменять некоторую другую физическую величину  $x$ . Можно сказать, что задача эксперимента заключается в нахождении зависимости  $y = f(x)$ .

В эксперименте получают  $n$  значений зависимой физической величины  $y_i$ , измеренных при заданных экспериментатором значениях влияющей на нее физической величины  $x_i$ . Пара значений  $(x_i, y_i)$  – результат измерений физических величин в рамках одного наблюдения,  $n$  – число наблюдений, осуществляемое при различных значениях  $x_i$ .

При одном наблюдении, осуществляемом при постоянном значении фактора  $x_i$ , экспериментатор может осуществить ряд повторных измерений значения  $y_i$ , число которых  $j$  в рамках одного  $i$ -го наблюдения может изменяться:  $j = 1, 2, \dots, k$ . Поэтому в  $i$ -м наблюдении определяют среднее значение  $\bar{y}_i$  по формуле

$$\bar{y}_i = \sum_{j=1}^k y_{ij} / k. \quad (1)$$

Таким образом, пара значений  $(x_i, \bar{y}_i)$  — результат измерений при одном наблюдении (опыте) в рамках эксперимента,  $n$  — число наблюдений, осуществляемое при различных значениях  $x_i$ ;  $j$  — число повторных измерений функции  $y_i$  в рамках одного наблюдения.

В общем виде задача обработки экспериментальных данных состоит в нахождении по полученной выборке  $(x_1, \bar{y}_1), (x_2, \bar{y}_2), \dots, (x_n, \bar{y}_n)$  приближенного уравнения зависимости (регрессии)  $y = f(x)$  и оценке допускаемой при этом ошибки.

Обработку экспериментальных данных начинают с графического представления в прямоугольной системе координат полученных пар измерений технологических параметров процесса в виде экспериментальных точек с координатами  $(x_i, \bar{y}_i)$ . Построение графиков является эффективным средством предварительного анализа экспериментальных зависимостей, поэтому графики нужно строить обязательно. По экспериментальным точкам, как правило, можно провести гладкую аппроксимирующую кривую, которая приближенно описывает полученные результаты. Из-за случайных погрешностей измерений график аппроксимирующей функции  $f(x)$  не обязательно должен проходить через все экспериментальные точки. Напротив, искомая функция должна сгладить случайные погрешности эксперимента, удовлетворив выбранному критерию оптимальности. Такую функцию называют сглаживающей или выравнивающей.

Вид определяемой в лабораторных работах функции  $y = f(x)$  обычно известен. Поэтому обработка экспериментальных данных на этапе установления зависимости сводится к определению неизвестных коэффициентов, входящих в математическую формулу, описывающую искомую зависимость, и обозначаемых в дальнейшем  $a$  и  $b$ . Эта задача решается методом наименьших квадратов [1, 3].

В соответствии с этим методом неизвестные коэффициенты  $\tilde{a}$  и  $\tilde{b}$  определяют в зависимости от вида функции по формулам (2) – (7). Здесь и далее знак «тильда» над значением переменной означает, что это рассчитанное по аппроксимирующей формуле, а не экспериментально полученное значение.

Для линейной зависимости вида  $y = a + bx$ :

$$\tilde{a} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, \quad \tilde{b} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}. \quad (2)$$

Для степенной зависимости вида  $y = a x^b$ :

$$\lg \tilde{a} = \frac{\sum_{i=1}^n \lg y_i \sum_{i=1}^n (\lg x_i)^2 - \sum_{i=1}^n (\lg x_i \lg y_i) \sum_{i=1}^n \lg x_i}{n \sum_{i=1}^n (\lg x_i)^2 - \left( \sum_{i=1}^n \lg x_i \right)^2}; \quad (3)$$

$$\tilde{b} = \frac{n \sum_{i=1}^n (\lg x_i \lg y_i) - \sum_{i=1}^n \lg x_i \sum_{i=1}^n \lg y_i}{n \sum_{i=1}^n (\lg x_i)^2 - \left( \sum_{i=1}^n \lg x_i \right)^2}. \quad (4)$$

Для показательной функции  $y = a e^{bx}$ :

$$\lg \tilde{a} = \frac{\sum_{i=1}^n \lg y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n (x_i \lg y_i) \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}; \quad (5)$$

$$\tilde{b} = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i \lg y_i) - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n \lg y_i}{\lg e \left( n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right)}. \quad (6)$$

Пример построения графика линейной зависимости вида  $y = a + bx$  показан на рис. 1 (расчетные точки  $A$  и  $B$ ).

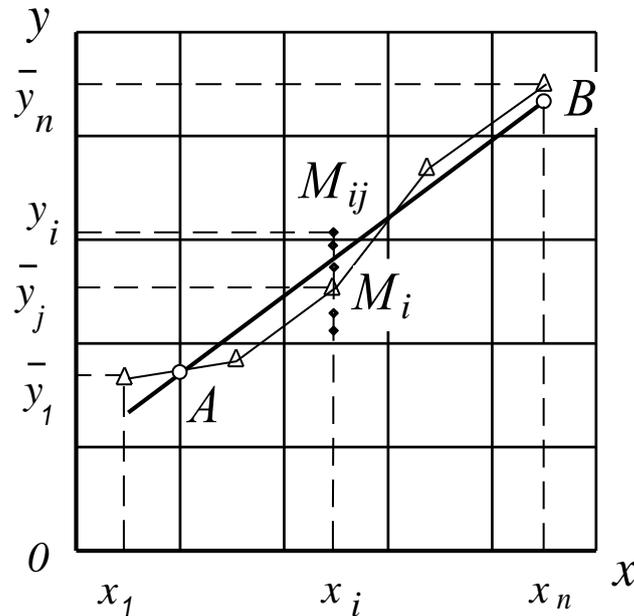


Рис. 1. Пример построения графика регрессии вида  $y = a + bx$

Формы зависимостей степенной и показательной функций при различных значениях постоянных параметров  $a$  и  $b$  показаны на рис. 2.

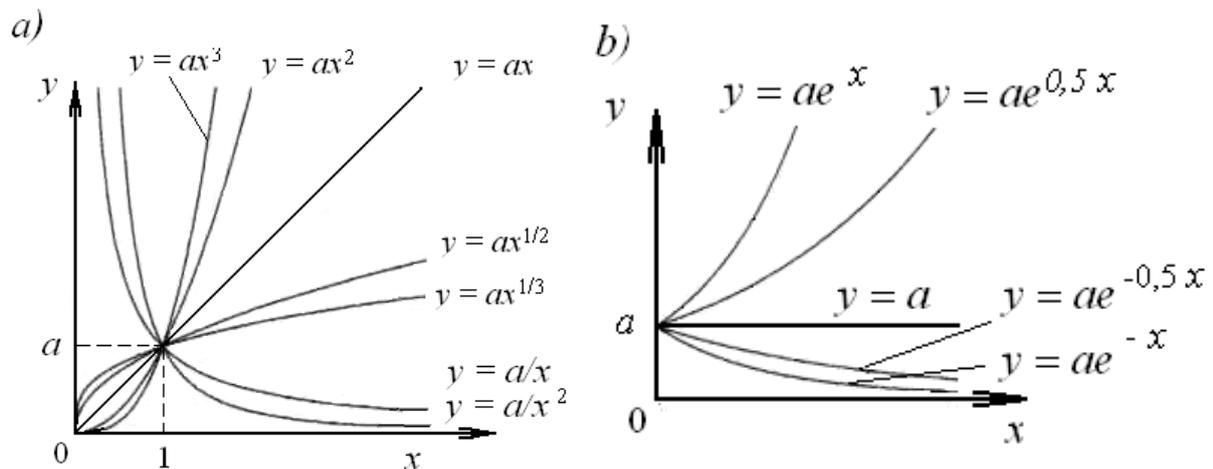


Рис. 2. Графики степенной (a) и показательной (b) функций

После того, как уравнение приближенной регрессии найдено, его нужно подвергнуть *статистическому анализу*.

Статистический анализ полученной в эксперименте регрессии состоит из двух существенно различающихся этапов. Во-первых, нужно проверить значимость всех слагаемых найденного регрессион-

ного уравнения в сравнении со случайной ошибкой наблюдений  $\sigma_y^2$ . Такое исследование носит название *регрессионного анализа*.

Во-вторых, нужно оценить силу связи, т. е. долю регрессии в общем рассеянии значений  $y_i$ . Данное исследование называют *корреляционным анализом*.

В целом статистический анализ полученной регрессии предполагает в общем случае:

- определение эмпирического (полученного при обработке выборки) среднеквадратического отклонения  $S\{y\}$  и среднеквадратического отклонения  $\sigma\{y\}$ ;
- нахождение доверительных интервалов для оценки экспериментально полученных постоянных  $a$  и  $b$  регрессии;
- доверительный интервал, в котором с вероятностью  $(1 - p)^2$  лежит линия истинной закономерности  $y = f(x)$ ;
- оценку соответствия принятой модели процесса (вида зависимости  $y = f(x)$ ) полученным экспериментальным данным; ее осуществляют вычислением критерия Фишера.

Такая задача оказывается в большинстве случаев трудоемкой по многим причинам. Одна из них связана с тем, что коэффициенты, как случайные величины, имеют весьма сложные распределения.

Далее представлены методы оценки, применимые к наиболее простому виду регрессии – линейной зависимости  $y = f(x)$ .

В качестве оценки среднеквадратического отклонения  $\sigma\{y\}$  принимают выборочную дисперсию  $S^2\{y\}$ , определяемую по формуле

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{a} - \tilde{b}x_i)^2}{n - 2}. \quad (7)$$

Доверительные интервалы для оценок полученных экспериментальных значений  $\tilde{a}$  и  $\tilde{b}$  при заданной преподавателем доверительной вероятности  $p$  определяются зависимостями:

$$\tilde{a} - t_{1-p/2} \frac{S}{\sqrt{n-2}} \leq a \leq \tilde{a} + t_{1-p/2} \frac{S}{\sqrt{n-2}}, \quad (8)$$

$$\tilde{b} - t_{1-p/2} \frac{\sqrt{nS}}{\sqrt{n-2}} \sum_{i=1}^n x_i^2 \leq b \leq \tilde{b} + t_{1-p/2} \frac{\sqrt{nS}}{\sqrt{n-2}} \sum_{i=1}^n x_i^2, \quad (9)$$

где  $t_{1-p/2}$  — квантиль распределения Стьюдента  $t_{(1-p/2),(n-2)}$ .

Доверительная область, в которой с вероятностью  $(1-p)^2$  лежит линия истинной закономерности  $y = f(x)$ , может быть определена путем нахождения доверительных интервалов математического ожидания  $M\{Y\}$  для выбранного значения  $x_0$  по следующим неравенствам:

$$\begin{aligned} \tilde{a} + \tilde{b}x_0 - t_{1-p/2} \frac{2/\sqrt{n-2} \sqrt{1 + n(x_0 - x)^2 / \sum_{i=1}^n (x_1 - x)^2}}{\sqrt{n-2}} &\leq M\left\{\frac{Y}{x_0}\right\} \leq \\ &\leq \tilde{a} + \tilde{b}x_0 + t_{1-p/2} \frac{2/\sqrt{n-2} \sqrt{1 + n(x_0 - x)^2 / \sum_{i=1}^n (x_1 - x)^2}}{\sqrt{n-2}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Оценку соответствия принятой модели процесса (вида зависимости  $y = f(x)$ ) полученным экспериментальным данным осуществляют расчетом критерия Фишера  $F$ , который позволяет определить статистическую значимость различия двух дисперсий:

$$F = S^2_{ad} / S^2_{\mathcal{H}}, \quad (11)$$

где  $S^2\{Y\}$  — средняя арифметическая дисперсия параметра  $y$  всех  $i$  точек эксперимента;  $S^2\{y_i\}$  — дисперсия параметра  $y$  в  $i$ -й точке;  $S^2_{ad}$  — оценка дисперсии адекватности модели.

Определяют дисперсии  $S^2\{y_i\}$  и  $S^2_{ad}$  по следующим формулам:

$$S^2_{\mathcal{H}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S^2_{\mathcal{H}_i}, \quad S^2_{\mathcal{H}_i} = \frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k (\bar{y}_i - y_{ij})^2, \quad (12)$$

$$S^2_{ad} = k/n - 2 \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \tilde{a} - \tilde{b}x_i)^2. \quad (13)$$

Если полученное значение  $F$  окажется больше определенного по таблице квантилей  $t_{(1-p/2),n}$  распределения Фишера  $F_{табл}$  [1, 3], то различие между выбранной моделью и истинным видом функции следует признать значимым. Следовательно, выбранная модель (вид зависимости) не соответствует полученной в экспериментах зависимости. В обратном случае принятую гипотезу о виде функции  $y = f(x)$  следует признать верной.

Применение регрессионного и корреляционного анализов всегда связано с большим объемом вычислений. В связи с тем, что математическая обработка результатов измерений выступает в проводимых лабораторных работах как аппарат для решения основных задач исследования физико-химических технологий, выполнение статистического анализа может проводиться только на основе использования вычислительной техники и по специальному заданию преподавателя.

### **Обобщенная последовательность проведения эксперимента и обработки результатов наблюдений**

1. Проводится эксперимент в соответствии с рекомендациями по последовательности и содержанию действий, указанными в конкретной лабораторной работе.

2. Заполняются протокол эксперимента и таблицы измерений технологических параметров процесса.

3. Строятся графики искомых зависимостей с нанесением экспериментальных точек в декартовой системе координат и проведением гладкой аппроксимирующей сглаживающей линии.

При этом рекомендуется выполнять следующие правила:

– последовательно полученные экспериментальные точки следует соединять тонкими линиями, а аппроксимирующая линия зависимости  $f(x)$  может не проходить через все точки;

– сумма положительных и отрицательных отклонений экспериментальных точек от сглаживающей линии должна быть равна (зрительно) нулю;

– не должно быть компенсации положительных отклонений, например, в начале прямой отрицательными в ее конце;

– если некоторые точки лежат далеко от кривой, то это часто свидетельствует о грубых ошибках при проведении эксперимента и, в частности, соответствующих измерений. В таком случае излом кривой вблизи выпадающей точки недопустим. Поэтому прежде чем проводить аппроксимацию, нужно из экспериментальных данных исключить грубые ошибки (промахи).

При дальнейших действиях обработки экспериментальных данных исходим из того, что искомая зависимость  $y = f(x)$  известна. На основе экспериментальных данных определяются входящие в нее постоянные  $a$  и  $b$ . В лабораторных работах рассматриваются следующие виды зависимостей  $y = f(x)$ :

- линейного вида:  $y = a + bx$ ;
- степенного вида:  $y = ax^n$ ;
- показательного вида:  $y = ae^{bx}$ .

4. Наносится на полученный график аппроксимирующей зависимости примерная известная теоретическая или эмпирически полученная зависимость  $y = f(x)$ , представленная в виде рисунков типовых зависимостей (см. рис. 1, 2).

5. Визуально оценивается соответствие полученной аппроксимирующей линии теоретической зависимости параметров технологического процесса. Делается один из следующих промежуточных выводов:

– вид полученной зависимости в первом приближении соответствует теоретическим представлениям о взаимосвязи «входного» и «выходного» параметров процесса. В этом случае далее продолжается анализ полученных результатов и определение констант функциональной зависимости в последовательности пунктов 6–7;

– вид полученной зависимости не соответствует теоретическим представлениям о процессах, проходящих в технологической системе.

Этот вывод указывает на наличие при проведении эксперимента и при измерениях грубых промахов и ошибок. Чаще всего такой результат соответствует о наличии систематических ошибок и соответствующих погрешностей. Систематические погрешности при проведении лабораторных экспериментов, как правило, обусловлены несовершенством методики измерений параметров и низкой культурой исследователей. Решение преподавателя при несоответствии полученных результатов теоретической зависимости должно состоять в

отрицательной оценке работы студентов и необходимости повторного проведения ими эксперимента.

6. Определяются параметры аппроксимирующих функций методом наименьших квадратов. Для этого выбираются из ранее приведенных и указанных в литературе [1–3] формулы для расчета:

- неизвестных постоянных  $a$  и  $b$  искомых зависимостей;
- дисперсии отклонения  $y_i$  от установленной регрессии;
- оценки дисперсии и определения доверительных интервалов;
- оценки соответствия принятой модели процесса (вида зависимости  $y = f(x)$ ) полученным экспериментальным данным по критерию Фишера.

Проводятся расчеты с помощью математического вычислительного пакета MathCad. Результаты включаются в отчет в виде протокола компьютерных расчетов.

7. Дается графическая презентация полученной экспериментальной зависимости средствами пакета MathCad.

Допускается в решении задач пунктов 6 и 7 использование других компьютерных программ и пакетов, например, компьютерной программы графического отображения и аппроксимации зависимостей Microcal Origin [3].

8. Формулируются выводы по полученным результатам и качеству проведения эксперимента.

# 1. НАЛАДКА ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО СТАНКА 57М НА КООРДИНАТНОЕ ПРОШИВАНИЕ СОПРЯЖЕННЫХ ОТВЕРСТИЙ

**Цель работы:** знания процесса наладки электроискрового станка модели 57М на координатное прошивание отверстий, видов погрешностей обработки, характерных для данного метода; умения находить размерные погрешности электроэрозионного прошивания отверстий с помощью эксперимента и сопоставлять расчетную и действительную точность выполнения размеров.

## Назначение, устройство и принцип работы станка

Электроискровой станок модели 57М предназначен для получения полостей и отверстий в заготовках из материалов, проводящих электрический ток. На станке можно выполнять такие операции, как прорезка узких пазов шириной от 0,05 мм и более, вырезание профильных заготовок из листового материала, разрезание пластинок из твердых сплавов, получение отверстий относительно большого диаметра методом кольцевой прошивки, одновременная прошивка нескольких отверстий. Наибольшие преимущества по отношению к выполнению аналогичных работ на металлорежущих станках электроискровой станок имеет при обработке заготовок из металлокерамических твёрдых сплавов, труднообрабатываемых металлов и их сплавов.

Наибольшие размеры обрабатываемых на станке 57М заготовок составляют: по высоте – 25 мм, по ширине – 80 мм и длине – 100 мм. На чистовых режимах обработки точность получаемых размеров соответствует 8–10 качеству точности, а наименьшая высота неровностей обработанных поверхностей по параметру  $Ra$  находится в пределах от 1,25 до 2,5 мкм.

Станок 57М (рис. 1.1) состоит из корпуса 1, в котором расположено электрооборудование, и рабочей головки, установленной на верхней плите корпуса. На передней панели корпуса расположены

переключатель режима работы 2, потенциометр для настройки автоматического регулятора движения подачи 4, тумблер 5 для включения и выключения станка и тумблер 3 автоматического подъема и опускания электрода-инструмента 7.

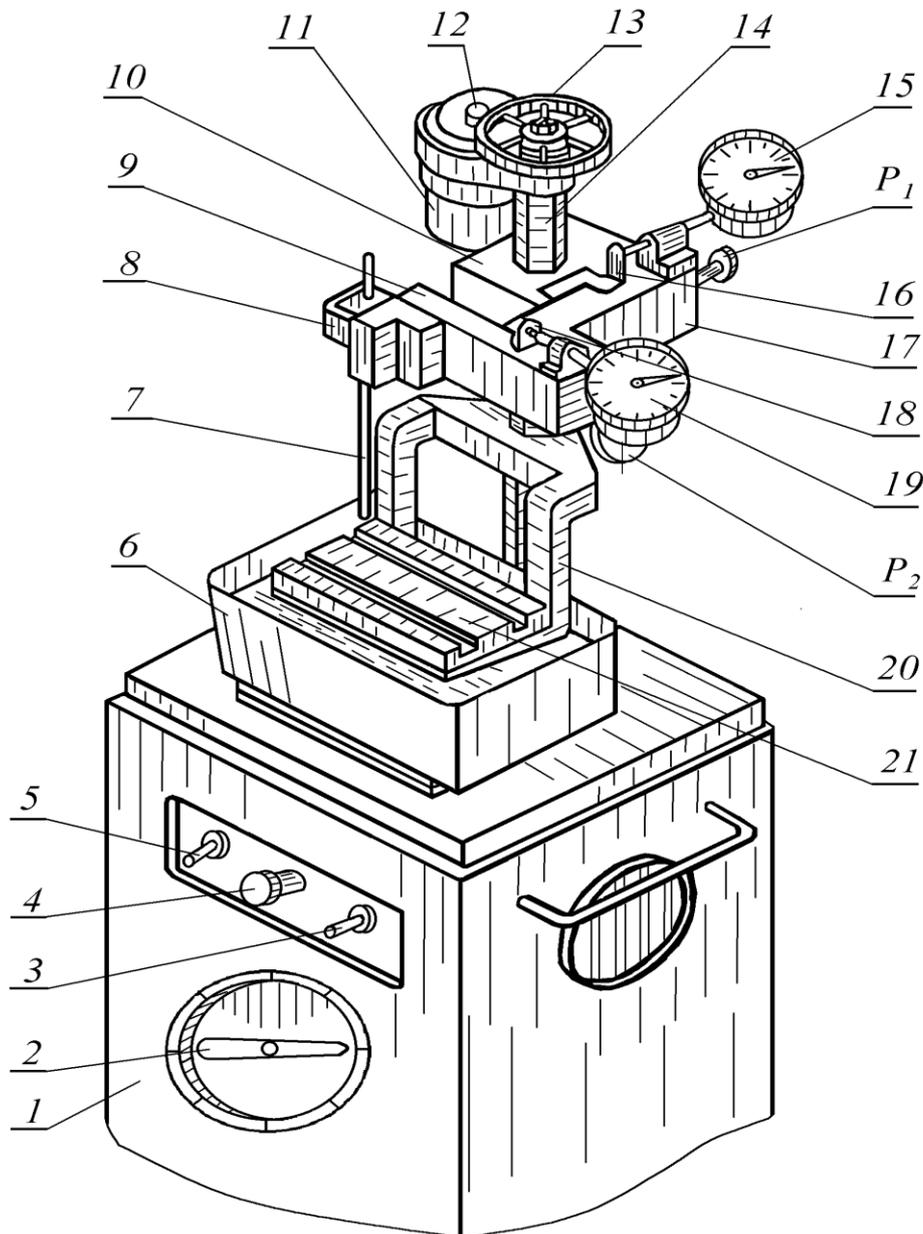


Рис. 1.1. Электроискровой станок модели 57М

Основными узлами рабочей головки являются: шестигранная колонка 14, каретка 10, продольный 9 и поперечный 17 суппорты, электродвигатель 11, стол 21 и ванна 6, заполняемая диэлектрической

жидкостью. Колонка 14 неподвижно закреплена на верхней плите корпуса 1. По ней вверх и вниз перемещается каретка 10 при помощи винта, находящегося в отверстии колонки, и гайки, прикрепленной к каретке. Винт приводится во вращение электродвигателем постоянного тока 11 через зубчатые колеса 12 и 13.

Поперечный 17 и продольный 9 суппорты передвигают по каретке вручную с помощью рукояток  $P_1$  и  $P_2$ . Эти движения суппортов позволяют устанавливать закреплённый на электрододержателе 8 электрод-инструмент 7 в заданное положение относительно рабочего стола 21, на котором закрепляют заготовку. Для контроля смещения электрода-инструмента при установочных перемещениях суппортов служат индикаторы 15 и 19.

На колонке 14 с помощью двух лап 20 неподвижно закреплён стол 21. Ванну 6 с диэлектрической жидкостью (минеральное масло, керосин или их смесь) можно поднять и закрепить на колонке 14 с помощью рукоятки таким образом, что заготовка вместе со столом будет полностью погружена в жидкость.

Процесс электроискровой обработки основан на явлении электрической эрозии, идущей на электродах при прохождении импульсных электрических разрядов между электродом-инструментом и заготовкой. Под импульсным разрядом подразумевается разряд конденсатора длительностью  $10^{-7}$ – $10^{-2}$  секунд на контур, включающий в себя электрод-инструмент и заготовку. Длительность, мощность и частота следования разрядов определяют производительность и точность обработки. Импульсные электрические разряды длительностью  $10^{-7}$ – $10^{-5}$  секунд называют искровыми разрядами. Именно этот тип электрических разрядов реализован на электроискровом станке модели 57М.

Искровые разряды создаются генератором электрических импульсов станка, который состоит из переключаемой батареи конденсаторов различной емкости, заряжаемых постоянным током. Поэтому энергия разряда может быть заранее задана путем включения конден-

сатора определенной емкости  $C$  или набором батареи конденсаторов. Напряжение заряда конденсаторов  $U$  равно 250 В.

Электрод-инструмент  $1$  (рис. 1.2, *a*) при работе станка нижним концом погружают в диэлектрическую жидкость, находящуюся в ванне. В этом положении он совершает поступательное движение в направлении электрода-заготовки  $2$ , неподвижно закрепленной на столе станка. Движение электроду-инструменту  $1$  сообщают двигателем постоянного тока  $3$  через зубчатую передачу  $4$  и винтовой механизм  $5$ .

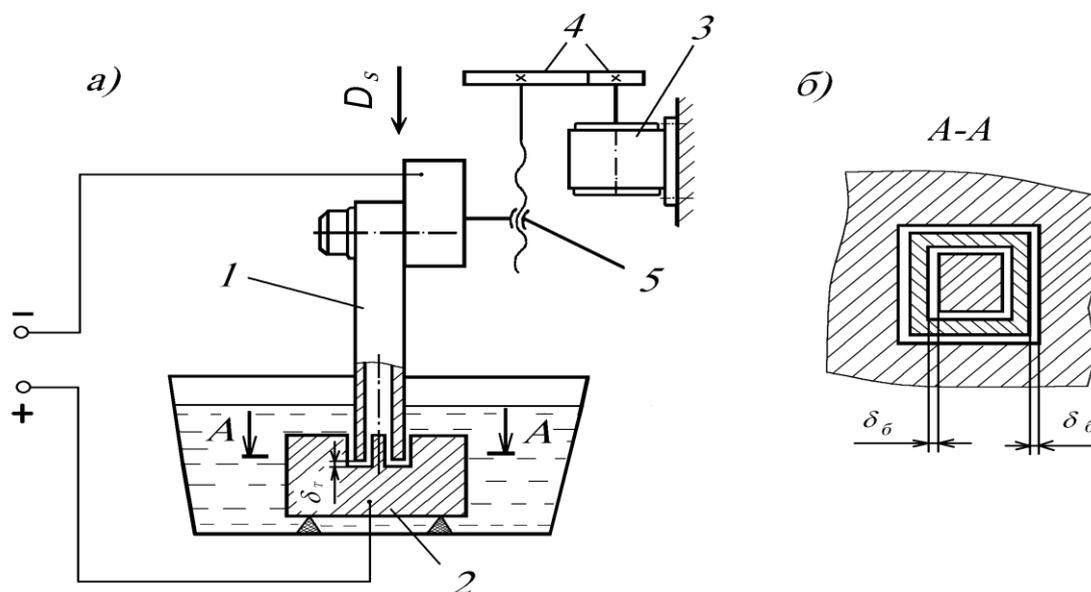


Рис. 1.2. Схема электроэрозионного прошивания отверстия

Когда зазор  $\delta_r$  между сближающимися электродом-инструментом и заготовкой станет меньше предельного, между ними происходит искровой разряд длительностью  $10^{-5}$ – $10^{-7}$  секунд. Так как объём искрового канала очень мал, а мощность импульса тока достаточно велика, температура плазмы в канале может достигать  $10000$ – $12000$  °С. Поэтому процесс разряда сопровождается интенсивным нагревом, частичным расплавлением и испарением металла с поверхности электрода-инструмента и заготовки. Большому тепловому воздействию при малой длительности импульсов подвергается анод, поэтому в качестве такового обычно используют заготовку.

При увеличении мощности импульсов, что достигается увеличением емкости батареи конденсаторов, производительность процесса повышается. Однако при этом снижается точность обработки и возрастает шероховатость формируемой поверхности, так как при воздействии более мощных разрядов увеличиваются размеры эрозионных кратеров на поверхностях электродов.

Для обеспечения непрерывности процесса необходимо, чтобы зазор между электродом-инструментом и заготовкой поддерживался близким к пробойному, а непосредственный механический контакт электродов отсутствовал. Поэтому скорость движения электрода-инструмента должна точно соответствовать скорости удаления припуска. Это требует применения в приводе электрода-инструмента следящей системы, автоматически связывающей скорость его подачи и скорость съема материала. Следящие системы могут быть реализованы на основе различных принципов управления. На станке модели 57М в качестве управляющего сигнала этой системы используют напряжение на межэлектродном промежутке, изменяющееся при электрическом разряде (рис. 1.3).

При заряженном конденсаторе  $C_1$  (или любого другого из указанных на рис. 1.3 конденсаторов  $C_2, C_3, C_4, C_5$ ) напряжение на его пластинах равно рабочему напряжению генератора импульсов  $I$  ( $U_1 = 250$  В), что превышает напряжение дополнительного источника питания  $2$  ( $U_2 = 160$  В). В этих условиях направление тока  $I_1$  в якоре электродвигателя  $3$ , определяемое разностью названных напряжений, будет создавать его вращение в сторону, обеспечивающую сближение электрода-инструмента и заготовки.

Прохождение электрического разряда между заготовкой и электродом-инструментом резко снижает напряжение на конденсаторе, в результате чего напряжение вторичного источника питания  $U_2$  становится больше напряжения первичного источника питания  $U_1$ .

Направление тока в якоре двигателя  $I_2$  (рис. 1.3, б) в этом случае изменится на обратное, что приведет к реверсу вращения вала двига-

теля и удалению электрода-инструмента от заготовки. Это движение будет продолжаться до тех пор, пока конденсатор  $C_1$  вновь не зарядится до напряжения, превышающего напряжение  $U_2$  дополнительного источника питания. Произойдет повторный реверс двигателя, и начнется сближение электрода-инструмента и заготовки. Далее описанные процессы повторятся.

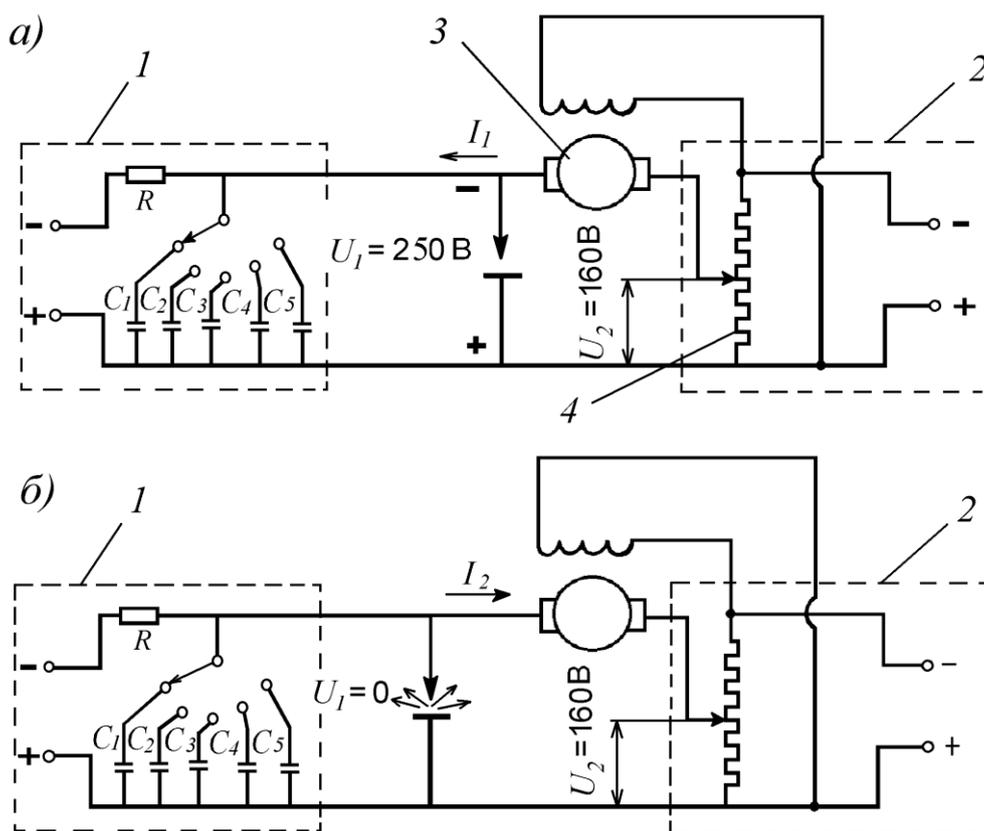


Рис. 1.3. Принципиальные электрические схемы работы следящей системы электроискрового станка модели 57М

Частота реверсов двигателя зависит от скорости заряда конденсатора, определяемой сопротивлением резистора  $R$  и динамическими характеристиками механической системы (её инерционностью). Изменяя напряжение вторичного источника питания реостатом 4, можно регулировать частоту реверсов, а, следовательно, скорость движения подачи электрода-инструмента.

Таким образом, якорь электродвигателя, вращаясь с переменной скоростью и направлением вращения, поддерживает некоторую среднюю величину промежутка между электродами  $\delta_T$ , на которую отрегулирована работа следящей системы.

При электроискровой обработке охватываемые размеры обрабатываемого контура получаются больше, а охватываемые меньше, чем размеры электрода-инструмента (рис. 1.2, б) на величину межэлектродного зазора  $\delta_e$  (0,02–0,62 мм). Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании электрода-инструмента и выборе режима обработки.

### **Наладка станка модели 57М на координатное прошивание отверстий**

Координатным прошиванием называется метод обработки сопряженных отверстий на станках, при котором расположение отверстий в детали обеспечивают последовательным позиционированием инструмента перед обработкой каждого из отверстий по размерам, указанным на чертеже. Сопряженными отверстиями, в отличие от осевых отверстий, будем называть два или несколько отверстий в детали, оси которых параллельны и находятся на расстояниях друг от друга, соответствующих указанным на чертеже размерам и точности расположения. Позиционирование инструмента описывается в рамках технологической операции координатного прошивания вспомогательными переходами.

Основная технологическая задача координатного прошивания состоит в получении на заготовке отверстий заданных размеров, форм и расположения относительно других поверхностей и друг относительно друга. Для выполнения этой задачи перед обработкой проводят наладку станка. Процедура наладки включает закрепление и выверку электрода-инструмента; установку заготовки; наладку режима обработки, установку упоров и индикаторов в положения, обеспечи-

вающие требуемые перемещения электрода-инструмента при изготовлении отверстий.

Электрод-инструмент, имеющий в лабораторной работе форму цилиндрического стержня, устанавливают на призму электрододержателя  $\delta$  (см. рис. 1.1) и закрепляют на ней с помощью винта. Если ось электрода-инструмента не параллельна направлению движения подачи  $D_s$ , то искажаются форма, размеры и положение оси прошеного отверстия (рис. 1.4, *a*). Для предотвращения такого рода погрешностей обработки электрод-инструмент после закрепления выверяют. Выверку производят с помощью устройства, позволяющего поворачивать электрод-инструмент в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

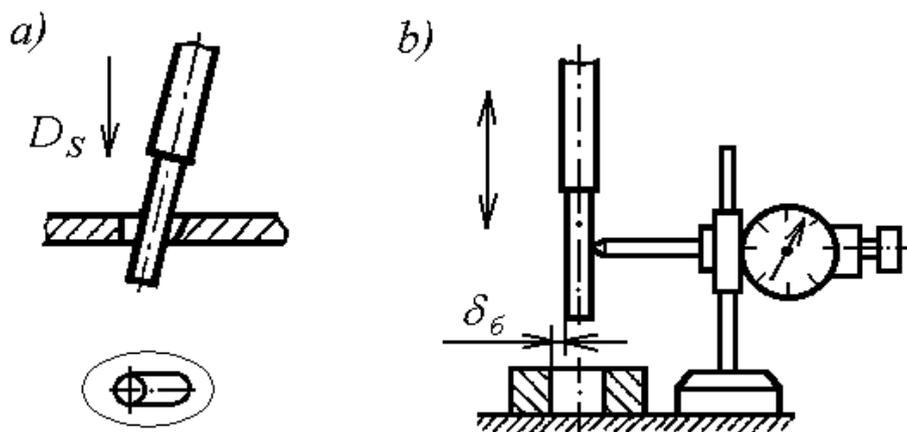


Рис. 1.4. Схемы установки электрода-инструмента с наклоном (*a*) и контроля правильности его положения (*b*)

Контроль правильности установки электрода-инструмента при этом осуществляют с помощью индикатора, закрепленного на стойке, по схеме, представленной на рис. 1.4, *b*. При выверке наконечник индикатора с натягом 1...2 мм прижимают к электроду-инструменту. Последний вместе с кареткой *10* (см. рис. 1.1) вращением вручную зубчатого колеса *13* привода подачи перемещают вверх или вниз. Отклонения от параллельности оси электрода-инструмента направлению движения подачи, улавливаемые индикатором, устраняют с помощью винтов, поворачивающих подвижные части электрододержателя.

Выверку электрода-инструмента производят в направлениях, совпадающих с направлениями перемещений суппортов. Погрешность расположения электрода-инструмента после выверки по каждому координатному направлению не должна превышать 0,01 мм на длине 100 мм.

Заготовка для электроискровой обработки в проводимых экспериментах представлена в виде пластинки. На ней прошивают два сопряженных отверстия, размеры и взаимное расположение которых заданы на чертеже (рис. 1.5). Конкретные значения размеров  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $d_1$  и  $d_2$  задает преподаватель. Размеры расположения отверстий по оси «Y», характеризуемое чертежным размером  $B$ , не контролируются. Заготовку базируют и закрепляют в приспособлении так, что ее базовая грань, от которой проставлен на операционном эскизе размер  $B$  положения общей оси отверстий  $d_1$  и  $d_2$  (рис. 1.5), располагается параллельно направлению перемещения продольного суппорта станка.

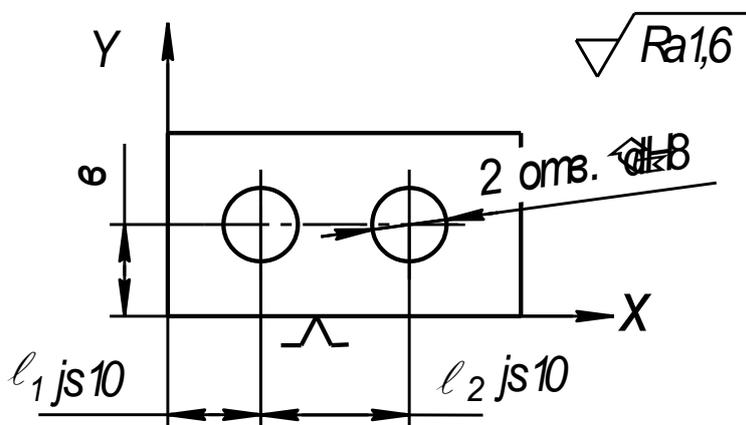


Рис. 1.5. Операционный эскиз

Режим электроискрового прошивания на станке 57М устанавливают с помощью переключателя режимов 2 (см. рис. 1.1), расположенного на лицевой панели станка. Каждый режим характеризуется определенными значениями получаемых параметров шероховатости поверхности и производительности обработки. Значения параметра  $Ra$ , достигаемые при различных режимах, указаны в табл. 1.1.

Таблица 1.1

## Технологические характеристики электроискровой обработки

Параметр обработки	Номер режима обработки				
	1	2	3	4	5
Шероховатость поверхности, $Ra$ , мкм	12,5	6,3	6,3	3,2	1,6
Межэлектродный зазор, $\delta_6$ , мм	0,15	0,1	0,07	0,05	0,03

Последующие действия по наладке станка для прошивания сопряженных отверстий включают установку упоров, индикаторов и перемещение электрода-инструмента в позицию для прошивания отверстия  $d_1$ .

После обработки первого отверстия электрод-инструмент перемещают в позицию для обработки отверстия  $d_2$ . Это перемещение записывают в технологическую карту как вспомогательный переход. Если при этом межосевое расстояние  $\ell_2$  превышает предел измерения индикатора, то для установки электрода-инструмента в новую позицию следует использовать плоскопараллельные концевые меры длины. Их устанавливают между наконечниками индикаторов 15 и 19 и упорами 16 и 18 (см. рис. 1.1).

Координатное прошивание сопряженных отверстий с помощью концевых мер длины и отсчетных индикаторных устройств является методом обработки, обеспечивающим высокую точность взаимного расположения прошитых отверстий. Это связано с тем, что погрешность перемещения электрода-инструмента из одной позиции в другую определяется только точностью его установки по индикатору,  $d$  в первую очередь, ценой деления индикатора. Для используемых при проведении экспериментов индикаторов погрешность межосевого расстояния  $\ell_2$  обычно не превышает 0,01 мм. Значение суммарной расчетной погрешности размера  $\ell_1$  определяется наличием не только погрешности измерения индикатора, но также возможными колебаниями межэлектродного зазора  $\delta_6$  и диаметра электрода инструмента  $d_{эи}$ .

Точность диаметра отверстия, прошеного на электроискровом станке, зависит от большого числа случайных погрешностей. К ним относят погрешности, вызванные температурными деформациями электрода-инструмента и заготовки, погрешности изготовления диаметрального размера электрода-инструмента, неточность его наладки, погрешности, вызванные колебаниями бокового межэлектродного зазора  $\delta_b$  (см. рис. 1.2, б) и погрешность измерения. Однако температурные погрешности обработки малы, так как прошивание отверстия – операция кратковременная, и электрод-инструмент не успевает нагреться. Кроме того, ось электрода-инструмента при наладке выверена относительно стола станка. Поэтому расчетную суммарную погрешность диаметра отверстия на выбранном режиме обработки  $\Delta d^\delta$  можно определить (без учета погрешности измерения) по формуле

$$\Delta d^\delta = 1,2 \sqrt{\Delta d_{yu}^2 + \Delta \delta_a^2}, \quad (1.1)$$

где  $\Delta d_{yu}$  – отклонение размера диаметра электрода-инструмента от его расчетного значения;  $\Delta \delta_a$  – отклонение бокового межэлектродного зазора от значения, указанного в табл. 1.1.

При изготовлении электрода-инструмента допуск на его размер назначают равным 30...40 % от допуска на размер детали. Колебания значения бокового зазора при прошивании обычно не превышают 0,003...0,005 мм. Эти данные позволяют еще до эксперимента оценить возможную точность прошивания отверстия и сопоставить получаемые результаты с расчетными.

## Содержание работы

Лабораторная работа включает изучение теоретических основ наладки электроискрового станка на координатное прошивание сопряженных отверстий, видов погрешностей, возникающих при обработке, методики экспериментального исследования точности прошивания отверстий на станке 57М, проведение эксперимента по коорди-

натному прошиванию отверстий, обработке результатов и составление отчета.

### Порядок выполнения работы

1. Изучите теоретические основы электроискрового прошивания отверстий, назначение, устройство и виды работ, выполняемых на станке 57 М.

2. Получите у преподавателя задание на прошивание сопряженных отверстий по чертежу (см. рис. 1.5) с указанием конкретных размеров.

3. Сформулируйте технологические задачи обработки.

4. Определите структурные элементы технологического процесса изготовления детали и представьте их в форме табл. 1.2.

Таблица 1.2

Структура технологического процесса

Операция		Номера		Содержание перехода	Режим обработки, номер
номер	наименование	позиций	переходов *		

\* – указываются последовательно номера технологических и вспомогательных переходов.

5. Установите и закрепите заготовку.

6. По значению заданного на чертеже параметра шероховатости поверхности и, используя данные табл. 1.1, выберите номер режима обработки первого отверстия и установите его на станке переключателем 2;

– рассчитайте диаметр электрода-инструмента, используя данные табл. 1.1, по формуле

$$d_{эи} = d_1^{ном} - 2\delta_{\sigma}. \quad (1.2)$$

7. Закрепите электрод-инструмент в электрододержателе и произведите его выверку по ранее описанной методике.

8. Переместите электрод-инструмент в позицию для обработки первого отверстия  $d_1$ . Для этого:

- установите и закрепите индикатор на станке;
- подведите электрод-инструмент к торцу заготовки, соблюдая между ними зазор  $\delta_6$ , соответствующий принятому режиму обработки (см. табл. 1.1); зазор проконтролируйте щупом толщиной  $b_{щ}$  (рис. 1.6, а);

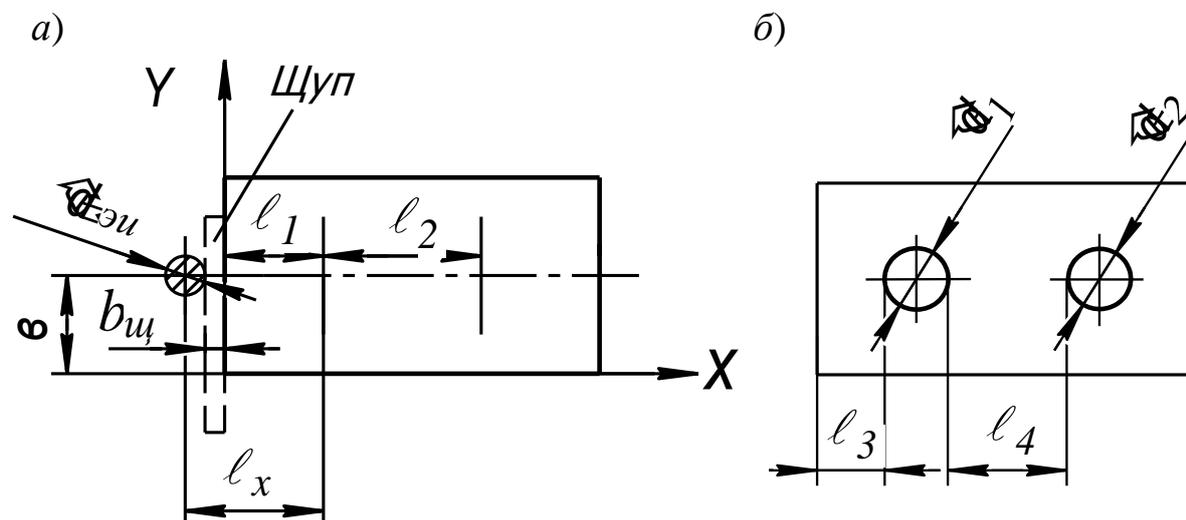


Рис. 1.6. Схема определения перемещения электрода-инструмента для прошивания первого отверстия (а) и измеряемые размеры изготовленной детали (б)

- при отсутствии набора щупов исходное положение электрода-инструмента зафиксируйте по моменту появления электрического разряда между электродом-инструментом и заготовкой при подведении электрода-инструмента к заготовке, поданном на них напряжении и установленном режиме обработки. Зафиксированный по прохождению искрового разряда межэлектродный зазор в этом случае определите по табл. 1.1;

- установите на каретке упор 18 (см. рис. 1.1) таким образом, чтобы его опорная часть касалась наконечника индикатора 19 и создавала натяг равный 1...2 мм;

- установите индикатор на ноль и вращением зубчатого колеса привода подачи вручную против часовой стрелки поднимите электрод-инструмент;

– сместите электрод-инструмент, вращая рукоятку  $P_2$ , в продольном направлении на величину  $\ell_x$ , рассчитанную по формуле (1.3), используя показания индикатора продольного перемещения;

$$\ell_x = \ell_1 + b_{щ} + d_{эи}/2, \quad (1.3)$$

где  $\ell_x$  — расстояние, на которое необходимо переместить электрод-инструмент, мм;  $b_{щ}$  — толщина щупа (или ширина межэлектродного зазора, определенного по табл. 1.1), мм;

– отведите электрод-инструмент за пределы заготовки вращением рукоятки  $P_2$  и опустите его ниже поверхности заготовки;

– произведите наладку станка на выполнение размера  $B$ , используя методику настройки станка аналогичную методике настройки на размер  $\ell_1$ .

9. Обработайте первое отверстие.

10. Произведите наладку станка на прошивание отверстия  $d_2$ , для чего:

– наберите блок плоскопараллельных мер длины по размеру, равному значению  $\ell_2$ , и установите его между упором и наконечником индикатора продольных перемещений;

– переместите продольный суппорт на заданное расстояние, используя индикатор.

11. Обработайте второе отверстие.

12. При помощи малого инструментального микроскопа МИМ произведите измерения размеров  $\ell_3$ ,  $d_1$ ,  $\ell_4$  и  $d_2$  (рис. 1.6, б), заполните таблицу П1 протокола измерений и определите их средние значения. Форма протокола измерений приведена в разделе «Содержание отчета» данной работы.

13. По измеренным значениям размеров рассчитайте действительные размеры  $\ell_1^0$  и  $\ell_2^0$  и заполните табл. 1.3.

Таблица 1.3

Результаты измерения размеров детали

Номер измерения	Результаты измерений, мм	Действительные (расчетные) значения

	$\ell_3$	$\ell_4$	$d_1$	$d_2$	$\ell_1^\delta$	$\ell_2^\delta$
1						
2						
3						
Средние значения						

14. Определите значения погрешностей  $\Delta d_1^\delta, \Delta d_2^\delta, \Delta \ell_1^\delta, \Delta \ell_2^\delta$ , используя следующие формулы:

$$\Delta d_i^\delta = |d_i^\delta - d_i^{\text{ном}}|, \quad \Delta \ell_i^\delta = |\ell_i^\delta - \ell_i^{\text{ном}}|,$$

где  $i$  — номер отверстия,  $i = 1, 2$ ;  $d_i^\delta$  — действительные размеры отверстий, полученные в результате измерений (размеры  $d_1$  и  $d_2$  в табл. 1.4);  $d_i^{\text{ном}}, \ell_i^{\text{ном}}$  — номинальные размеры диаметра  $i$ -го отверстия и его расположения относительно торца заготовки (см. рис. 1.5).

15. Рассчитайте теоретические погрешности диаметров  $\Delta d_i^\delta$  и расположения изготовленных отверстий  $\Delta \ell_i^\delta$  и сопоставьте их значения с действительными, заполнив табл. 1.4.

Таблица 1.4

Сопоставительные данные результатов эксперимента и расчета

$d_1 =$			$\ell_1 =$			$d_2 =$			$\ell_2 =$		
$d_1^{\ddot{a}}$	$\Delta d_1^\delta$	$\Delta d_1^{\ddot{a}}$	$\ell_1^{\ddot{a}}$	$\Delta \ell_1^\delta$	$\Delta \ell_1^{\ddot{a}}$	$d_2^{\ddot{a}}$	$\Delta d_2^\delta$	$\Delta d_2^{\ddot{a}}$	$\ell_2^{\ddot{a}}$	$\Delta \ell_2^\delta$	$\Delta \ell_2^{\ddot{a}}$

*Примечание.* Размеры  $d_1, \ell_1, d_2, \ell_2$  указываются с отклонениями.

16. Сделайте выводы о достигнутом качестве точности выполнения размеров, годности детали и точности наладки станка, используя данные табл. 1.5.

Таблица 1.5

Поля допусков на размеры изготавливаемой детали

Размер, мм	js7	js8	js9	js10	js11	js12	js13	js14
	Предельные отклонения, мкм							

$d = 3-6$	$\pm 6$	$\pm 9$	$\pm 15$	$\pm 24$	$\pm 37$	$\pm 60$	$\pm 90$	$\pm 150$
$\ell_1 = 10-18$	$\pm 9$	$\pm 13$	$\pm 21$	$\pm 35$	$\pm 55$	$\pm 90$	$\pm 135$	$\pm 215$
$\ell_2 = 18-30$	$\pm 10$	$\pm 16$	$\pm 26$	$\pm 42$	$\pm 65$	$\pm 105$	$\pm 165$	$\pm 260$

### Содержание отчета

1. Наименование работы.
2. Операционный эскиз заготовки.
3. Технологические задачи электроискрового прошивания.
4. Условия проведения эксперимента: технологическое оборудование, приспособления, инструмент, рабочая жидкость.
5. Структура технологического процесса координатного прошивания сопряженных отверстий (по форме табл. 1.2).
6. Эскиз заготовки с указанием измеряемых размеров.
7. Результаты измерений в виде таблицы П1 протокола измерений.
8. Расчеты диаметров, линейных размеров, суммарных расчетных  $\Delta_{\Sigma}^{\delta}$  и действительных  $\Delta_{\Sigma}^{\rho}$  погрешностей обработки по размерам  $d_1, d_2, \ell_1, \ell_2$ , сравнение погрешностей (по форме табл. 1.5).
9. Выводы.

В данном разделе отчета нужно сделать выводы:

- о достигнутом при обработке отверстий качестве точности размеров диаметров и расстояний  $\ell$ ;
- по соответствию расчетных и экспериментальных погрешностей размеров диаметров ( $\Delta d_i$ ) и межосевых расстояний ( $\Delta \ell_i$ );
- о точности наладки станка и его возможностях по обеспечению точности размеров.

В случае превышения фактических погрешностей обработки  $\Delta^{\delta}$  над расчетными погрешностями  $\Delta^{\rho}$  следует дать предположительные объяснения данному факту.

9. Приложение. Протокол измерений (по далее приведенной форме).

Приложение

**ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ  
«НАЛАДКА ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО СТАНКА 57М НА КООРДИНАТНОЕ  
ПРОШИВАНИЕ СОПРЯЖЕННЫХ ОТВЕРСТИЙ»**

Группа \_\_\_\_\_

Дата проведения эксперимента « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

**1. Условия проведения эксперимента**

1.1. Оборудование: \_\_\_\_\_

1.2. Рабочая среда: \_\_\_\_\_

1.3. Материал заготовки: \_\_\_\_\_

1.4. Материал электрода-инструмента: \_\_\_\_\_

1.5. Выполняемые размеры:  $d =$  \_\_\_\_\_ ,  $\ell_1 =$  \_\_\_\_\_ ,  $\ell_2 =$  \_\_\_\_\_ .

1.6. Номер режима обработки: \_\_\_\_\_

1.7. Измерительные инструменты и приборы: \_\_\_\_\_

**2. Таблица измерений**

Таблица П1

Результаты измерений размеров и расположения отверстий

Номер измерения	Результаты измерений, мм			
	$\ell_3$	$d_1$	$\ell_4$	$d_2$
1				
2				
3				
Средние значения				

Студент(ка) \_\_\_\_\_

Преподаватель \_\_\_\_\_

## **2. ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ И ТОЧНОСТЬ РАЗМЕРОВ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ОТРЕЗАНИЯ НА СТАНКЕ 4А731**

*Цель работы:* знания устройства электроискрового вырезного станка модели 4А731, технологических характеристик электроискрового разрезания заготовок проволочным электродом-инструментом; умения проводить наладку станка на операцию отрезания, выбирать режим обработки; проводить эксперименты по определению точности размеров при электроискровом отрезании, зависимости параметров шероховатости обработанной поверхности от режима разрезания и осуществлять статистическую обработку результатов эксперимента.

### **Назначение и устройство электроискрового вырезного станка модели 4А731**

Электроискровой вырезной станок с проволочным электродом-инструментом модели 4А731 предназначен для вырезания сложно-профильных изделий из токопроводящих материалов и разрезания заготовок, обработка которых традиционными методами резания затруднена или практически невозможна. На станке изготавливают рабочие элементы вырубных штампов и прессформ, фасонных резцов, копиров, элементы деталей для ювелирной промышленности, а также выполняют операции размерного раскроя заготовок.

Электроискровое разрезание заготовки (ЭИСО) проволочным непрофилированным электродом-инструментом является одним из методов электроэрозионной обработки, осуществляемой в жидкой диэлектрической среде. При ЭИСО обеспечивается шероховатость поверхности реза по параметру  $Ra$  до 2 мкм, а точность выполняемых размеров соответствует шестому качеству точности.

Устройство и элементы рабочей зоны станка, где происходит обработка заготовки, представлены на рис. 2.1.

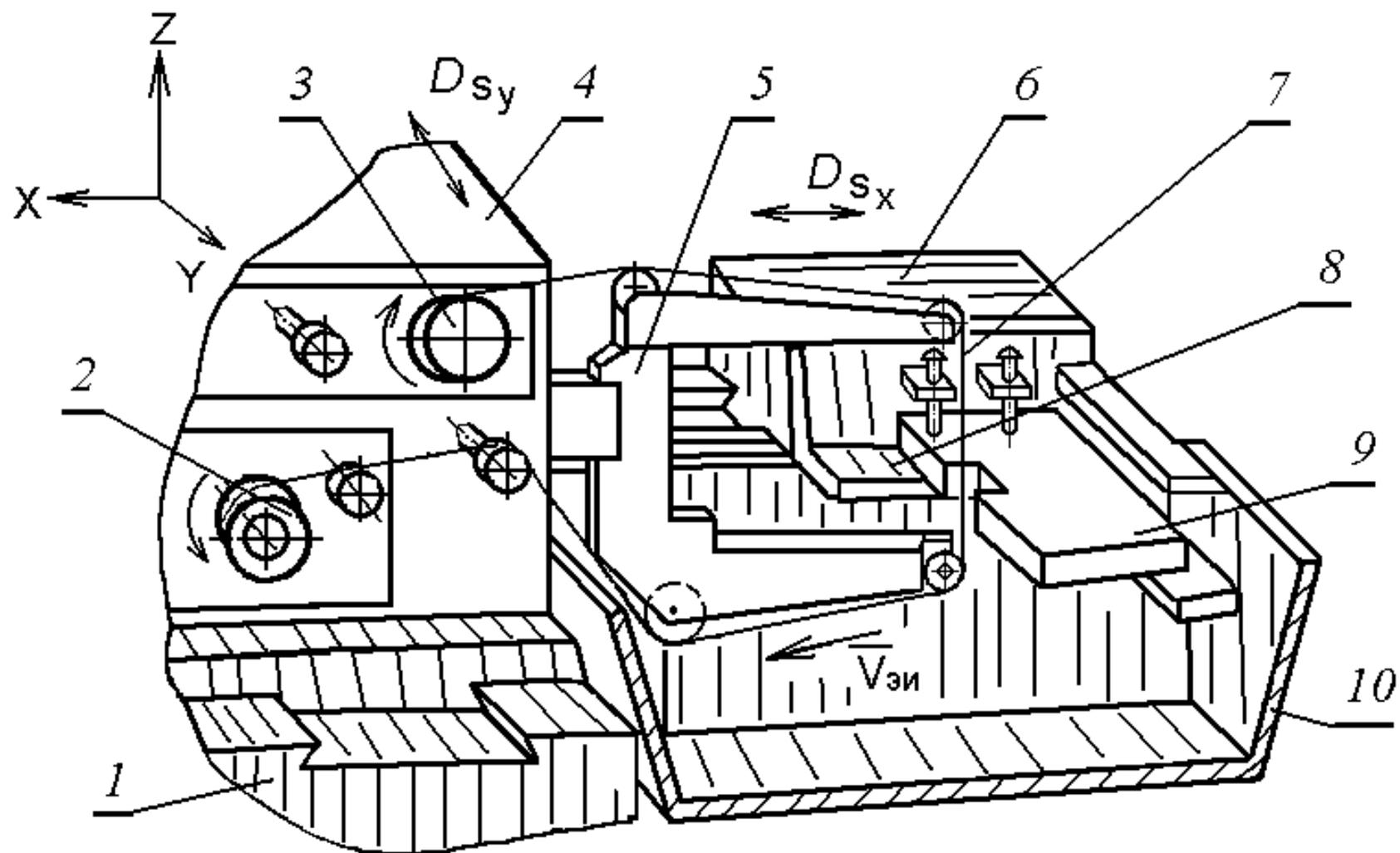


Рис. 2.1. Рабочая зона станка 4А731

Основой станка является станина *1*, на которой расположены две каретки: продольная *6* и поперечная *4*. Продольная каретка совершает перемещения по направляющим станины в направлении оси *X* (движение продольной подачи  $D_{sx}$ ) вместе со столом *8*, на котором с помощью прихватов закрепляют заготовку *9*. На этом же столе при вырезании детали заданного контура устанавливают копир с заготовкой.

Каретка поперечных перемещений, обеспечивающая заготовке движение подачи  $D_{sy}$  (в направлении оси *Y*), несет на себе устройства для натяжения и перемотки проволочного электрода-инструмента *7* и скобу *5* с направляющими роликами. По этим роликам перемещается электрод-инструмент, перематываясь с подающей катушки *3* на приемную катушку *2*. В процессе обработки заготовку погружают в ванну *10* с рабочей жидкостью, которой чаще всего является техническая вода.

Источником импульсов электрического тока между электродом-инструментом и заготовкой является генератор импульсов ГКИ–250, который представлен на станке в виде отдельного блока (на рис. 2.1 ГКИ не показан).

### **Технологические параметры режима электроискрового отрезания**

В режиме электроискровой обработки различают электрические и механические параметры. К электрическим параметрам режима относят: частоту импульсов  $f_u$ , кГц; емкость  $C$  блока конденсаторов ГКИ–250, Ф; напряжение холостого хода  $U_{xx}$ , В; напряжение пробоя на межэлектродном промежутке  $U_{np}$ , В; силу тока импульса  $I_u$ , А и энергию импульса  $W_u$ , Дж, определяемую по формуле

$$W_u = CU_{np}^2 / 2 . \quad (2.1)$$

Группа механических параметров режима электроискрового разрезания включает: скорости продольной и поперечной подач заготовки  $\mathcal{G}_{sx}$ ,  $\mathcal{G}_{sy}$ , мм/мин; силу натяжения проволоки  $P_{эи}$ , Н; межэлектродный зазор  $\delta$ , мм; скорость перемотки проволоки  $\mathcal{G}_{эи}$ , м/мин.

Исходными при наладке режима ЭИСО являются электрические параметры  $f_u$ ,  $C$ ,  $U_{xx}$ ,  $U_{np}$ ,  $I_u$ . Принятые их значения определяют как механические характеристики, так и технико-экономические показатели процесса: энергию импульса  $W_u$ , Дж; производительность обработки по площади  $P_s$ , мм<sup>2</sup>/мин; шероховатость поверхности  $Ra$ , мкм. Последние два показателя рассчитывают по следующим формулам:

$$P_s = \mathcal{G}_s \cdot h; \quad Ra = kW_u^\beta, \quad (2.2)$$

где  $h$  — толщина заготовки, мм;  $k$  и  $\beta$  — неизвестные коэффициенты, определяемые посредством проведения эксперимента.

Выбор режима ЭИСО на станках модели 4A731 осуществляют по прилагаемой к паспорту станка таблице, взяв за исходные данные материал заготовки, ее толщину и значение параметра оптимизации процесса. Параметром оптимизации принимают один из следующих показателей: шероховатость обработанной поверхности  $Ra$ , точность обработки, производительность процесса  $P_s$ . Данные, используемые в лабораторной работе для выбора параметров режима ЭИСО заготовок, приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Технологические параметры режима электроискрового разрезания

№ п/п	Материал заготовки	$h$ , мм	Номер режима	$C$ , мкФ	$U_{xx}$ , В	$U_{np}$ , В	$\mathcal{G}_s$ , мм/мин	$\delta$ , мм	$Ra$ , мкм
1	Сталь 45	10	1	1,6	30	28	1,2	0,015	2,5
2		10	2	2,0	40	32	1,3	0,013	4,0
3		10	3	2,8	48	36	1,4	0,012	5,0
4		5	1	1,6	42	30	0,63	0,01	2,5
5	ВК8	8			52	35	0,5	0,08	4,0
6		8	2	2,0	40	30	0,35	0,07	3,2
7		4			52	33	0,8	0,08	4,5

Окончание табл. 2.1

№ п/п	Материал заготовки	$h$ , мм	Номер режима	$C$ , мкФ	$U_{xx}$ , В	$U_{np}$ , В	$\mathcal{G}_s$ , мм/мин	$\delta$ , мм	$Ra$ , мкм
8	М1	25	3	2,8	44	30	0,76	0,06	4,2
9		10	3	2,8	42	31	1,4	0,07	4,2
10		5	2	2,0	40	33	5,2	0,06	4,4

*Примечания.* 1. Материал проволоки (электрода-инструмента) — Л62; диаметр проволоки — 0,3 мм; скорость перемотки проволоки для стали 45 равна 0,9 м/мин, для материалов М1 и ВК8 — 1,0 м/мин; частота следования импульсов  $f_u = 8$  кГц. 2. Номер режима характеризует значение емкости  $C$  блока конденсаторов генератора импульсов.

Значения таких механических параметров режима ЭИСО заготовки, как  $P_{эи}$  и  $U_{эи}$ , зависят не только от обрабатываемого материала, но и от диаметра и материала электрода-инструмента. Эти параметры выбирают по прилагаемым к паспорту станка графикам, один из которых приведен на рис. 2.2.

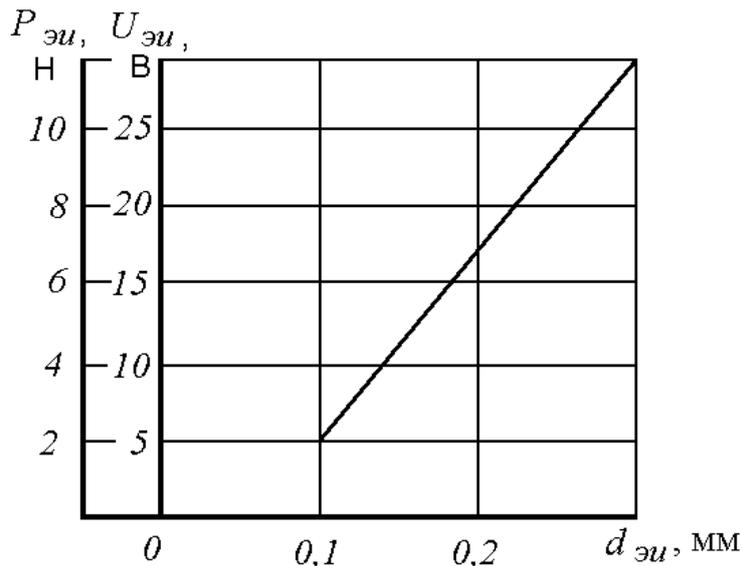
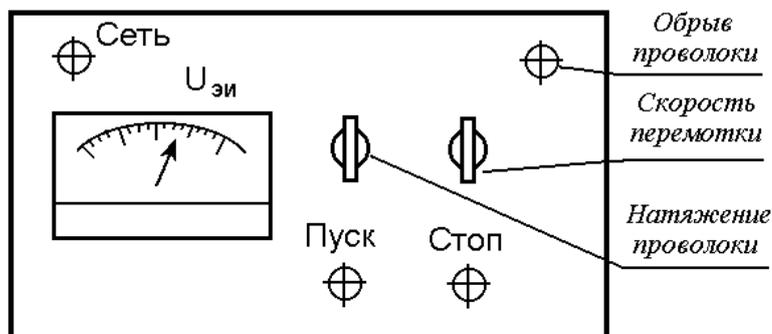


Рис. 2.2. График зависимости силы натяжения проволоки ( $P_{эи}$ ) и напряжения ( $U_{эи}$ ) от диаметра проволоки (электрода-инструмента)

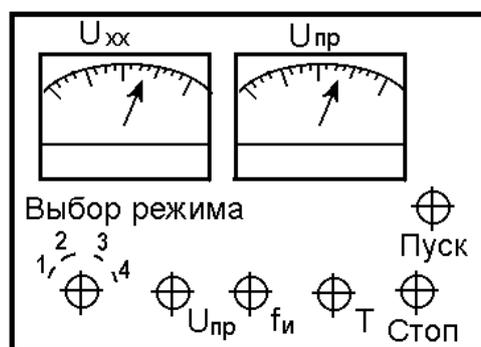
## Управление электроискровым станком модели 4А731

Управление электроискровым станком осуществляют с панелей управления механизмом натяжения и перемотки электрода-инструмента (рис. 2.3, а), генератором импульсов электрического тока (рис. 2.3, б), механизмами перемещений продольной и поперечной кареток станка (рис. 2.3, в).

а)



б)



в)

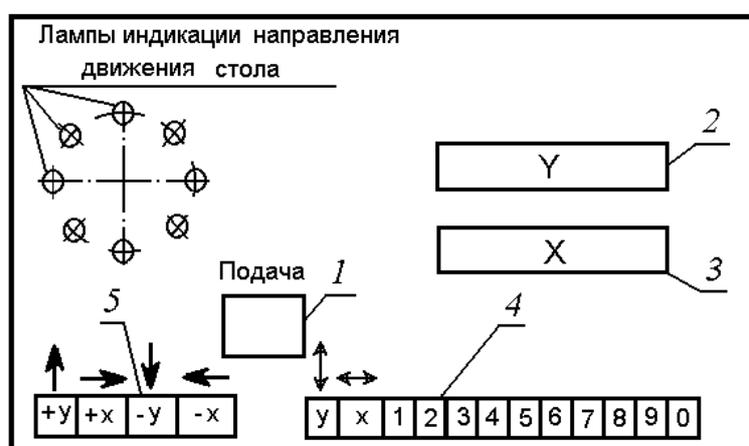


Рис. 2.3. Пульт управления станка 4А731

Значения электрических параметров ЭИСО устанавливают на панели управления генератора импульсов (см. рис. 2.3, б) с помощью рукояток, указанных на рисунке. Контроль напряжения холостого хода  $U_{xx}$  и напряжения пробоя  $U_{np}$  осуществляют по показаниям вольтметров, расположенных на данном пульте.

Направления движений поперечной каретки 4 (см. рис. 2.1) задают нажатием кнопок «+Y» или «-Y» из блока кнопок 5 (см. рис. 2.3, в), продольной каретки 6 (см. рис. 2.1) — включением кнопок «+X» или «-X». Значения перемещений устанавливают поочередно по координатам X и Y набором кнопок 4 (см. рис. 2.3, в). Набранные значения перемещений контролируют по цифровым индикаторам 2 и 3.

### Содержание работы

Лабораторная работа включает изучение назначения и устройства электроискрового вырезного станка с проволочным электродом-инструментом модели 4А731, основ выбора режима обработки, проведение эксперимента по определению зависимостей точности отрезания и параметров шероховатости обработанной поверхности от режима разрезания, обработку экспериментальных данных, выполнение индивидуального задания и составление отчета.

### Последовательность выполнения работы

1. Получите у преподавателя задание на отрезание трех образцов длиной  $\ell$  с точностью « $\pm 0,05$  мм» и шероховатостью обработанных поверхностей  $Ra1,6$  от прутка и следующие данные: материал и размеры (ширина  $b$ , толщина  $h$ ) прутка, материал электрода-инструмента; параметры режима электроискрового отрезания —  $f_u$ ,  $U_{xx}$ ,  $U_{np}$ ,  $I_u$ .

2. Выберите по данным, приведенным в табл. 2.1 и на рис. 2.2, значения натяжения  $P_{эи}$  и скорости перемещения  $\mathcal{G}_{эи}$  электрода-инструмента.



На каждом режиме обработки замерьте основное время  $\tau_0$ , мин.

4. Измерьте микрометром длины отрезанных образцов (по три измерения на каждом). Данные измерений занесите в таблицу П2.1 протокола измерений, форма которого приведена в разделе «Содержание отчета» данной работы.

5. Рассчитайте  $l_{cp}$ ,  $\Delta l = l_{cp} - l_{ном}$  и установите по табл. 2.3 (ГОСТ 25346–89) квалитет точности выполнения размера на каждом из режимов ЭИСО.

Таблица 2.3

Поля допусков на размеры изготавливаемой детали

Размер	js6	js7	js8	js9	js10	js11	js12	js14
$l$ , мм	Предельные отклонения, мкм							
6–10	± 4,5	± 7,5	± 11	± 18	± 29	± 45	± 75	± 180
10–18	± 5,5	± 9	± 13,5	± 21,5	± 35	± 55	± 90	± 215
18–30	± 6,5	± 10,5	± 16,5	± 26	± 42	± 65	± 105	± 260

6. Измерьте на профилометре MarSurf PS1 шероховатость торцов отрезанных образцов по параметру  $Ra$ , сделав по три измерения на каждом образце. С устройством и методикой измерений на профилометре познакомьтесь, изучив Приложение 1. Результаты экспериментов и расчетов занесите в таблицу П2.1 протокола измерений.

7. По данным протокола измерений составьте сводную таблицу результатов по форме табл. 2.4.

Таблица 2.4

Результаты измерений

Номер образца	Номер режима работы	$\tau_0$ , мин	Длина образца, $l_{cp}$ мм	$\Delta l$ , мм	Квалитет точности длины	$Ra$ , мкм
1						
2						
3						

8. Рассчитайте по каждому режиму ЭИСО скорость подачи электрода-инструмента по формуле  $\mathcal{G}_S = b/\tau_o$ , а затем по формуле (2.2) определите производительность процесса  $\Pi_S$ . Найдите значения параметров  $\mathcal{G}_S$  и  $\Pi_S$  по паспортным данным станка, представленным в табл. 2.1. Результаты расчета и табличные значения занесите в табл. 2.5. Сопоставьте эти значения и сделайте вывод о степени их соответствия.

Таблица 2.5

Расчетные значения характеристик процесса

Номер образца	Номер режима работы ГКИ	$\mathcal{G}_S$ , мм/мин		$W_u$ , Дж	$\Pi_S$ , мм <sup>2</sup> /мин	
		расчетная	табличная	табличная	расчетная	табличная

9. Рассчитайте по указанным преподавателем параметрам обработки скорость подачи  $\mathcal{G}_S$  для процесса разрезания заготовки дисковой отрезной фрезой и сопоставьте полученные данные со скоростью электроэрозионного разрезания.

10. Постройте график функции  $Ra = f(W_u)$ . Укажите на графике экспериментальные точки  $(Ra_i, W_i)$ , соедините их тонкой ломаной линией и нанесите зрительно аппроксимирующую кривую, используя рекомендации, представленные в разделе «Обработка экспериментальных данных».

11. Используя метод наименьших квадратов (см. раздел «Обработка экспериментальных данных»), рассчитайте с помощью вычислительного пакета MathCad коэффициенты  $k$  и  $\beta$  аппроксимирующей функции  $Ra = f(W_u)$ . Напишите уравнение зависимости  $Ra = kW_u^\beta$  с числовыми значениями коэффициентов.

12. Получите от преподавателя индивидуальное задание (табл. 2.6).

## Индивидуальные задания

Но- мер п/п	Материал заготовки	Размеры детали		Параметр оптимизации $Ra$ , мкм
		$b$ , мм	$h$ , мм	
1	Сталь 45	5	10	3,2
2		15	10	6,3
3		5	5	3,2
4	ВК8	3	8	4,0
5		5	8	3,2
6		10	4	5,0
7	М1	15	10	3,2
8		10	25	4,0
9		15	5	5,0

13. Выберите по табл. 2.1 режим резания заготовки, рассчитайте следующие характеристики процесса:  $\tau_o$ ,  $W_u$ ,  $\Pi_s$ ,  $Ra^{расч}$  и сопоставьте расчетное значение  $Ra$  с табличным значением. Сделайте выводы.

### Содержание отчета

1. Название работы.
2. Условия проведения эксперимента: оборудование, заготовка, инструмент, средства измерения, исходные параметры режима электроискрового резания заготовки.
3. Схема определения расстояния перемещения электрода-инструмента  $L$  при отрезании образцов заданного размера и его расчет.
4. Таблица измерений длин и шероховатости обработанных поверхностей образцов по форме таблицы П2.1 протокола измерений и таблицы расчетных данных (в форме табл. 2.3, 2.4, 2.5). Выводы по таблицам.

5. График зависимости  $Ra = f(W_u)$  по форме рис. 1 и рис. 2.

6. Расчет коэффициентов  $k$ ,  $\beta$  зависимости  $Ra = kW_u^\beta$  методом наименьших квадратов.

7. Выводы по результатам эксперимента и о годности изготовленных деталей.

8. Номер, формулировка и исходные данные индивидуального задания.

Индивидуальное задание: «Выбрать режим ЭИСО и рассчитать технико-экономические показатели процесса».

8.1. Выбор параметров режима электроискрового разрезания заготовки.

8.2. Расчет технико-экономических характеристик процесса электроискрового отрезания:  $W_u$ ,  $\Pi_s$ ,  $Ra^{расч}$ .

8.3. Сопоставление производительности  $\Pi_s$  электроэрозионного разрезания заготовки и разрезания отрезной дисковой фрезой.

9. Приложения.

Приложение 1. Презентация расчетов и графических зависимостей, выполненных с помощью вычислительного пакета MathCad.

Приложение 2. Протокол измерений (по далее приведенной форме).

Приложение 2

### ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ

#### К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ «ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ И ТОЧНОСТЬ РАЗМЕРОВ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ОТРЕЗАНИЯ»

Группа \_\_\_\_\_

Дата проведения эксперимента « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201 \_\_\_\_ г.

#### 1. Условия проведения эксперимента

1.1. Оборудование: \_\_\_\_\_

1.2. Рабочая среда: \_\_\_\_\_

1.3. Характеристики электрода-инструмента: \_\_\_\_\_

1.4. Материал заготовки: \_\_\_\_\_

1.5. Форма и размеры заготовки: \_\_\_\_\_

1.5. Режим обработки: \_\_\_\_\_

1.7. Измерительные инструменты и приборы: \_\_\_\_\_

## 2. Таблица измерений

Таблица П2.1

Результаты измерений экспериментальных образцов

Но- мер образ- ца	Но- мер режи- ма рабо- ты	$\tau_0$ , мин	Длины образцов, $l$ , мм					$Ra$ , мкм			
			Номер измерения			$l_{cp}$	$\Delta l$ , мм	Номер измерения			$Ra_{cp}$
			1	2	3			1	2	3	
1											
2											
3											

Студент(ка) \_\_\_\_\_

Преподаватель \_\_\_\_\_

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗАГОТОВКИ ОТ ПЛОТНОСТИ ТОКА

**Цель работы:** знания физико-химических основ электрохимической обработки; умение экспериментальным методом устанавливать зависимости технологических характеристик электрохимической обработки заготовки от плотности тока для конкретных условий обработки.

#### Физико-химические основы электрохимической обработки

В основе электрохимической обработки (ЭХО) лежат окислительно-восстановительные процессы, протекающие на электродах, помещенных в электролит, при пропускании через электролит постоянного электрического тока. В совокупности эти процессы называют *электролизом*. Электролитами при ЭХО являются водные растворы: солей (NaCl, NaNO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, KCl и др.), кислот (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub> и др.), щелочей (NaOH, KOH и др.).

В качестве примера далее рассмотрены процессы, проходящие при электролизе в водном растворе хлорной меди CuCl<sub>2</sub> с анодом из меди (рис. 3.1).

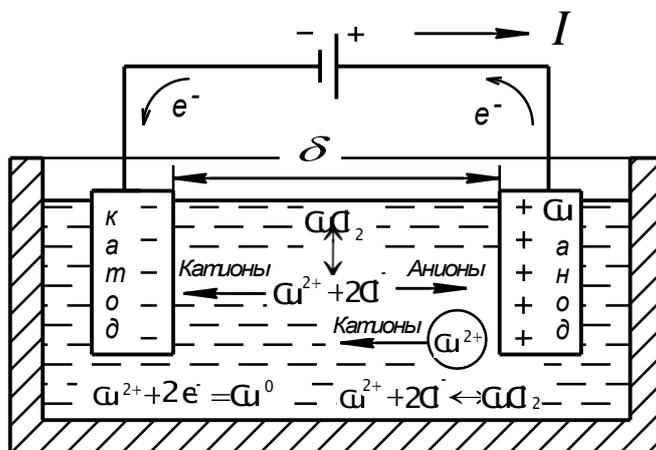


Рис. 3.1. Схема электролиза меди в растворе CuCl<sub>2</sub>

В воде молекулы хлорной меди диссоциируют на ионы по следующей схеме:  $\text{CuCl}_2 \leftrightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{Cl}^-$ . При создании на электродах от источника питания разности потенциалов анионы хлора начинают двигаться к аноду, а катионы меди – к катоду. Электрическая цепь (источник питания – электрод-катод – электролит – электрод-анод – источник питания) при этом замыкается.

Источник питания начинает перемещать электроны с анода во внешнюю цепь. Отдав электроны, атомы меди в виде ионов переходят в электролит. Происходит растворение материала анода. Подошедшие к катоду катионы меди присоединяют электроны из внешней цепи и осаждаются в атомарном виде на катоде, формируя покрытие. Фактически происходит перенос атомов меди с анода на катод.

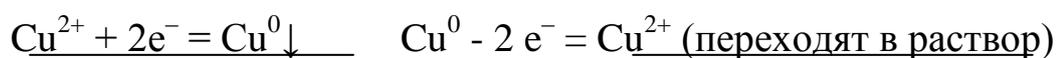
На катоде осуществляется процесс восстановления меди, т. е. присоединения электронов, а на аноде – окисления, т. е. отдача электронов.

В целом электролиз водного раствора  $\text{CuCl}_2$  при медном аноде можно представить в виде следующей схемы:



Катод:  $\text{Cu}^{2+}, \text{H}_2\text{O}$

Анод (Cu): Cu,  $\text{Cl}^-, \text{H}_2\text{O}$



Физико-химические процессы, протекающие при электролизе, легли в основу разработки электрохимических методов обработки заготовок. Так, растворение материала анода стало предпосылкой создания группы методов электрохимической размерной обработки, полирования, комбинированных методов, а осаждение металла на катоде легло в основу получения электрохимических покрытий на заготовках.

Процессы, проходящие при электролизе на электродах и в растворе, зависят как от состава электролита, так и от материалов, из которых сделаны электроды. Основные соотношения, описывающие электролиз, установлены и сформулированы в 1833–1834 годах английским ученым М. Фарадеем. Согласно объединенному закону

М. Фарадея масса вещества, окисленного на аноде и восстановленного на катоде,  $m$ , кг, прямо пропорциональна количеству прошедшего через электролит электричества. Этот закон выражается следующей математической формулой:

$$m = k_{\text{эx}} \cdot q = k_{\text{эx}} \cdot I \cdot \tau_o, \quad (3.1)$$

где  $k_{\text{эx}}$  — электрохимический эквивалент вещества, кг/Кл;  $q$  — количество электричества, Кл;  $I$  — сила тока, А;  $\tau_o$  — время протекания процесса, с. Коэффициент  $k_{\text{эx}}$  численно равен массе вещества в килограммах, растворенного (перемещенного с анода на катод) при  $I = 1$  А за одну секунду.

Фактическая масса вещества, прореагировавшего при электрохимической обработке на аноде, всегда меньше массы, вычисленной по закону Фарадея. Это объясняется тем, что часть количества электричества тратится на побочные реакции на электродах, образование газов, прохождение вторичных реакций в электролите. Эту разницу оценивают коэффициентом *выхода по току*  $k_\eta$ :

$$k_\eta = m_\phi / m, \quad (3.2)$$

где  $m_\phi$  — фактическая масса растворенного вещества, кг.

Значение  $k_\eta$  для разных процессов варьируется в широких пределах и зависит от условий, при которых реализуется процесс электролиза; загрязнений электролита продуктами реакций, температуры электролита, плотности тока и других параметров процесса.

С учетом значения  $k_\eta$  уравнение (3.1) для расчета фактической массы растворенного металла приобретает следующий вид

$$m_\phi = k_\eta \cdot k_{\text{эx}} \cdot I \cdot \tau_o. \quad (3.3)$$

Ввиду большого числа факторов, влияющих на коэффициент  $k_\eta$ , найти его значение теоретическим путем не удастся. Поэтому на практике *выход по току* определяют экспериментально через отношение

$$k_\eta = \frac{m_\phi}{m} = \frac{\rho_m S \Delta h}{k_{\text{эx}} I \tau_o}, \quad (3.4)$$

где  $\rho_m$  — плотность материала анода, кг/м<sup>3</sup>;  $S$  — площадь анода, подлежащая обработке, м<sup>2</sup>;  $\Delta h$  — толщина растворенного слоя металла анода, м.

Скорость электрохимического растворения  $\mathcal{G}_p$  в линейных единицах (м/с), может быть определена следующим образом:

$$\mathcal{G}_p = \frac{\Delta h}{\tau_o} = k_\eta \frac{k_{\text{эx}} I}{\rho_m S} = k_\eta \frac{k_{\text{эx}}}{\rho_m} \rho_i, \quad (3.5)$$

где  $\rho_i$  — плотность тока, А/м<sup>2</sup>.

Непосредственные расчеты  $\mathcal{G}_p$  по формуле (3.5) провести не удастся, так как с увеличением плотности тока падает значение *выхода по току*. При этом наблюдается рост удельной энергоемкости процесса, значение которой  $w_m$ , Дж/кг, рассчитывают по формуле:

$$w_m = I \cdot U \cdot \tau_o / m_\phi, \quad (3.6)$$

где  $U$  — напряжение на электродах, В.

Из формулы (3.6) следует, что удельная энергоемкость  $w_m$  процесса ЭХО с возрастанием силы тока  $I$  увеличивается. Росту  $w_m$  способствует еще и то, что одновременно с ростом силы тока падает *выход по току*.

Плотность тока в электролите  $\rho_i$  согласно закону Ома можно определить отношением

$$\rho_i = \gamma_{\text{эл}} \cdot \Delta U_{\text{эл}} / \delta, \quad (3.7)$$

где  $\gamma_{\text{эл}}$  — удельная электропроводность электролита с учетом его нагрева и газонаполнения по мере протекания через межэлектродный промежуток;  $\Delta U_{\text{эл}}$  — падение напряжения в электролите или эффективное напряжение на электродах в вольтах, равное разности между приложенным к электродам напряжением  $U$  и суммой электродных потенциалов  $\Delta E = E_a + E_k$ , где  $E_a$  — потенциал анода,  $E_k$  — потенциал катода.

Таким образом, скорость электрохимического растворения металла электрода-заготовки с учетом параметров установленного режима ЭХО определяется уравнением

$$g_p = k_\eta k_{\text{эx}} \gamma_{\text{эл}} (U - \Delta E) / \delta. \quad (3.8)$$

В лабораторной работе исследуются охарактеризованные выше зависимости технико-технологических характеристик ЭХО от плотности тока  $k_\eta = f_1(\rho_i)$ ,  $g_p = f_2(\rho_i)$ ,  $w_m = f_3(\rho_i)$ , которые в исследуемом диапазоне режимов электрохимической размерной обработки соответствуют типовым графикам, приведенным на рис. 3.2 [4].

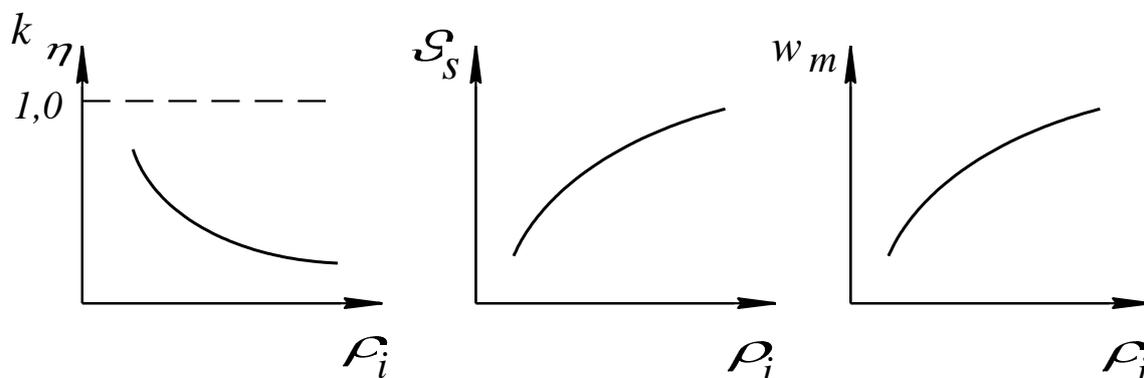


Рис. 3.2. Типовые графики зависимостей параметров электрохимического травления заготовки от плотности тока

### Содержание работы

Работа включает изучение технологических характеристик и основных закономерностей электрохимической размерной обработки, проведение эксперимента с построением графиков зависимостей выхода по току, скорости анодного растворения и удельной энергоемкости электрохимической обработки плоской поверхности заготовки от плотности тока и выполнение индивидуального задания.

### Лабораторная установка ЭХТ–97

Эксперименты проводятся на лабораторной установке для электрохимической обработки ЭХТ–97, основными частями которой являются емкость 4 для электролита, изготовленная из химически стойкого материала, источник тока 1, компрессор 10 и два кронштейна 5 и 8, закрепленных на стенке емкости 4 (рис. 3.3).

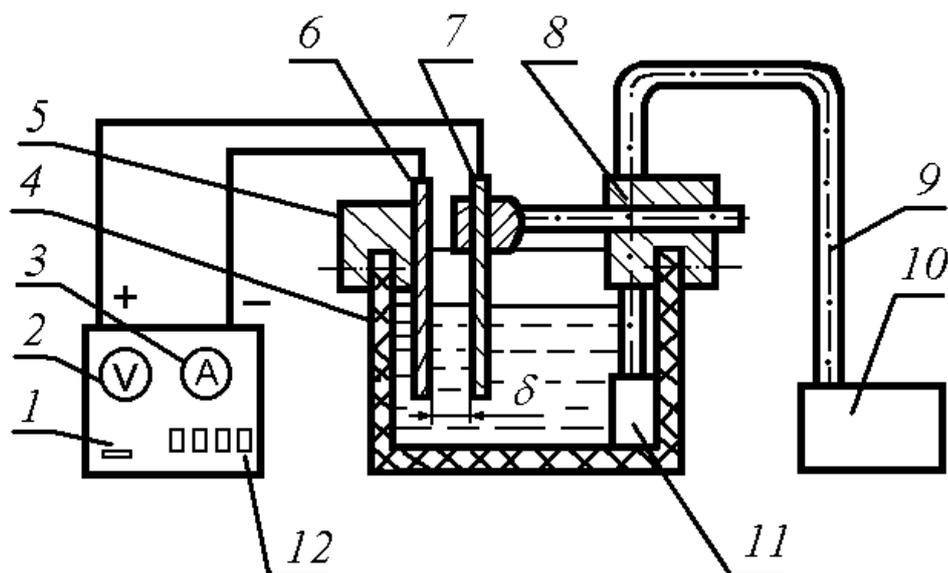


Рис. 3.3. Схема установки ЭХТ-97

Источник тока *1* снабжен встроенными вольтметром *2* и амперметром *3*, которые позволяют контролировать ступенчато изменяемые при переключении тумблеров *12* значения силы тока и напряжения на электродах *6* и *7*, закрепленных соответственно на кронштейнах *5* и *8*.

Ток от источника по гибким шинам подается на электроды *6* и *7*, выполненные в виде пластин. Пластина *6*, являющаяся катодом, изготовлена из нержавеющей стали X18H10T и закреплена при помощи кронштейна *5* на стенке емкости *4*. Емкость заполнена 15 % водным раствором хлорида натрия NaCl.

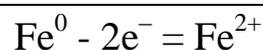
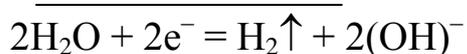
Вторая пластина *7*, представляющая анод, закреплена на противоположной стенке емкости *4* при помощи подвижного кронштейна *8*, который дает возможность изменять межэлектродный зазор  $\delta$  и скорость анодного растворения материала  $\mathcal{G}_p$ . Заготовка-анод, подвергаемая обработке, изготовлена в виде пластины из Стали 45. Обрабатываемая плоскость пластины перед проведением опыта шлифуется с шероховатостью поверхности по параметру *Ra* в пределах 0,8–0,4 мкм. Обратная сторона пластины и боковые поверхности для предохранения их от травления покрыты защитным электроизоляционным покрытием – титановой эмалью Т-1.

Далее в виде схемы даны физико-химические процессы электролиза в созданной для проведения эксперимента технологической системе «электролит – электроды» при прохождении через электролит электрического тока.



Катод:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}_2\text{O}$

Анод (Fe): Fe,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{H}_2\text{O}$



Из представленных уравнений следует, что на поверхности заготовки-анода, обращенной к катоду, в результате окислительной реакции происходит растворение железа, что и составляет основу обработки плоской поверхности заготовки-анода 7, обращенной к катоду 6.

Для эффективного удаления продуктов анодного растворения из межэлектродного промежутка электролит перемешивают потоком воздуха, подаваемого в емкость 4 по гибкому трубопроводу 9 от компрессора 10. С целью предотвращения образования больших воздушных пузырей и выплескивания электролита из емкости конец трубопровода 9 снабжен рассеивателем 11.

### Последовательность выполнения работы

1. Изучите теоретические основы электрохимической размерной обработки.

2. Ознакомьтесь с устройством и принципом работы лабораторной установки ЭХТ–97.

3. Совместно с преподавателем разберите представленные в начале работы формулы химических реакций, протекающих в технологической системе при электрохимической размерной обработке.

4. Получите у учебного мастера заготовку для эксперимента – пластинку, изготовленную из Стали 45.

5. Измерьте штангенциркулем размеры рабочей зоны пластинки, микрометром – толщину  $h$  заготовки и профилометром MarSurf PS1 – шероховатость обрабатываемой поверхности по параметру  $Ra$ , по три

измерения каждого параметра. Полученные значения занесите в таблицу П1 протокола измерений, форма которого представлена в разделе «Содержание отчета» данной работы.

6. Установите заготовку в емкость с электролитом – 15 % водным раствором соли NaCl, выдержав заданное преподавателем значение межэлектродного зазора  $\delta$  (в пределах 3–10 мм).

7. Проведите обработку заготовки в течение 5 минут при заданном преподавателем значении силы тока  $I$  и установившемся значении напряжения  $U$ . После травления измерьте толщину образца  $h$  и шероховатость поверхности  $Ra$ . Результаты измерений занесите в таблицу П2 протокола измерений.

8. Повторите дважды (в табл. П2 – эксперименты 2 и 3) на этом же образце перечисленные в пунктах 5, 6, 7 действия, увеличивая каждый раз значение силы тока  $I$ , и занесите измеренные данные в табл. П2 (эксперименты 2 и 3) протокола измерений.

9. Вычислите значения плотности тока в каждом эксперименте по формуле  $\rho_i = I/S$ , А/м<sup>2</sup>; результаты расчетов занесите в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Результаты расчетов

Номер эксперимента	$\rho_i$ , А/м <sup>2</sup>	$\Delta h$ , м	$m_{\phi}$ , кг	$k_{\eta}$	$\mathcal{E}_p$ , м/с	$\Pi_m$ , кг/с	$w_m$ , Дж/кг
1							
2							
3							

10. Рассчитайте по формуле (3.4) и занесите в табл. 3.1 значения коэффициентов *выхода по току* для каждого эксперимента. Для этого:

– вычислите толщину  $\Delta h$  удаленного за 5 минут обработки слоя материала по каждому эксперименту по формуле  $\Delta h = h_2 - h_1$ , в которой индексы 1 и 2 обозначают номера измерений;

– рассчитайте массу  $m_{\phi}$  удаленного слоя по формуле  $m_{\phi} = \rho_m \cdot S \cdot \Delta h$ , кг;

– используя формулу (3.4) и данные табл. 3.2, определите значения коэффициента выхода по току  $k_{\eta}$ .

Таблица 3.2

Плотность и электрохимические эквиваленты некоторых сплавов

№ п/п	Материал	$\rho_m$ , кг/м <sup>3</sup>	$k_{\text{эx}}$ , кг/Кл
1	2Х13	7750	$2,58 \cdot 10^{-7}$
2	5ХНМ	7800	$2,86 \cdot 10^{-7}$
3	ВК8	14350	$3,10 \cdot 10^{-7}$
4	Т15К6	11000	$2,75 \cdot 10^{-7}$
5	Т5К10	12200	$3,05 \cdot 10^{-7}$
6	30ХГСА	7850	$2,88 \cdot 10^{-7}$
7	38ХНМЮА	7710	$2,83 \cdot 10^{-7}$
8	Д1	2800	$0,93 \cdot 10^{-7}$
9	ВТ16	4680	$1,79 \cdot 10^{-7}$
10	ВТ22	4500	$1,72 \cdot 10^{-7}$
11	ЭИ-893	8800	$2,64 \cdot 10^{-7}$
12	Х18Н9Т	7900	$2,76 \cdot 10^{-7}$
Примечание. В экспериментах используются образцы из Стали 45, имеющей $k_{\text{эx}} = 2,69 \cdot 10^{-7}$ кг/Кл, $\rho_m = 7800$ кг/м <sup>3</sup> .			

11. Рассчитайте производительность по массе  $\Pi_m = m_{\phi}/\tau_o$ , кг/с, и удельную энергоемкость процесса обработки  $w_m$ , Дж/кг, по формуле (3.6) при различных значениях плотности тока. Результаты расчетов занесите в табл. 3.1.

12. Постройте графики экспериментально полученных зависимостей анодного выхода по току, скорости анодного растворения и удельной энергоемкости процесса от плотности тока:  $k_{\eta} = f_1(\rho_i)$ ,  $\mathcal{G}_P = f_2(\rho_i)$ ,  $w_m = f_3(\rho_i)$ . Нанесите на построенные графики типовые графики соответствующих зависимостей, представленные на рис. 3.2. Охарак-

теризуйте степень совпадения полученных результатов с теоретическими зависимостями электрохимической обработки заготовок.

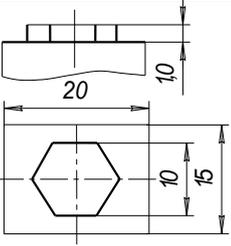
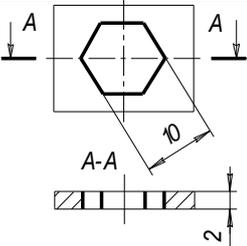
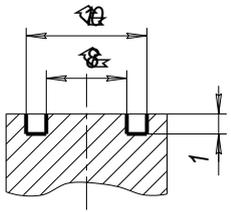
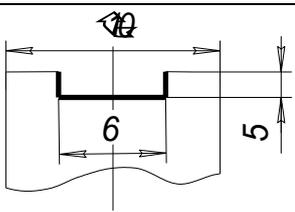
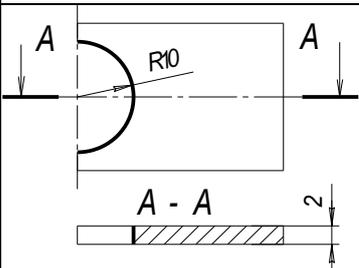
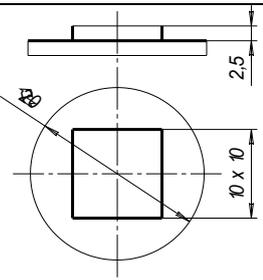
13. Постройте график зависимости шероховатости обработанной поверхности заготовки от плотности тока  $Ra = f(\rho_i)$ .

14. Рассчитайте по предложенным преподавателем параметрам производительность по массе  $\Pi_m$  для процесса концевой фрезерования заготовки и сопоставьте полученные данные с производительностью электрохимической размерной обработки.

15. Получите у преподавателя индивидуальное задание (табл. 3.3).

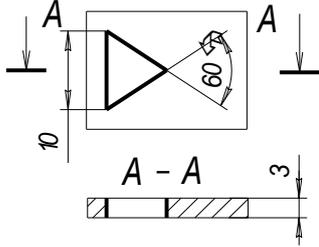
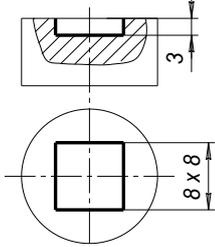
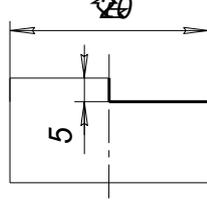
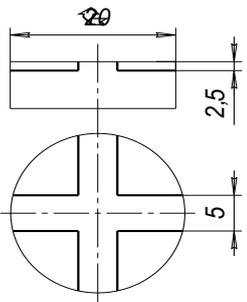
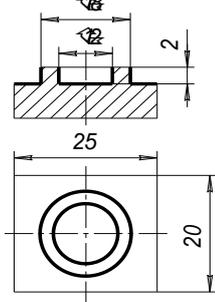
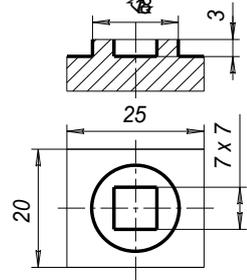
Таблица 3.3

Индивидуальные задания

№ ПП	Операционный эскиз	№ ПП	Операционный эскиз	№ ПП	Операционный эскиз
1	 Материал: 2X13	5	 Материал: 30ХГСА	9	 Материал: ЭИ-893
2	 Материал: Сталь 40Х	6	 Материал: Т5К10	10	 Материал: ВТ16

Окончание табл. 3.3

№ ПП	Операционный эскиз	№ ПП	Операционный эскиз	№ ПП	Операционный эскиз
---------	-----------------------	---------	-----------------------	---------	-----------------------

№ ПП	Операционный эскиз	№ ПП	Операционный эскиз	№ ПП	Операционный эскиз
3	 <p>Материал: 5ХНМА</p>	7	 <p>Материал: Т15К6</p>	11	 <p>Материал: 38ХМЮА</p>
4	 <p>Материал: ВК8</p>	8	 <p>Материал: Сталь 40ХН</p>	12	 <p>Материал: Д1</p>

Выполните по индивидуальному заданию следующие действия:

– нарисуйте схему обработки заготовки и эскиз рабочей части применяемого электрода-инструмента с необходимыми видами и (или) сечениями;

– рассчитайте площадь  $S$  поверхности, подлежащей обработке;

– пользуясь данными, приведенными в табл. 3.3, определите необходимую для выполнения обработки плотность тока по формуле

$$\rho_i = \frac{\mathcal{G}_p \rho_m}{k_{\text{эx}} k_{\eta}}, \text{ А/м}^2;$$

– определите силу тока  $I$ , обеспечивающую скорость анодного растворения  $\mathcal{G}_p = 10^{-6}$  м/с, по формуле  $I = \rho_i \cdot S$ ; анодный выход по току  $k_{\eta}$  примите равным среднему значению, полученному в экспериментах;

– рассчитайте время  $\tau_0$  электрохимической обработки заготовки.

## Содержание отчета

1. Наименование работы.
2. Условия проведения эксперимента: материал и размеры заготовки и ее рабочей зоны, значение межэлектродного зазора  $\delta$ , состав и концентрация электролита, измерительные приборы и инструменты.
3. Таблица результатов эксперимента по форме табл. П2 протокола измерений.  
Расчеты, перечисленные в пунктах 9–11 раздела «Последовательность выполнения работы», и таблица результатов (по форме табл. 3.1).
4. Графики зависимостей:  $k_\eta = f_1(\rho_i)$ ,  $\mathcal{G}_p = f_2(\rho_i)$ ,  $w_m = f_3(\rho_i)$ ,  $Ra = f_4(\rho_i)$ .
5. Сопоставление производительности электрохимической обработки заготовки по эскизу индивидуального задания с производительностью ее обработки методом фрезерования.
6. Выводы.
7. Номер, формулировка, исходные данные индивидуального задания (табл. 3.3) и эскиз детали.  
Индивидуальное задание: «Определить силу тока, необходимую для травления заготовки и рассчитать основное время обработки».
8. Расчеты силы тока  $I$ , обеспечивающей  $\mathcal{G}_p = 10^{-6}$  м/с, и основного времени обработки  $\tau_o$ .
9. Приложение. Протокол измерений (по далее приведенной форме).

Приложение

### ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ

**К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКИ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗАГОТОВКИ ОТ ПЛОТНОСТИ ТОКА»**

Группа \_\_\_\_\_

Дата проведения эксперимента « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201 \_\_\_\_ г.

#### 1. Условия проведения эксперимента

1.1. Оборудование: \_\_\_\_\_

1.2. Рабочая среда: \_\_\_\_\_

1.3. Характеристики электрода-инструмента: \_\_\_\_\_

1.4. Материал, форма и размеры заготовки: \_\_\_\_\_

1.5. Режим обработки: \_\_\_\_\_

1.6. Межэлектродный зазор,  $\delta$ , мм \_\_\_\_\_

1.7. Измерительные инструменты и приборы: \_\_\_\_\_

## 2. Таблицы измерений

Таблица П1

Исходные измерения толщины пластины и шероховатости обрабатываемой поверхности

Номер пластины	Ширина рабочей зоны, $b$ , мм	Толщина заготовки, $h$ , мм			$Ra$ , мкм					
		Номер измерения			$h_{cp}$	Номер измерения			$Ra_{cp}$	
		1	2	3		1	2	3		

Таблица П2

Результаты эксперимента

Номер эксперимента																	
1						2						3					
Номер измерения	$\tau_o$ , с	$I$ , А	$U$ , В	$h$ , м	$Ra$ , мкм	Номер измерения	$\tau_o$ , с	$I$ , А	$U$ , В	$h$ , м	$Ra$ , мкм	Номер измерения	$\tau_o$ , с	$I$ , А	$U$ , В	$h$ , м	$Ra$ , мкм
1	0					1	0					1	0				
2						2						2					

Студент(ка) \_\_\_\_\_

Преподаватель \_\_\_\_\_

## 4. НАЗНАЧЕНИЕ И УСТРОЙСТВО НАСТОЛЬНОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО СТАНКА МОДЕЛИ СНЭ-20МК

**Цель работы:** знания назначения и устройства настольного электрохимического станка модели СНЭ–20МК, последовательности его наладки, методики расчета трудоемкости обработки заготовки и определения значений составляющих штучно-калькуляционного времени; умения определять составляющие трудоемкости обработки по табличным данным и методом хронометрирования, рассчитывать коэффициент непроизводительных затрат времени изготовления детали.

### Назначение станка

Настольный электрохимический станок СНЭ–20МК предназначен для формообразования на заготовках из электропроводящих материалов сложных фасонных поверхностей с площадью обрабатываемой поверхности не более  $2000 \text{ мм}^2$  методом прямого копирования на заготовке формы рабочей части инструмента. Обработка заготовок типа «тело вращения» возможна, если их диаметр не превышает 50 мм.

Производительность и качество электрохимической обработки заготовок практически не зависят от таких механических характеристик их материалов, как твердость, предел прочности, ударная вязкость. Поэтому на станке можно обрабатывать заготовки, термообработанные до требуемой для детали твердости. Заготовки не должны иметь на обрабатываемой и токопроводящих поверхностях окалины. Как правило, операции, выполняемые на станке, являются заключительными в технологическом процессе изготовления детали. Методом электрохимической профильной обработки можно обрабатывать все легированные и инструментальные стали за исключением некоторых жаропрочных сталей и твердых сплавов, требующих разработки специальных технологических процессов.

Отклонения выполненных размеров между поверхностями детали, перпендикулярными направлению движения инструмента, не превышают  $\pm 0,005$  мм, а по размерам между поверхностями, параллельными направлению движения инструмента, —  $\pm 0,002$  мм.

Достижимая шероховатость обработанной поверхности по параметру  $Ra$  равна 0,2 мкм.

На станке СНЭ-20МК можно выполнять операции электрохимической размерной обработки по изготовлению рабочих поверхностей:

- чеканочных матриц для производства ювелирных изделий, памятных медалей, значков, сувениров и других изделий с рельефом поверхности глубиной до 10 мм;
- инструментов к ультразвуковым станкам для художественной обработки изделий из ювелирного камня;
- пуансонов и матриц вырубных и гибочных штампов;
- оформляющих поверхностей литейных форм;
- клейм для маркировки изделий;
- высадного инструмента для изготовления таких крепежных изделий, как винты и заклепки.

Производительность обработки по объему снимаемого металла на станке не превышает  $200 \text{ мм}^3/\text{мин}$ .

### **Технологическая схема работы станка**

В основе работы станка СНЭ–20МК лежит анодное растворение материала заготовки в электролите, идущее в период импульсной подачи напряжения  $U$  на электроды и прохождения в этот момент через электролит электрического тока. Схема осуществления электрохимического формообразования на станке приведена на рис. 4.1.

Как следует из данной схемы, заготовка, являясь в электрической цепи анодом, совершает рабочее движение подачи  $D_S$  в направлении инструмента-катада. Движение заготовки может осуществляться вручную ускоренно, с медленной рабочей подачей и автоматически от специального привода подачи.

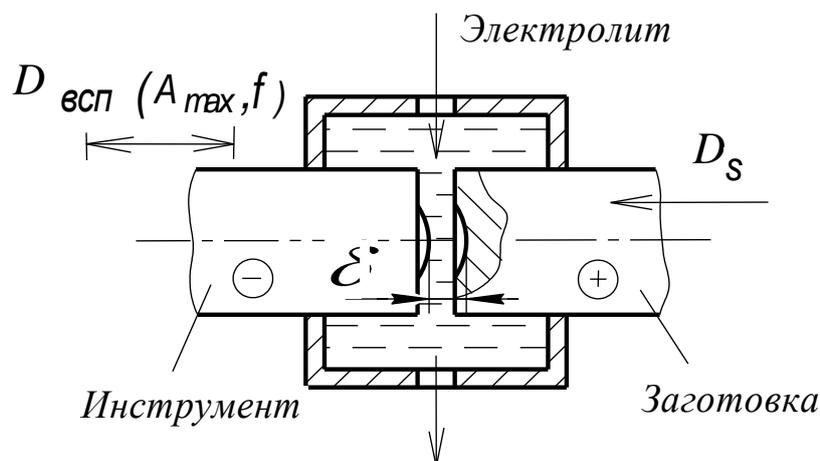


Рис. 4.1. Схема электрохимического формообразования поверхности на станке СНЭ-20МК

Катоду-инструменту при обработке придают колебательные движения вдоль оси «инструмент – заготовка»  $D_{всп}$  (см. рис. 4.1) относительно определенного фиксированного положения с частотой  $f = 25$  Гц и амплитудой  $A = 0,34$  мм (рис. 4.2, а).

В связи с колебаниями катода-инструмента межэлектродный зазор  $\delta$  за период колебания  $T$  изменяется по синусоидальному закону (рис. 4.2, а). Это движение синхронизировано во времени с временными параметрами цикла электрического режима обработки, описываемого графиком изменения напряжения на электродах  $U$ , представленного на рис. 4.2, б. Напряжение на электроды подается импульсами 2 с частотой, равной частоте колебаний электрода-инструмента.

Из графиков (см. рис. 4.2, а и б) следует, что импульсы электрического тока проходят на этапе сближения электродов и завершаются в момент их контакта. Именно за период прохождения импульса происходит обработка заготовки и удаляется припуск  $z_i$  (рис. 4.2, в). Для контроля по приборам момента контакта электродов и длительности контакта на электроды подается маломощный импульс 3 обратной полярности от дополнительного источника тока.

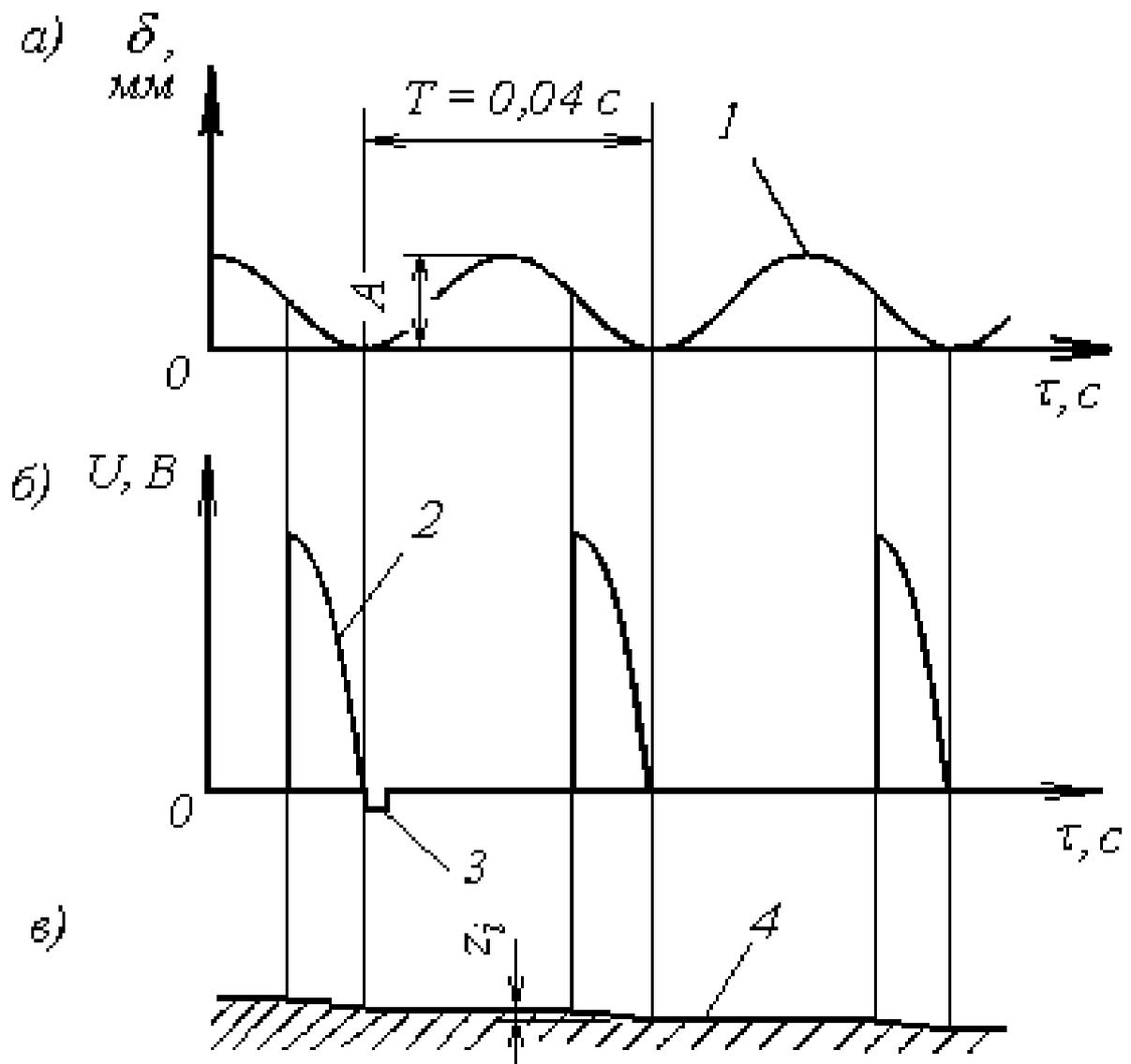


Рис. 4.2. Графики изменения зазора  $\delta$  (а), напряжения на электродах  $U$  (б) и схема удаления припуска  $z_i$  (в) при работе станка

При удалении электрода-инструмента от заготовки технологический ток в систему не подается. В этот период продукты электролиза выносятся из межэлектродного промежутка электролитом, непрерывно прокачиваемым под давлением через рабочую камеру. Тем самым осуществляется замена отработанного электролита на новый. В основу функционирования работы станка положена схема поперечной прокачки электролита через рабочую камеру.

По мере растворения поверхности заготовки межэлектродный зазор  $\delta$  увеличивается, и возникает необходимость его корректировки, что реализуется автоматическим или ручным движением подачи  $D_S$  заготовки в сторону электрода-инструмента (см. рис. 4.1).

### Устройство станка СНЭ–20МК

Станок СНЭ–20МК представляет собой комплекс устройств и приборов, которые в совокупности функциональных связей позволяют осуществлять технологический процесс обработки заготовки электрохимическим методом. В этот комплекс входят (рис. 4.3): стол 12, рабочий агрегат 9, обеспечивающий реализацию указанных на рис. 4.1 рабочих и вспомогательных движений узлов станка, источник тока 5, система циркуляции электролита, позволяющая прокачивать через межэлектродный промежуток электролит с требуемым давлением и заданным расходом, приборы управления и контроля параметров процесса обработки.

На столе станка 12 расположены источник тока 5, универсальный осциллограф С1–94 (поз. б) и плита 11, на которой размещены узлы рабочего агрегата.

Непосредственно у стола находится емкость с электролитом 14 и насос 2, подающий через всасывающий 1 и нагнетающий 4 трубопроводы электролит в электродный блок 10 рабочего агрегата. Из электродного блока отработанный электролит через сливной трубопровод 3 возвращается в емкость 14.

Рабочий агрегат 9, вид сверху на который представлен на рис. 4.4, включает электромеханический привод, обеспечивающий рабочие и вспомогательные движения электродов, электродный блок 13, внутри корпуса которого располагается рабочая камера с электродами, и рукоятки управления. Узлы, устройства и рукоятки рабочего агрегата, выделенные на этом рисунке, имеют следующие обозначения:

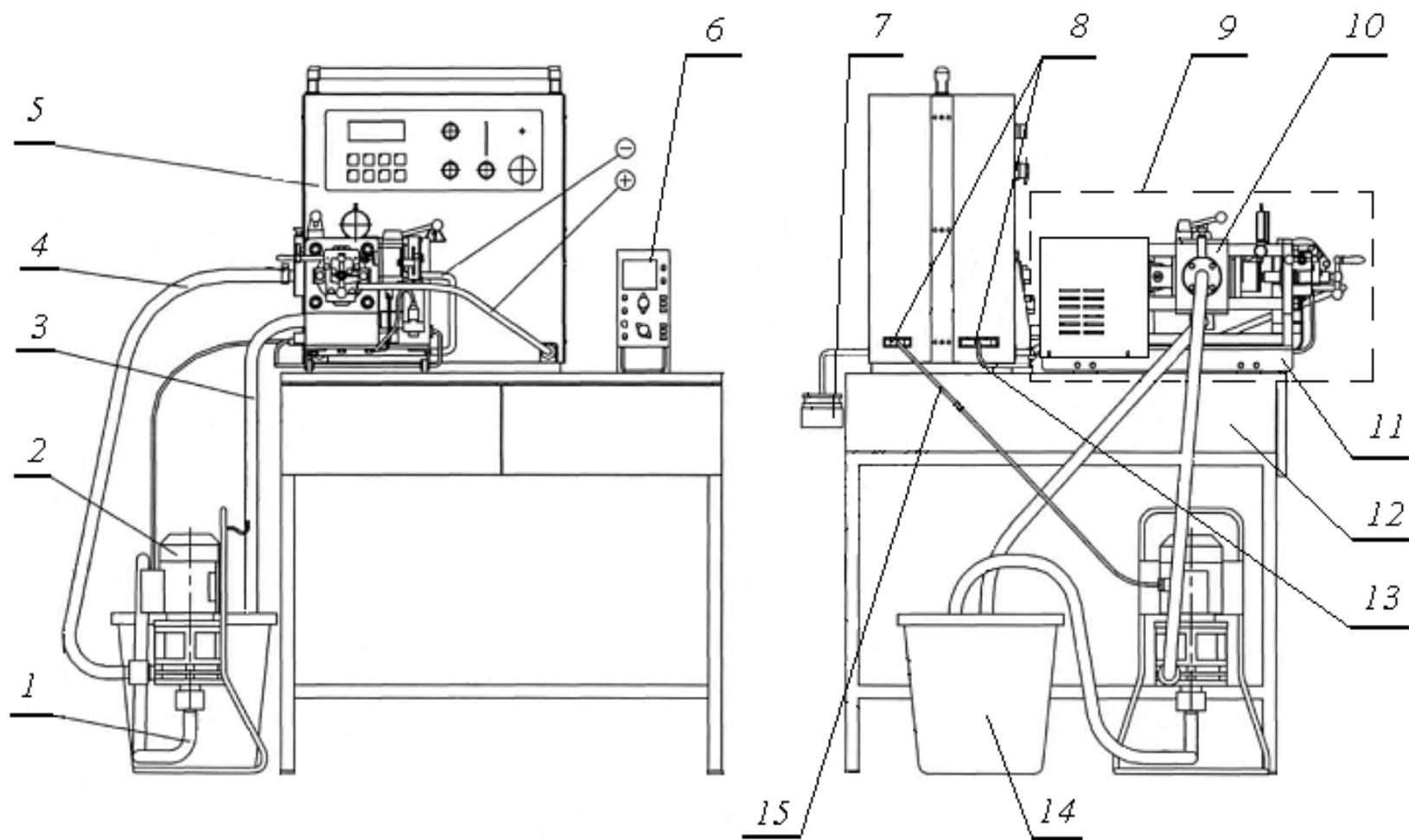


Рис. 4.3. Станок настольный электрохимический СНЭ–20МК

*1* – плита для крепления узлов и устройств рабочего агрегата; *2* – электродвигатель; *3* – зубчатая передача; *4* – ползун кривошипно-шатунного механизма, обеспечивающего колебательные движения электрода-инструмента; *5* – кривошипно-шатунный механизм; *6* – направляющий палец, служащий для устранения вращения электрода-заготовки и обеспечения его поступательного движения строго вдоль общей оси с электродом-инструментом; *7* – индикатор измерения длины перемещения заготовки; *8* – правая съемная стойка; *9* – электропривод автоматического движения подачи  $D_s$  заготовки; *10* – привод подачи электрода-заготовки; *11* – фиксатор винта подачи инструмента-заготовки; *12* – направляющие (всего их 4), обеспечивающие точность расположения и направления перемещения электродного блока относительно ползуна кривошипно-шатунного механизма; *13* – электродный блок, в котором расположены электрод-инструмент и заготовка; *14* – штуцер для подачи электролита в межэлектродный промежуток; *15* – неподвижная левая стойка для закрепления кривошипно-шатунного механизма;  $P_1$  – рукоятка регулировки расхода электролита;  $P_2$  – рукоятка ручного ускоренного перемещения электрода-заготовки;  $P_3$  – рукоятка ручной подачи электрода-заготовки;  $P_4$  – рукоятка коррекции положения стрелки индикатора *7*,  $P_5$  – клапан для соединения рабочей камеры с атмосферой с целью слива электролита после окончания обработки;  $P_6$  – рукоятка закрепления электродного блока *13* на направляющих *12*.

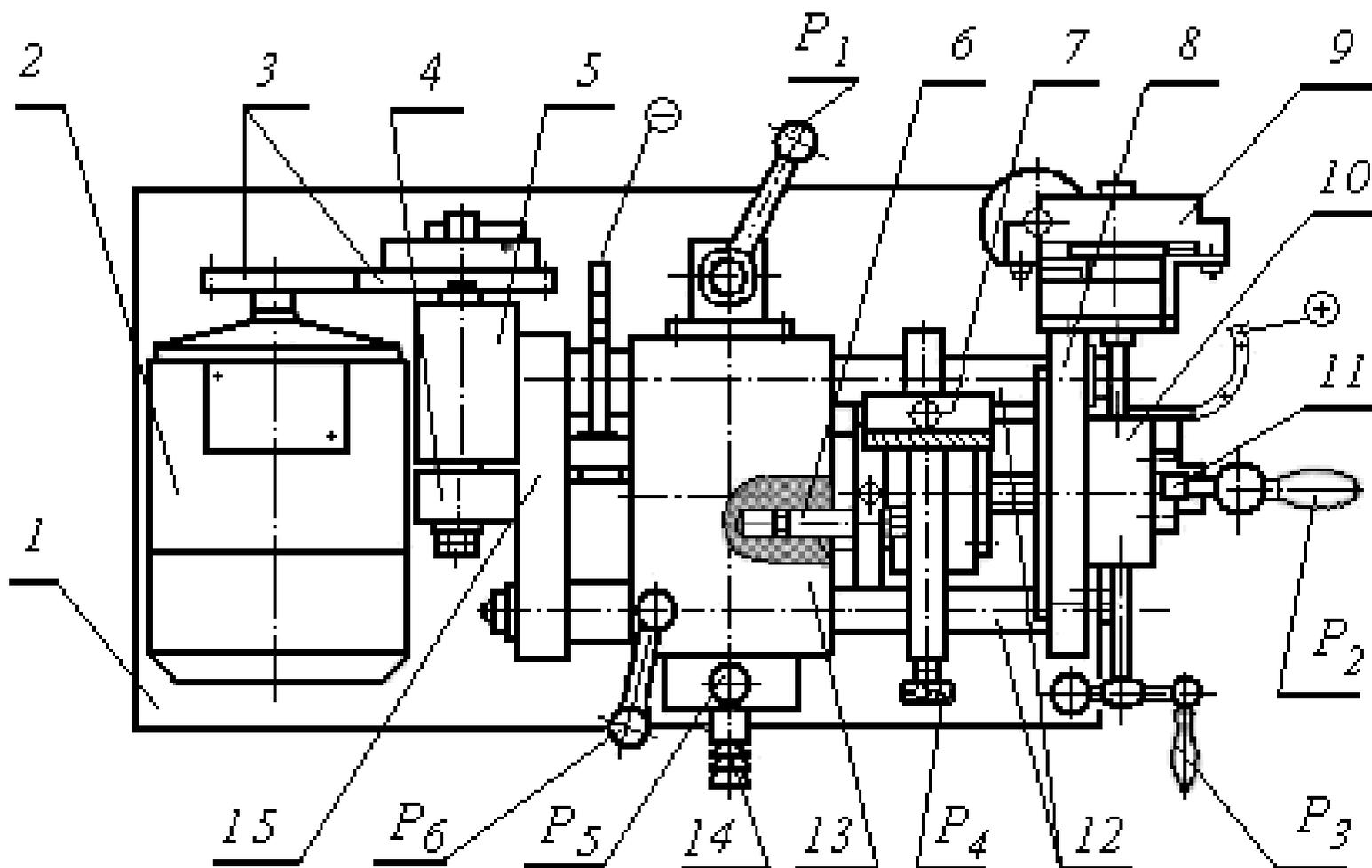


Рис. 4.4. Рабочий агрегат станка ЧЭ–20МК (вид сверху со снятым над электродвигателем 2 кожухом)

Кинематическая схема рабочего агрегата изображена на рис. 4.5.

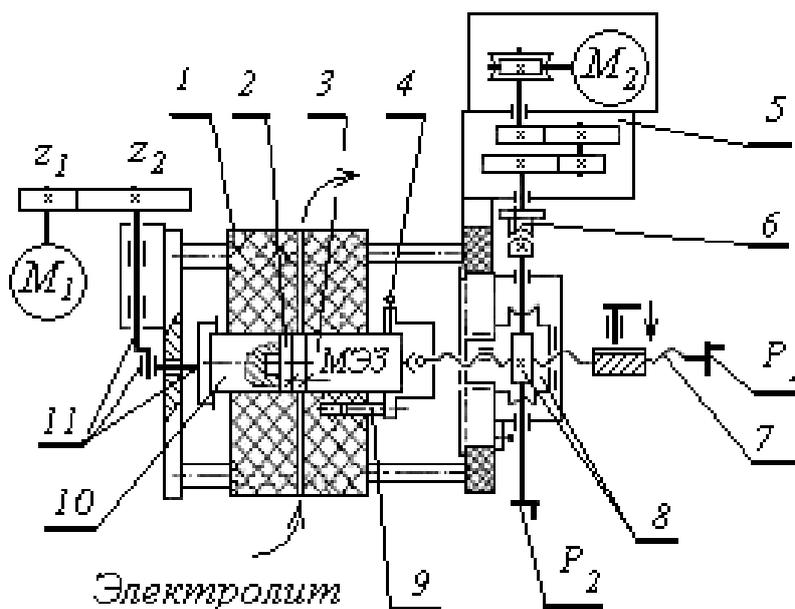


Рис. 4.5. Кинематическая схема рабочего агрегата станка:

1 – электродный блок; 2 – электрод-инструмент; 3 – электрод-заготовка; 4 – болт для закрепления заготовки в механизме подачи; 5 – редуктор кинематической цепи автоматической подачи электрода-инструмента; 6 – муфта сцепления; 7 – винт винтовой передачи цепи подачи электрода-инструмента; 8 – червячная передача цепи подачи электрода-инструмента; 9 – направляющий палец электродного блока; 10 – ползун кривошипно-шатунного механизма; 11 – кривошипно-шатунный механизм;  $M_1$  – электродвигатель кинематической цепи колебательного движения электрода-инструмента;  $M_2$  – электродвигатель постоянного тока цепи автоматической подачи электрода-заготовки;  $P_1$  – рукоятка ускоренных ручных перемещений электрода-заготовки;  $P_2$  – рукоятка ручного рабочего движения подачи электрода-инструмента;  $P_3$  – фиксатор, обеспечивающий прекращение ручного вращения винта подачи инструмента-заготовки 7 рукояткой  $P_1$  при переходе на автоматическую подачу заготовки от электродвигателя  $M_2$  или на ручное рабочее движение электрода-инструмента рукояткой  $P_2$ .

*Насосная станция* (см. рис. 4.3) включает центробежный насос 2, закрепленный на подставке, емкость для электролита, всасывающий, нагнетающий и сливной трубопроводы. На всасывающем трубопроводе 1 находится штуцер с воронкой для заливки в насос электролита и приведения его в рабочее состояние при наладке станка. Давление, развиваемое насосом, не превышает 0,1 Па, наибольшая производительность насоса составляет  $1,6 \cdot 10^3$  мм<sup>3</sup>/мин (16 л/мин).

При подготовке станка к работе всасывающий трубопровод 1 вытаскивают из емкости и приподнимают вверх его заливочный штуцер. Затем штуцер и трубопровод заполняют электролитом таким образом, чтобы уровень электролита в трубопроводе находился выше уровня рабочей части насоса. После этого штуцер со шлангом опускают в емкость с электролитом. При остановке процесса с последующим продолжением работы станка новой заливки насоса не потребуется, если всасывающий трубопровод 1 остается в емкости с электролитом 14. В качестве емкости для электролита можно использовать пластмассовое ведро объемом 15 л, химически стойкое к воздействию электролитов, изготовленных на основе нейтральных солей.

*Источник тока* содержит элементы управления станком, его механическими и электрическими системами. Подключение источника тока к электросети осуществляется вилкой 7 (см. рис. 4.3). Напряжение питания составляет 380 В при частоте тока 50 Гц. Максимально допустимый ток – 16 А, а потребляемая мощность при этом не превышает 2 кВт.

Электропитание электродвигателей рабочего агрегата станка, насосной станции 2, датчика положения электрода-инструмента относительно заготовки и датчика перемещения заготовки осуществляется от источника технологического тока 5 по кабелям 13 и 15 через разъемы 8.

Панель управления агрегатами станка располагается на вертикальной стенке источника технологического тока и содержит органы контроля и управления процессом, изображенные на рис. 4.6.

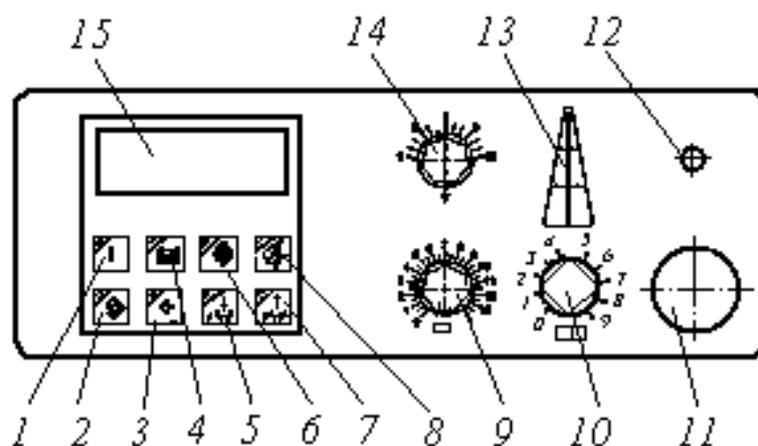


Рис. 4.6. Панель управления станка СНЭ–20МК:

1 – кнопка включения питания; 2 – кнопка перемещения курсора на жидкокристаллическом индикаторе 15; 3 – кнопка редактирования значения глубины обработки; 4 – кнопка включения вибрации катода-инструмента; 5 – кнопка перемещения заготовки вправо (от электрода-инструмента); 6 – кнопка включения источника технологического тока; 7 – кнопка перемещения электрода-заготовки влево (к электроду-инструменту); 8 – кнопка включения насоса; 9 – рукоятка установки значения скорости подачи заготовки; 10 – рукоятка установки величины технологического напряжения; 11 – кнопка «Все стоп»; 12 – индикатор подключения; 13 – индикация относительного значения межэлектродного зазора; 14 – рукоятка регулирования длительности контакта электродов; 15 – жидкокристаллический индикатор устанавливаемых и текущих параметров обработки и команд управления.

Для облегчения контроля оператором процесса обработки заготовки станок оснащен световой и звуковой сигнализацией, по частоте и продолжительности которых можно судить о характере протекания процесса обработки.

Световая сигнализация состоит из линейки светодиодов зеленого и красного цветов. Загорание только зеленых световодов или всей их линейки сигнализирует оператору о наличии контакта электродов. Включение светодиодов красного цвета и их сопровождение звуковым сигналом длительностью не более 0,5 секунд информирует опе-

ратора, что величина скорости подачи близка к скорости анодного растворения заготовки и незначительно ее превышает. Звуковые сигналы в течение одной и более секунд указывают оператору, что величина подачи превышает скорость анодного растворения, а потому необходима корректировка режима обработки.

Универсальный сервисный осциллограф 6 модели С1-94 (см. рис. 4.3) служит для получения информации о протекании электрохимической обработки. Лицевая панель осциллографа представлена на рис. 4.7.

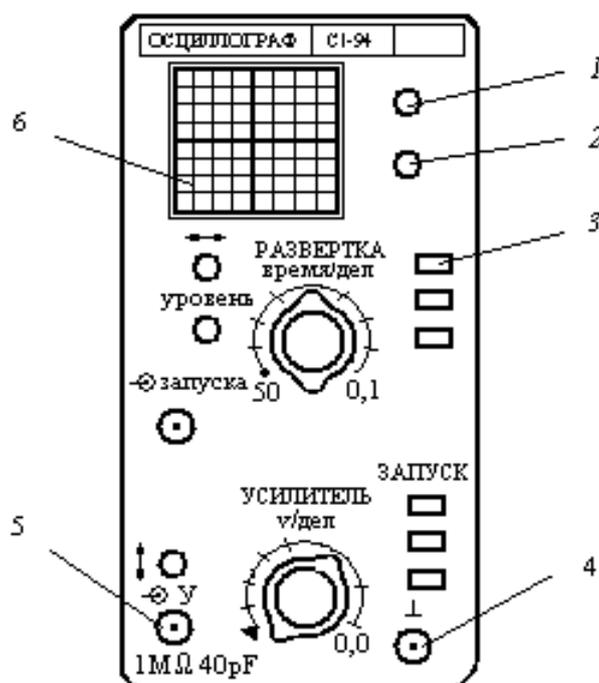


Рис. 4.7. Лицевая панель универсального осциллографа С1-94

Обозначенные на лицевой панели управления кнопки и рукоятки имеют следующее назначение

- 1 – рукоятка регулирования фокусировки луча;
- 2 – рукоятка регулировки яркости изображения;
- 3 – кнопка включения осциллографа;
- 4 – клемма заземления;
- 5 – клемма подключения исследуемых сигналов к каналу вертикального отклонения;
- 6 – экран осциллографа.

Изучение назначения других рукояток и основ наладки работы станка с помощью осциллографа не входит в задачи данной работы. Эти вопросы рассмотрены в Приложении 2, предназначенном учебному мастеру для подготовки оборудования к работе.

Контроль за эффективностью процесса электрохимического формообразования производят изучением осциллограмм напряжения на электродах, высвечиваемых на экране осциллографа, и приведением их к оптимальному виду регулировкой параметров режима и условий обработки. На рис. 4.8 изображены различные типы этих осциллограмм.

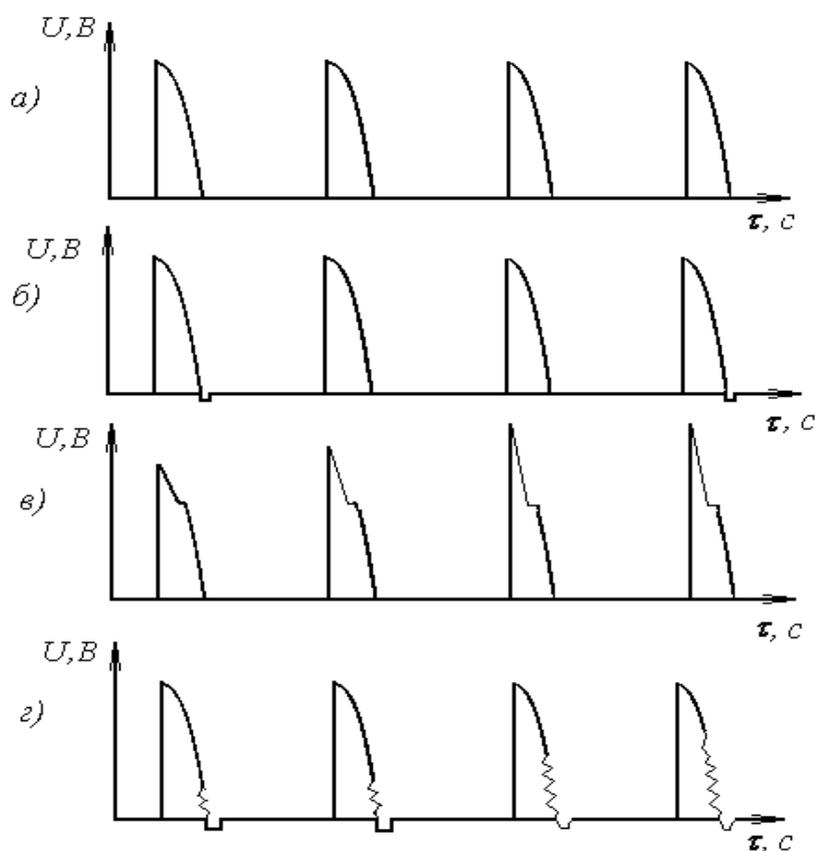


Рис. 4.8. Возможные типы осциллограмм

Осциллограмма протекания процесса электрохимического растворения, вид которой соответствует рис. 4.8, *а*, указывает на то, что обработка идет без контакта электродов. Таким образом, между заготовкой и инструментом всегда в этом случае есть зазор, величина которого неизвестна. Вероятной причиной наличия зазора является не-

достаточная скорость подачи заготовки  $\mathcal{G}_s$ , которая, возможно, стала меньше скорости растворения материала  $\mathcal{G}_p$ .

Осциллограмма, представленная на рис. 4.8, б, соответствует протеканию процесса с периодическим контактом электродов. Для оптимального протекания процесса контакт должен быть редким (лучше одиночным) и сразу исчезать. В случае «зависания» контакта на длительный период времени более трех секунд необходимо корректировать режим обработки путем:

- уменьшения скорости подачи  $\mathcal{G}_s$  электрода-заготовки;
- увеличения напряжения на электродах  $U$ ;
- корректировки температуры  $\theta$  и водородного показателя электролита  $pH$  ( $\theta$  не должна превышать 35–40 °С, а значение  $pH$  не должно быть более 10).

Осциллограмма протекания процесса электрохимического растворения, вид которой соответствует рис. 4.8, в, указывает на то, что напряжение, подаваемое на электроды, недопустимо высоко и возможен электрический пробой межэлектродного промежутка. Необходимо в этом случае увеличить межэлектродный зазор  $\delta$ , уменьшив скорость подачи  $\mathcal{G}_s$ , или уменьшить напряжение  $U$  до появления на экране осциллографа кривых, соответствующих осциллограмме на рис. 4.8, б.

Осциллограмма, представленная рис. 4.8, г, соответствует аварийному состоянию процесса. Происходит контакт электродов с коротким замыканием электрической цепи. Процесс необходимо прекратить до устранения причин, среди которых часто встречающимися являются:

- значительное превышение скорости подачи электрода-заготовки  $\mathcal{G}_s$  по отношению к скорости ее анодного растворения  $\mathcal{G}_p$ ;
- защелачивание и высокая температура электролита, при которых процесс анодного растворения прекращается;
- нарушение синхронизации механических колебаний катода-инструмента с импульсами технологического тока;

– снижение напряжения на электродах ниже потенциала анодного растворения в связи с пассивацией поверхности заготовки.

### **Режим электрохимической обработки**

Режимом обработки называют совокупность числовых значений параметров процесса электрохимической обработки, которые могут регулироваться в принятой для обработки заготовки технологической системе. Элементами технологической системы при данном технологическом методе обработки являются станок, приспособление для закрепления заготовки, инструмент, заготовка и электролит.

Изменяемые параметры, составляющие режим обработки и определяющие технико-экономические показатели для электрохимического формообразования, подразделяют на 4 группы:

- электрические параметры;
- химические параметры;
- механические параметры;
- гидравлические параметры.

К электрическим параметрам режима электрохимической обработки относят: силу тока  $I$ , напряжение на электродах  $U$ , форму, частоту и период действия импульсов; плотность тока  $\rho_i$  и электрическое сопротивление зазора.

Химическими параметрами режима обработки являются: состав электролита, концентрация растворенных веществ, температура электролита, водородный показатель  $pH$ , электропроводимость электролита  $\gamma_{эл}$ .

К механическим параметрам обработки относят: скорость подачи электрода-заготовки  $\mathcal{V}_s$ , межэлектродный зазор  $\delta$ , частоту  $f$  и амплитуду  $A$  колебаний электрода-инструмента. Частота и амплитуда колебаний на станке приняты постоянными и изменению не подлежат.

Гидравлические параметры режима обработки связаны с прокачкой электролита через рабочую камеру и включают рабочее дав-

ление жидкости, расход электролита, скорость прокачки. Эти параметры должны выбираться так, чтобы они обеспечивали полную смену отработанного электролита за ту часть цикла, при которой не происходит анодное растворение, отсутствие застойных зон и сплошность потока при прокачке.

Расход электролита на станке СНЭ–20МК регулируют рукояткой  $P_1$  (см. рис. 4.4), управляющей степенью перекрытия выходного канала из рабочей камеры дроссельной заслонкой. Количественно этот параметр, также как скорость прокачки и давление жидкости не оценивается.

Всего насчитывают порядка 14 переменных показателей режима электрохимической размерной обработки, оптимизировать которые, увязав их в стройную теорию, на современном этапе знаний о процессе электрохимической обработки невозможно. Для работы технологов выработан ряд практических рекомендаций, полученных экспериментальным путем часто применительно к конкретному оборудованию и схеме обработки, и ряд теоретических зависимостей, устанавливающих связь между параметрами режима обработки и технико-экономическими показателями процесса.

На выбор режима обработки влияют:

- цели обработки: выходные параметры обработки, которыми чаще всего принимают производительность процесса, точность обработки, параметры шероховатости обработанной поверхности;
- химический состав и физические характеристики обрабатываемого материала (химический и электрохимический эквиваленты материалов, плотность материала);
- вид и схема обработки;
- схема прокачки электролита через рабочую камеру.

#### ***Особенности выбора электролита и его характеристик.***

В размерной электрохимической обработке наибольшее распространение находят водные растворы неорганических солей активных металлов, обладающих хорошей растворимостью в воде. Данные растворы характеризуются малой вязкостью и безопасностью в работе.

Некоторые из электролитов и их основные характеристики приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Физические характеристики электролитов

Состав электролита		Плотность $\rho_{эл}$ , г/см <sup>3</sup>	Удельная электрическая проводимость, $\gamma_{эл}$ , Ом <sup>-1</sup> ·м <sup>-1</sup>
Растворяемое вещество	Концентрация, г/л		
NaCl	50	1,0345	672
	100	1,0707	1211
	150	1,1087	1642
	200	1,1477	1957
NaNO <sub>3</sub>	100	1,0674	782
	200	1,1426	1303
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	50	1,035	2085
	150	1,1406	886

Повышение концентрации электролита способствует увеличению производительности электрохимической обработки. Однако электролиты, созданные на основе солей при определенной концентрации, становятся насыщенными. Дополнительное (сверх предела насыщения) введение в электролиты компонентов вызывает возникновение в них солей, находящихся в кристаллическом состоянии. Наличие твердых частиц в электролите приводит к нестабильности процесса электрохимической размерной обработки и к преждевременному износу оборудования. Значения концентрации солей в некоторых насыщенных электролитах приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Концентрации насыщенных электролитов при  $\theta = 20$  °С

Электролит	Концентрация насыщения
------------	------------------------

	г/л	%
NaCl	359	26,4
KCl	344	25
NaNO <sub>3</sub>	876	47
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	192	16

В процессе эксплуатации электролита за счет выноса его вместе со шламом или из-за испарения воды возможно изменение его исходной концентрации, а, соответственно, и изменение плотности электролита. Плотность рабочего раствора определяют ареометром. Зная исходную  $\rho_{1эл}$  и рабочую  $\rho_{2эл}$  плотности электролита, можно рассчитать количество соли, которое нужно добавить в электролит для доведения его до рабочего значения концентрации по формуле

$$m = (\rho_{2эл} - \rho_{1эл}) \cdot V, \quad (4.1)$$

где  $m$  – масса соли, г;  $V$  – объем электролита, см<sup>3</sup>.

Зависимость значения концентрации раствора соли NaNO<sub>3</sub> от плотности электролита при 20°C приведена в табл. 4.3.

Таблица 4.3

#### Плотность электролита NaNO<sub>3</sub>

Плотность, $\rho_{эл}$ , г/см <sup>3</sup>	1,032	1,067	1,082	1,097	1,112	1,127	1,143	1,175	1,208
Концентрация, %	5	10	12	14	16	18	20	24	28

Выбор электролита, его концентрации и других характеристик определяется маркой материала обрабатываемой заготовки. В табл. 4.4 приведены соли металлов, используемые в электролитах при обработке основных типов конструкционных материалов.

Таблица 4.4

#### Соли металлов, используемые для создания электролитов

Обрабатываемый материал	Растворенное вещество
Углеродистые и легированные стали	NaCl, NaNO <sub>3</sub> , KNO <sub>3</sub> , NaClO <sub>3</sub>

Обрабатываемый материал	Растворенное вещество
Коррозионностойкие, жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы	NaCl, KCl, NaNO <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Твердые сплавы	NaCl, NaOH, NaNO <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , NaF
Титановые сплавы	NaCl, KBr, NaNO <sub>3</sub> , NaF
Алюминиевые и магниевые сплавы	NaCl, NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> , NaNO <sub>3</sub>
Ниобиевые сплавы	KBr, NaBr, KOH
Все материалы при прошивке глубоких отверстий малых диаметров	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , HNO <sub>3</sub> , HCl

Водородный показатель электролита  $pH$  является важнейшей его характеристикой, указывающей на концентрацию ионов водорода  $H^+$  в растворе. Численно водородный показатель равен отрицательному десятичному логарифму концентрации ионов водорода, выраженной в молях на литр:  $pH = -lg[H^+]$ .

Значение  $pH = 7$  соответствует нейтральному состоянию электролита, при котором число ионов водорода и гидроксильной группы в растворе одинаково и составляет по  $10^{-7}$  моль/л. При  $pH < 7$  количество ионов водорода превышает число ионов гидроксильной группы. Такой раствор называют кислым. Чрезмерная кислотность электролита приводит к восстановлению ионов водорода на катоде, что особенно нежелательно при получении гальванических покрытий на заготовках.

Значения  $pH > 7$  указывают на увеличенные количества ионов гидроксильной группы в электролите. Эти электролиты относят к щелочной группе. В щелочных электролитах при обработке возможно образование солей, находящихся в кристаллическом состоянии. Это приводит к зашламлению электролита, снижению его электропроводности, пассивации анода и снижению производительности обработки. Для устойчивого растворения сталей водородный показатель  $pH$  не должен превышать 10–11 единиц.

В ходе электролиза в межэлектродном промежутке выделяются газообразные и твердые продукты обработки. В результате этого  $pH$  электролита от нейтрального значения сдвигается в щелочную область, а электролит насыщается частицами шлама. Так как частицы шлама не электропроводны, то при достижении определенной их концентрации снижается производительность обработки.

Стабильность  $pH$  раствора можно поддерживать подкислением или буферированием электролита. Подкисление электролита производится периодически оператором станка или непрерывно дозирующими устройствами. Среди буферных добавок для стабилизации  $pH$  раствора наибольшее распространение получила борная кислота. Добавка этой кислоты в электролит в количестве 3 г/л обеспечивает стабилизацию  $pH$  в течение длительного времени работы раствора на исходном уровне, причем качество обработки и скорость растворения не изменяются.

***Электрические параметры обработки и основы их выбора.*** Электрохимическая размерная обработка характеризуется многообразием и определенной последовательностью (стадиями) физико-химических процессов, проходящих на электродах и в электролите. Скорости протекания этих процессов разные и зависят от совокупности условий и режима обработки.

Результирующая скорость анодного растворения заготовки определяется интенсивностью процесса на той стадии электролиза, скорость протекания которой наименьшая. В зависимости от условий обработки и, в первую очередь, от напряжения на электродах  $U$  соотношения между скоростями прохождения процессов на отдельных стадиях электролиза меняются. Существенное значение в этом играют процессы образования и растворения на аноде оксидной пленки. В связи с этим зависимость между напряжением на электродах  $U$  и силой тока  $I$  в электролите описывается законом Ома только на отдельных промежутках значений напряжения, подаваемого на электроды.

Для получения полной картины протекающих в системе процессов и для выбора основного регулируемого параметра электрохимической обработки – напряжения на электродах, принято строить *анодные поляризационные кривые*, характеризующие зависимость силы тока  $I$  или плотности тока  $\rho_i$  в электролите от напряжения  $U$  или потенциала анода  $E_a$  для принятого электролита и других условий обработки.

На рис. 4.9 представлено два вида типичных анодных *поляризационных кривых*, характеризующих зависимости между плотностью тока ( $\rho_i$ ) и потенциалом анода ( $E_a$ ) в проточном (поз. 2) и непроточном (поз. 1) электролитах при постоянной площади обрабатываемой поверхности.

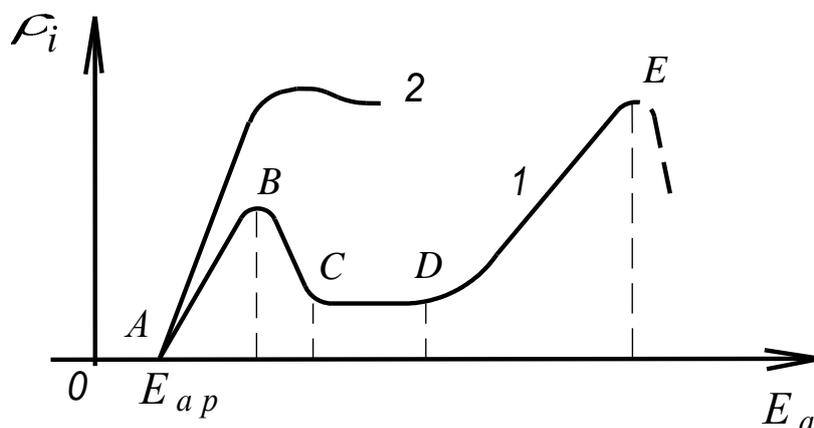


Рис. 4.9. Анодные поляризационные кривые

Из представленных кривых следует, что растворение анода при постепенном увеличении потенциала  $E_a$  начинается только в точке  $A$ , соответствующей значению равновесного анодного потенциала  $E_{ap}$  материала анода. При потенциалах анода близких к равновесному (участок  $AB$ , кривая 1), наблюдается режим активного анодного растворения. Однако сила тока здесь незначительна, а потому высокой скорости растворения заготовки на этом участке достичь не удастся. В связи с этим в электрохимической размерной обработке область  $AB$  практически не используется.

Дальнейшее увеличение потенциала анода (участок  $BC$ ) приводит к образованию на его поверхности оксидов растворяемого метал-

ла и появлению оксидной пленки. Оксидная пленка, обладающая большим сопротивлением прохождению тока, снижает ток в цепи и скорость растворения основного материала заготовки. Такое явление торможения скорости анодного растворения называют пассивацией. Полная пассивация при максимальной толщине оксидной пленки наступает на участке  $CD$ .

Если потенциал пассивной электрода-заготовки увеличивать дальше, то при некотором значении потенциала возможен этап растворения оксидов и разрушения оксидной пленки. Снова резко возрастает анодный ток, т. е. поверхность металла становится активной (участок  $DE$ ). Этот участок называют перепассивной областью. На этом участке можно получить большую силу тока, а значит и большую скорость растворения заготовки. Этот участок, как правило, и используют для ЭХРО.

Превышение потенциала анода выше значений, соответствующего точке  $E$ , может привести к новой пассивации поверхности или к пробоем межэлектродного промежутка и прекращению процесса анодного растворения.

Значительное влияние на анодные пассивационные явления оказывает скорость прокачки электролита вдоль поверхности обрабатываемой заготовки (анода). С ростом этой скорости увеличивается скорость отвода ионов, и пассивация наступает лишь при больших плотностях тока (рис. 4.9, кривая 2). Скорость прокачки устанавливают в пределах 5–50 м/с.

Анодные поляризационные кривые строят экспериментальным методом применительно к конкретному материалу и условиям обработки. По ним находят оптимальные значения напряжения на электродах, которые обеспечивают высокую производительность ЭХРО и съем металла. Для обработки в проточном электролите заготовок из сталей, алюминиевых и медных сплавов принимают напряжения  $U = 9–18$  В, а при обработке титановых сплавов — 18–24 В.

*Плотность тока  $\rho_i$*  является одной из основных технологических характеристик, используемых при проектировании технологиче-

ского процесса электрохимической обработки и технологической оснастки. При принятом напряжении на электродах, выбранном электролите и его концентрации, заданном значении межэлектродного зазора в условиях действия закона Ома мгновенная плотность тока определяется по формуле

$$\rho_i = U \cdot \gamma_{эл} / S, \quad (4.2)$$

где  $S$  – площадь обрабатываемого участка заготовки. В среднем значения плотности тока принимают при обработке заготовок из сталей, алюминиевых и медных сплавов в пределах  $(2-20) \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$ , для титановых сплавов —  $(5-10) \cdot 10^3 \text{ А/м}^2$ .

Соответственно, исходная сила тока  $I$  при электрохимической обработке при постоянном значении межэлектродного зазора  $\delta$  определяется по формуле

$$I = (U_{ин} - U_r) \cdot S \cdot \gamma_{эл} / \delta, \quad (4.3)$$

где  $U_{ин}$  – напряжение источника питания;  $U_r$  – падение напряжения на всех участках в электрической цепи, которое в расчетах можно принять ориентировочно равным 3 В. Значение  $U_r$  определяется в основном потенциалом поляризации электродов, внутренним сопротивлением источника питания и падением напряжения в электролите.

В связи с тем, что значение межэлектродного зазора на станке СНЭ–20МК не постоянно и изменяется при отлаженном режиме в пределах от 0,1 до 0 мм, на экране источника технологического тока показывается при обработке среднее значение силы тока. Максимально допустимые его значения не должны превышать 100 А.

**Механические параметры обработки** являются производными от принятых других групп режимов обработки, в частности, от значений электрических и химических параметров, характеристик прокачки электролита и значений скоростей вспомогательных движений электрода-инструмента.

В перечне механических параметров выделяют нерегулируемые параметры, являющиеся постоянными и определяемыми кинематикой конкретного оборудования, и регулируемые параметры, значения которых устанавливает оператор. На станке СНЭ–20МК к нерегулируе-

мым механическим параметрам относят характеристики колебательных движений электрода-инструмента:  $f$  и  $A$ .

Регулированию на станке СНЭ–20МК подлежит лишь скорость подачи электрода-заготовки  $\mathcal{G}_s$ . Установку скорости подачи оператор осуществляет ступенчато поворотом рукоятки 9 (см. рис. 4.6). Примерные значения скорости подачи заготовки  $\mathcal{G}_s$  при установке рукоятки 9 в позиции, указанные на панели управления, даны в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Позиции указателя рукоятки и примерная скорость подачи заготовки  $\mathcal{G}_s$

Позиция рукоятки 9	Скорость подачи, $\mathcal{G}_s$ , мм/мин.	Позиция рукоятки 9	Скорость подачи, $\mathcal{G}_s$ , мм/мин.
1	0,01	8	0,13
2	0,02	9	0,15
3	0,04	10	0,18
4	0,05	11	0,2
5	0,07	12	0,21
6	0,09	13	0,22
7	0,11	14	0,23

В основу установки скорости подачи на станке положено требование равенства скорости анодного растворения заготовки  $\mathcal{G}_p$  и скорости ее подачи  $\mathcal{G}_s$  или незначительного превышения скорости подачи над скоростью анодного растворения:  $\mathcal{G}_p \leq \mathcal{G}_s$ . Значение скорости анодного растворения, соответствующее этому требованию, оператор устанавливает при наладке станка, изменяя величину технологического напряжения рукояткой 10 (см. рис. 4.6), расположенной на пульте управления источника технологического тока. Изменяя положение рукоятки 10, оператор приводит вид осциллограммы на экране 15 в соответствие с видом осциллограммы, характерной для нормального протекания процесса (рис. 4.8, б). При этом численные значения скорости растворения  $\mathcal{G}_p$  для конкретных позиций рукоятки 10 оператор

не контролирует, поскольку они зависят кроме напряжения на электродах и от многих других характеристик процесса.

В электрохимической размерной обработке к группе механических параметров относят также *межэлектродные торцовый  $\delta_m$  и радиальный  $\delta_b$  зазоры*. В технологических и точностных расчетах при формообразовании профилей поверхностей с небольшой глубиной учитывают только наличие торцового зазора, который при правильной организации процесса формообразования (см. рис. 4.8, б) изменяется по синусоидальному закону с амплитудой 0,34 мм и от регулируемых параметров режима обработки не зависит.

При формообразовании полостей в заготовках с наличием поверхностей параллельных направлению движению подачи для определения точности выполняемых размеров существенное значение приобретает величина бокового зазора  $\delta_b$  (рис. 4.10).

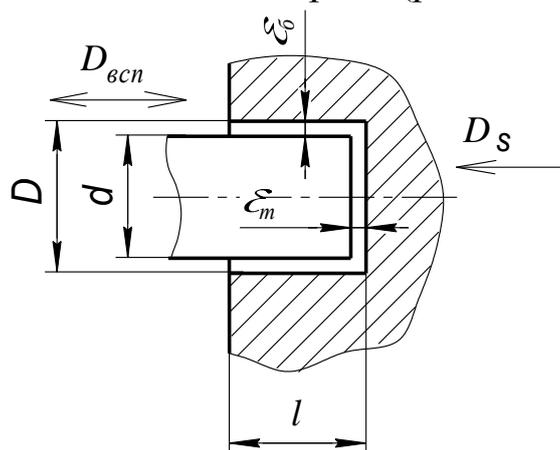


Рис. 4.10. Схема формообразования отверстия и виды межэлектродных зазоров

Значение бокового зазора и его зависимость от режима обработки в паспортных данных станка не приведены. В то же время известно, что величина  $\delta_b$  и его отклонение от номинального значения определяются напряжением на электродах  $U$ , интенсивностью анодного растворения  $\mathcal{G}_p$  и растут с ростом значений данных параметров обработки. В связи с этим рекомендуется при точной обработке значение технологического напряжения принимать на нижнем уровне, обеспечивающем стабильное протекание процесса. При необходимости дос-

тижения максимальной производительности обработки на электроды следует подавать максимально возможные значения напряжения, определяемые анодной поляризационной кривой.

Экспериментально определенные значения боковых зазоров при обработке сталей в зависимости от принимаемого технологического напряжения приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Значения бокового межэлектродного зазора  $\delta_b$

Технологическое напряжение, $U$ , В	Межэлектродный боковой зазор, $\delta_b$ , мм
10	0,05
14	0,10
18	0,13

При обработке полостей в заготовках при наладке станка оператор должен установить длину обработки  $\ell$  (рис. 4.10). На станке СНЭ–20МК установку значения  $\ell$  осуществляют в режиме редактирования при включенной кнопке 2 с последующим неоднократным нажатием на кнопку 3 пульта управления источника технологического тока (см. рис. 4.6) до появления на жидкокристаллическом индикаторе 15 требуемого значения. В процессе обработки на этом же индикаторе высвечивается текущее значение длины обработки и при достижении им установленного значения процесс автоматически прекращается. Подробно методика установки и контроля длины обработки будет рассмотрена в разделе «Последовательность наладки станка».

При обработке партии заготовок в ряде случаев возникает необходимость подналадки станка путем изменения условий обработки, а, соответственно, и установленных параметров режима электрохимического формообразования. Источником указаний для выполнения таких процедур являются появляющиеся на жидкокристаллическом дисплее 15 осциллограммы. В зависимости от выявленного по осциллограммам отклонения от установленного режима обработки механи-

ческие параметры режима с помощью указанных ранее кнопок управления должны быть откорректированы.

### **Штучно-калькуляционное время электрохимической обработки заготовки и методика его определения на станке СНЭ–20МК**

Трудоемкость технологической операции, выполняемой на металлообрабатывающем станке любой группы и типа, оценивают штучно-калькуляционным временем  $\tau_{шк}$  по формуле

$$\tau_{шк} = \tau_0 + \tau_{всп} + \tau_{обс} + \tau_{отд} + \tau_{нз}/N, \quad (4.4)$$

где  $\tau_0$  – основное время, затрачиваемое непосредственно на обработку;  $\tau_{всп}$  – вспомогательное время, включающее время на установку и снятие заготовки ( $\tau_1$ ), время на установку заготовки в исходную по отношению к катоду-инструменту позицию, с которой начинается обработка ( $\tau_2$ ), время на включение и выключение электрооборудования и гидросистемы ( $\tau_3$ ), время на стабилизацию прокачки электролита при включении и на слив электролита по завершению обработки ( $\tau_4$ );  $\tau_{обс}$  – время на обслуживание станка;  $\tau_{отд}$  – время отдыха рабочего;  $\tau_{нз}$  – подготовительно-заключительное время, затрачиваемое на наладку станка для изготовления партии деталей, уборку станка, протирку заготовок, их контроль и на ряд других процедур;  $N$  – количество заготовок в партии, обрабатываемых без переналадки станка.

Рассмотрим далее особенности определения составляющих штучно-калькуляционного времени при обработке партии заготовок на станке СНЭ–20МК.

*Основное время обработки  $\tau_0$ .* При механических методах обработки заготовок  $\tau_0$  при одном рабочем ходе инструмента определяют по формуле

$$\tau_0 = \ell / \mathcal{G}_S, \quad (4.5)$$

где  $\ell$  – длина пути инструмента, мм;  $\mathcal{G}_S$  – скорость подачи инструмента, мм/мин.

Для электрохимических методов обработки в общем случае использование данной формулы путем подстановки в нее значения  $\mathcal{G}_S$ , указанного в табл. 4.5, затруднено. Это связано с тем, что позиция рукоятки 9 источника технологического тока (см. рис. 4.6), а, следовательно, скорость подачи электрода-заготовки устанавливается оператором уже в процессе обработки путем подбора скорости подачи  $\mathcal{G}_S$  равной скорости электрохимического растворения материала заготовки  $\mathcal{G}_p$ . Заранее, до начала работы определить скорость растворения  $\mathcal{G}_p$  можно лишь приблизительно, так как эта характеристика режима определяется не только положением рукоятки 10, устанавливающей напряжение на электродах, но и зависит от значений других параметров процесса. К таким не учитываемым параметрам относят, в частности, характеристики электролита (текущее значение выхода по току  $pH$ , загрязненность, изменения в концентрации растворенной соли), изменение площади обработки и различия глубины профиля  $\ell$  для разных участков рабочей поверхности заготовки при формообразовании сложных поверхностей.

Полученное по формуле 4.5 значение основного времени при проектировании технологической операции электрохимической обработки заготовки на станке СНЭ–20МК уточняют при изготовлении пробной детали. По завершении обработки оно высвечивается на индикаторе 15 источника технологического тока (рис. 4.6).

*Время на установку и снятие заготовки  $\tau_1$*  в общей структуре временных затрат, входящих во вспомогательное время, является на станке СНЭ–29МК одним из наибольших. Это связано с особенностями конструкции рабочего агрегата станка и устройствами для закрепления в нем заготовки. Заготовка при обработке находится внутри электродного блока (см. рис. 4.5), а потому ее установка для обработки и снятие после обработки требуют разборки рабочего агрегата. Определение этой составляющей штучно-калькуляционного времени возможно только экспериментальным путем.

*Время на установку заготовки в исходную по отношению к катоду-инструменту позицию  $\tau_2$ .* Особенностью работы станка СНЭ–20МК является то, что для начала обработки очередной заготовки между электродом-заготовкой и электродом-инструментом необходимо установить осевой зазор, превышающий значение амплитуды рабочего колебания электрода-инструмента  $A = 0,34$  мм. Для этого электрод-заготовку после закрепления ее в рабочем агрегате вручную подводят до контакта с электродом-инструментом, а затем отводят от него на расстояние большее  $0,34$  мм (до  $1$  мм). Процесс установки электрода-заготовки контролируется изучением осциллограмм на экране осциллографа С1–94 (см. рис. 4.7). Эти действия осуществляют индивидуально для каждой заготовки в партии, что по своему содержанию соответствует процедуре размерной наладки станка при обработке резанием в условиях единичного и мелкосерийного типов производств. По этой причине время, затрачиваемое на установку электрода-заготовки в исходную позицию ( $\tau_2$ ), является вспомогательным. Определяется оно экспериментальным путем.

Суммарное вспомогательное время определяют по формуле

$$\tau_{всп} = \sum_{j=1}^4 \tau_j, \quad (4.6)$$

где  $j$  – номер элемента затрат вспомогательного времени.

*Время на обслуживание станка  $\tau_{обс}$*  — время, затрачиваемое на подналадку станка, связанную с необходимостью периодической корректировки глубины резания, возможным отключением тока при перегрузке и с другими проблемными ситуациями при работе станка, на уборку станка от следов электролита при переходе от обработки одной заготовки к другой. Эта составляющая в условиях серийного производства невелика и ее можно не учитывать, считая  $\tau_{обс}$  элементом подготовительно-заключительного времени.

*Время регламентированного отдыха  $\tau_{отд}$*  зависит от условий работы, для механических цехов, где чаще всего и устанавливают элект-

трохимические станки его значение может быть принято равным 20 % от оперативного времени

$$\tau_{omd} = 0,2 (\tau_o + \tau_{всн}). \quad (4.7)$$

*Подготовительно-заключительное время*  $\tau_{nz}$  связано преимущественно с подготовкой станка к выполнению технологической операции. Такую подготовку оборудования называют *наладкой*. Более точно, наладкой называется процесс подготовки технологического оборудования и технологической оснастки к выполнению определенной технологической операции (к изготовлению партии деталей на данном станке).

Наладка настольного электрохимического станка СНЭ–20МК включает:

- подготовку электролита и заполнение электролитом гидросистемы станка (время  $\tau_5$ ),
- проверку состава электролита при использовании отработанного на предыдущей партии электролита путем определения водородного показателя  $pH$ , а, при необходимости, коррекции состава введением в него буферных добавок (время  $\tau_6$ );
- установку электрода-инструмента, заготовки и электродного блока в рабочее положение для изготовления первой детали (время  $\tau_7$ );
- наладку электросистемы (осциллографа и устройства технологического тока) (время  $\tau_8$ );
- наладку режима обработки на пульте управления при изготовлении первой детали (время  $\tau_9$ );
- протирку станка от следов электролита после изготовления партии деталей и смазку рабочих поверхностей рабочего агрегата тонким слоем масла (время  $\tau_{10}$ ).

В условиях серийного, мелкосерийного производства и при применении специализированных станков подготовительно–заключительное время рассчитывают по формуле

$$\tau_{nz} = \tau_5 \text{ (или } \tau_6) + \tau_7 + \tau_8 + \tau_9 + \tau_{10}. \quad (4.8)$$

Составляющие непроизводительных затрат времени  $\tau_{всп}$  и  $\tau_{пз}$  определяют хронометрированием. Их средние значения для отдельных видов работ и типов станков можно найти и в справочной литературе, например, в работе [4].

Расчет и хронометрирование составляющих штучно-калькуляционного времени позволяют вычислить его полное значение по формуле (4.4) и долю непроизводительных затрат времени  $K_{нз}$ , % по формуле

$$K_{нз} = \frac{\tau_{шк} - \tau_o}{\tau_{шк}} \cdot 100. \quad (4.9)$$

Для конкретизации затрат времени по каждой из составляющих штучно-калькуляционного времени и уяснения процедуры хронометрирования далее рассмотрена последовательность действий оператора станка при наладке и выполнении электрохимической операции.

### **Последовательность наладки и выполнения электрохимической операции на станке СНЭ–20МК**

Наладка станка СНЭ–20МК к изготовлению партии деталей включает подготовку всех систем станка к работе и изготовление пробной детали. Для этого следует выполнить далее указанные действия в их представленной последовательности.

1. Развести в емкости 14 (рис. 4.3) электролит требуемого состава и концентрации.
2. Залить электролит в штуцер всасывающего трубопровода 1 до его заполнения.
3. Погрузить в электролит всасывающий 1 и сливной 3 гибкие трубопроводы.
4. Снять привод подачи 10 вместе с устройством для закрепления электрода-заготовки (см. рис. 4.4) со стенки 8 и переместить диэлектрический корпус 13, раскрепив рукоятку  $P_6$ , по цилиндрическим направляющим 12 в сторону стенки 8.

5. Вывести ползун 10 (см. рис. 4.5) кривошипно-шатунного механизма из центрального отверстия диэлектрического корпуса 1, присоединить к нему, используя резьбовое соединение, электрод-инструмент 2.

6. Ввести ползун 10 вместе с электродом-инструментом 2 в центральное отверстие диэлектрического корпуса 1. Переместить диэлектрический корпус 1 по цилиндрическим направляющим до упора в сторону кривошипно-шатунного механизма и закрепить его от смещения рукояткой P<sub>6</sub> (см. рис. 4.4).

6. Ввести в разрезную втулку привода подачи пробную электрод-заготовку 3 (см. рис. 4.5) и закрепить ее болтом 4.

7. Вставить разрезную втулку в механизм привода подачи и закрепить ее.

8. Ввести пробную электрод-заготовку 3, закрепленную в приводе подачи (см. рис. 4.5) в центральное отверстие диэлектрического корпуса 1 и зафиксировать ее от возможного разворота направляющим пальцем 9.

9. Закрепить привод подачи 10 (см. рис. 4.4) на стенке 8 прихватками.

10. Подключить осциллограф 6 (см. рис. 4.3) к сети (гнездо 3 рис. П2.3) и к клеммам 8 источника технологического тока 5, нажать кнопку 3 осциллографа (см. рис. 4.7).

11. Произвести остальную настройку осциллографа С1–94 согласно техническому описанию (Приложение 2).

12. Подключить источник технологического тока 5 вилкой 7 к внешней сети (см. рис. 4.3), нажать на кнопку включения питания 1 (см. рис. 4.6).

На жидкокристаллическом индикаторе параметров обработки 15 отобразится следующая команда:

<<СНЭ–20МК>> Установите режим
----------------------------------

13. Включить с панели управления (см. рис. 4.6) кнопкой 6 питание управления.

На индикаторе параметров обработки 15 появится сообщение

0,000 mm	Стоп
2,0 V	0A 00:00

означающее, что длина обработки равна 0,0000 мм, т. е. не установлена, напряжение на электроды подано 2 В, ток отсутствует. Следовательно, процесс электрохимического растворения еще не идет.

Дальнейшие действия оператора выполняются как на первой, так и на всех последующих заготовках.

14. Переместить вращением рукоятки  $P_2$  по часовой стрелке (рис. 4.4) электрод-заготовку до соприкосновения с электродом-инструментом.

15. Развести электроды на величину, превышающую амплитуду колебаний (0,34 мм), например, на 1,0 мм, контролируя перемещение по индикатору 7 (см. рис. 4.4).

16. Ввести фиксатор  $P_3$  (рис. 4.5) в паз ходового винта 7, устраняя его дальнейшее вращение и оставляя возможность для поступательного перемещения.

17. Войти в меню редактирования кнопкой 2 (см. рис. 4.6) и установить длину обработки (например, 1,5 мм) кнопкой 3.

На индикаторе 15 появятся следующие данные:

1,500 mm	Стоп
Задайте глубину	

18. Выйти из меню, переместив курсор вправо кнопкой 2.

На индикаторе 15 появляется сообщение:

1,500 mm	Стоп
2,0 V	0A 00:00

19. Включить с панели управления источника технологического тока кнопкой 8 насос, осуществляя прокачку электролита по замкну-

той схеме: всасывающий и нагнетающий трубопроводы, рабочая камера электродного блока, межэлектродный промежуток и сливной трубопровод.

20. Включить кнопкой 4 (см. рис. 4.6) электродвигатель  $M_1$  (см. рис. 4.5), вращение выходного вала которого через шестерни  $z_1$  и  $z_2$  приводит во вращение вал кривошипно-шатунного механизма 11, сообщающего возвратно-поступательные перемещения (колебания) ползуну 10 и, следовательно, электроду-инструменту 2.

Контроль наличия колебаний и подачи импульсов электрического тока производят по наличию звукового и светового сигналов на пульте управления источника технологического тока и по виду осциллограммы на экране осциллографа.

21. Отрегулировать производительность прокачки электролита через межэлектродный зазор дросселем с помощью рукоятки  $P_1$  (см. рис. 4.4).

22. Вращать рукоятку  $P_2$  (см. рис. 4.5), находящуюся на оси червяка червячной передачи 8, против часовой стрелки.

При этом приводится во вращение червячное колесо, выполняющее роль гайки ходового винта 7, и осуществляется медленное перемещение электрода-заготовки 3 до контакта с электродом-инструментом 2.

23. Установить контакт электрода-заготовки с электродом-инструментом и получить осциллограмму типа рис. 4.8, б на экране осциллографа.

24. Развести электроды на небольшое расстояние до исчезновения сигнала о контакте электродов.

25. Включить муфту 6 (см. рис. 4.5), передающую вращательное движение с выходного вала электродвигателя  $M_2$  привода 5 валу червяка привода подачи.

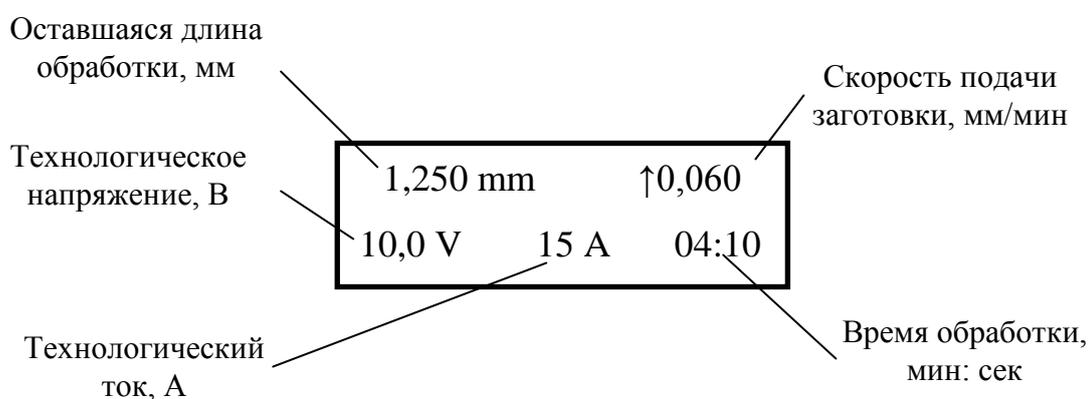
26. Установить рукояткой 10 (см. рис. 4.6) требуемое по технологическому процессу напряжение.

27. Включить кнопкой 7 привод автоматической подачи заготовки.

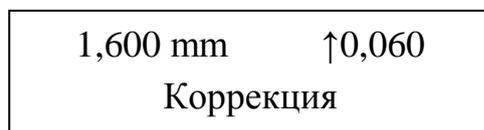
28. Установить ручкой 9 на панели управления определенную по табл. 4.5 величину автоматической подачи электрода-заготовки  $g_s$ ,

которая должна быть равна скорости анодного растворения или незначительно ее превышать. Провести контроль соответствия скорости подачи заготовки скорости анодного растворения материала по осциллограммам осциллографа и при необходимости откорректировать значение автоматической подачи.

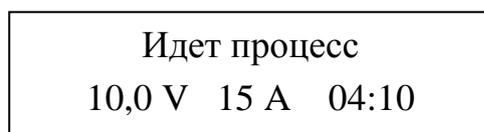
На индикаторе источника технологического тока появятся данные, характеризующие наличие процесса анодного растворения заготовки и сведения об оставшейся длине обработки, скорости подачи заготовки, технологическом напряжении, силе тока и времени обработки.



В процессе обработки можно корректировать длину обработки кнопками 2 и 3 (см. рис. 4.6).



При нажатии кнопки 3 в процессе обработки обнуляется время процесса, а при нажатии кнопки 1 с включенным приводом подачи происходит прекращение процесса обработки. При обработке с отключенным приводом подачи кнопка 6 отключает технологический ток, кнопка 5 отключает насос и технологический ток, кнопка 4 отключает вибрацию катода-инструмента и технологический ток. Если привод подачи в процессе обработки включен, то при нажатии на кнопки 4, 5 и 6 дисплей выдает следующее сообщение:



При превышении технологического тока порядка 100 А станок отображает сообщение с одновременным периодическим отключением тока:

Перегрузка

После прохождения заданной глубины станок автоматически выключается и на индикаторе появляется следующая надпись:

Финиш

2,0 V 0 A 25:00

Выключить станок можно также кнопкой 11 «Все стоп» (см. рис. 4.6).

29. Открыть рукояткой  $P_5$  клапан (см. рис. 4.4), произведя соединение рабочего пространства электродного блока с атмосферой для слива электролита из гидросистемы, что уменьшает попадание его в поддон (на рисунках не показан), расположенный под диэлектрическим электродным блоком на направляющих станины.

30. Отключить муфтой 6 (см. рис. 4.5) электропривод 9 (см. рис. 4.4). Снять электропривод подачи со стенки 8 электродного блока. Снять обработанную заготовку.

31. Провести измерение размеров и шероховатости обработанной поверхности, установить их соответствие чертежу.

32. Тщательно протереть станок по окончании работы от следов электролита чистой поролоновой губкой. Смазать ползун и рабочее пространство диэлектрического корпуса тонким слоем вазелина или смазкой ЦИАТИМ-201.

## Содержание работы

**Работа включает:** изучение устройства и назначения настольного электрохимического станка СНЭ–20МК, основ наладки станка на выполнение электрохимической размерной обработки, хронометрирование времени на наладку и выполнение операции электрохимического формообразования полости в заготовке, измерение размеров изготовленной детали и подготовку отчета.

## Порядок проведения работы

1. Изучите физико-химические основы электрохимической размерной обработки заготовок.

2. Изучите назначение, устройство станка СНЭ–20МК, основы его работы и наладки.

3. Проследите за наладкой станка учебным мастером для выполнения технологической операции электрохимического формообразования отверстия при следующих исходных параметрах обработки:

обрабатываемый материал: Сталь 40Х (HRC<sub>3</sub>, 40–43);

глубина обработки:  $l_n = 2,0^{+0,1}$  мм;

диаметр отверстия:  $d_n = 5,0^{+0,05}$  мм;

электролит: 20 % водный раствор NaNO<sub>3</sub>;

температура электролита: 20 °С;

водородный показатель: *pH*8;

дрессель расхода электролита открыт полностью.

Подберите и установите вместе с учебным мастером переменные параметры режима обработки:

– технологическое напряжение на электродах *U* и положение рукоятки *10* на панели управления станка (см. рис. 4.6);

– исходную скорость автоматической подачи электрода-заготовки *g*<sub>с</sub> и положение рукоятки *9* на панели управления станка (см. рис. 4.6).

4. Измерьте микрометром диаметр электрода-инструмента и проверьте соответствие полученного значения размеру, обеспечивающему заданный диаметр отверстия в детали.

5. Проведите хронометраж времени по наладке станка. Результаты хронометрирования времени занесите в табл. П1 протокола измерений, форма которого приведена в разделе «Содержание отчета» данной работы.

6. Проследите за изготовлением детали учебным мастером. Запишите режим обработки, время обработки и параметры обработки, указываемые на индикаторе источника технологического тока, в протокол эксперимента.

7. Получите от учебного мастера изготовленную деталь и измерьте действительные размеры диаметра и глубины отверстия, используя Малый инструментальный микроскоп МИМ и глубиномер с ценой деления 0,05 мм. Занесите результаты измерений в протокол измерений (таблица П2) и в сводную табл. 4.7.

Таблица 4.7

Сводные данные измерений параметров детали

Параметры режима обработки		Время обработки, $\tau_0$ , мин	Диаметр отверстия, $d_{cp}$ мм	Глубина отверстия $\ell_{cp}$ , мм	$Ra$ , мкм
Технологическое напряжение, $U$ , В	Скорость подачи заготовки $\mathcal{G}_S$ , мм/мин				

8. На представленном учебным мастером образце измерьте с помощью профилометра MarSurf PS1 шероховатость торцовой поверхности обработанного отверстия. Результаты измерения занесите в протокол измерений и табл. 4.7.

9. Определите погрешности обработки и оцените достигнутую точность полученных размеров. Заполните табл. 4.8.

Таблица 4.8

Параметры точности размеров обработанной детали

По диаметру отверстия		По длине обработки	
Погрешность обработки, $\Delta d$ , мм	Квалитет точности	Погрешность обработки $\Delta \ell$ , мм	Квалитет точности

Сделайте вывод о степени годности изготовленной детали.

10. Рассчитайте фактическую скорость анодного растворения заготовки  $\mathcal{G}_p^{\text{факт}}$  и сопоставьте ее с установленной рукояткой 9 панели управления станком скоростью  $\mathcal{G}_s$ .

11. Определите среднее действительное значение межэлектродного бокового зазора  $\delta_b$  по формуле  $\delta_b = (d_{cp} - d_{ном})/2$ .

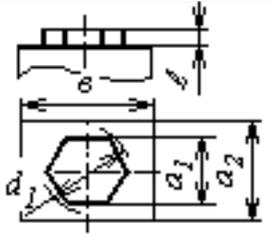
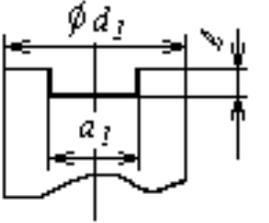
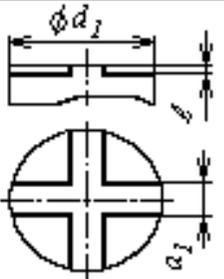
12. Получите индивидуальное задание для выполнения технологических расчетов при электрохимическом формообразовании поверхностей деталей на станке СНЭ–20МК по эскизам, приведенным в табл. 4.9.

13. По индивидуальному заданию и результатам хронометрирования рассчитайте составляющие штучно-калькуляционного времени на обработку указанной в задании партии заготовок и определите  $\tau_{шк}$ .

14. Определите среднюю скорость подачи, используя формулы (4.4) – (4.8), производительность обработки  $П_v$ , мм<sup>3</sup>/мин, и заполните табл. 4.10.



## Индивидуальные задания

Но- мер зада- ния	Операционный эскиз	Материал	Партия, штуки	Шероховатость поверхностей $Ra$ и размеры детали						
				$Ra$ , мкм	$d_1$ , мм	$d_2$ , мм	$a_1$ , мм	$a_2$ , мм	$v$ , мм	$\ell$ , мм
1		2Х13	200	0,2	–	–	10	15	20	2
2		30ХГСА	50	0,8	–	–	8	12	15	5
3		ВТ–16	1000	1,6	–	–	4	7	10	1
4		Т15К6	750	0,1	–	–	5	10	12	8
5		5ХНМА	40	0,4	30	–	2	–	–	10
6		Сталь 40ХН	800	0,8	20	–	4	–	–	2
7		Д1	250	0,16	15	–	6	–	–	4
8		ВК8	400	0,2	18	–	8	–	–	1
9		Сталь 40Х	200	1,6	40	–	2	–	–	3
10		Х18Н10Т	20	0,2	15	–	4	–	–	5
11		ЭИ–893	80	0,4	30	–	6	–	–	2
12		ВТ 14	1000	0.63	20	–	5	–	–	4

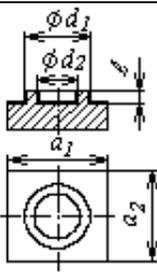
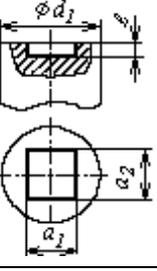
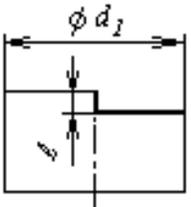
Но- мер зада- ния	Операционный эскиз	Материал	Партия, штуки	Шероховатость поверхностей $Ra$ и размеры детали						
				$Ra$ , мкм	$d_1$ , мм	$d_2$ , мм	$a_1$ , мм	$a_2$ , мм	$v$ , мм	$l$ , мм
13		9ХС	1500	0,63	15	10	20	20	—	1
14		СЧ 24	750	0,4	10	8	15	25	—	2
15		25Х5МА	50	0,2	8	5	10	18	—	3
16		ВТ8	100	1,6	14	6	24	16	—	4
17		20ХГСА	200	0,1	30	—	10	10	—	5
18		КЧ 37–12	20	3,2	10	—	2	4	—	6
19		ТТ7К12	2000	0,2	25	—	15	6	—	7
20		Р6М5	300	0,16	18	—	12	2	—	8
21		12ХН3А	500	0,4	40	—	—	—	—	2
22		40ХС	25	0,8	16	—	—	—	—	4
23		ВЧ 45–5	100	1,6	24	—	—	—	—	6
24		Р9Ф5К5	2000	0,2	28	—	—	—	—	1



Таблица 4.10

Сводные данные по расчету трудоемкости изготовления детали

Модель станка	Составляющие штучно-калькуляционного времени, мин						$\tau_{шк}$ , МИН	$g_p^{факт}$ , ММ/МИН	$П_v$ , ММ <sup>3</sup> / МИН
	$\tau_0$	$\tau_{всп}$	$\tau_{отд}$	$\tau_{обс}$	$\tau_{шт}$	$\tau_{нз}$			
СНЭ-20МК									

15. Определите долю непроизводительных затрат времени  $K_{нз}$  для данной технологической операции по формуле (4.9).

16. Разработайте систему мероприятий по механизации и автоматизации станка СНЭ–20МК или его узла (по заданию преподавателя), направленных на повышение производительности обработки.

17. Составьте отчет по работе.

### Содержание отчета

1. Наименование работы.
2. Экспериментальное определение технико-экономических показателей электрохимического формообразования на станке СНЭ–20МК.
  - 2.1. Цель, задачи проведения эксперимента.
  - 2.2. Условия проведения эксперимента:
    - наименование и модель станка, основные системы, узлы, агрегаты; технико-экономические показатели работы;
    - схема электрохимического формообразования, описание движений обработки, значения неизменяемых элементов режима обработки (гидравлические, механические, электрические);
    - чертеж детали и ее характеристики: материал, твердость, технологические задачи;
    - чертеж заготовки;
    - измерительный инструмент;
    - электролит и его характеристики: состав, концентрация, водородный показатель, удельная электропроводимость.

2.3. Структура технологической операции электрохимической обработки заготовки в форме табл. 4.11.

Таблица 4.11

Структура технологической операции формообразования отверстия

Наименование технологической операции	Номер перехода	Наименование перехода	
		вспомогательного	технологического

2.4. Результаты хронометрирования элементов штучно-калькуляционного времени при выполнении учебным мастером наладки станка и обработки заготовок в форме таблицы П1 протокола измерений.

2.5. Устанавливаемые режимы обработки заготовок: электрические, механические, гидравлические.

2.6. Результаты измерения параметров изготовленной детали в форме таблиц 4.7 и 4.8. Сопоставление полученных значений с заданными, формулировка выводов о годности детали и точности обработки на станке.

3. Индивидуальное задание (см. табл. 4.9): «Выбор технологических параметров режима обработки и расчет технико-экономических характеристик обработки».

3.1. Чертеж детали, исходные данные.

3.2. Выбор электролита: состав, концентрация, водородный показатель  $pH$ .

3.3. Электродные процессы при обработке заготовки (даются в виде уравнений окислительно-восстановительных реакций).

3.4. Назначение режима обработки ( $U$ ;  $\mathcal{I}_S$ ) и позиции рукояток пульта управления.

3.5. Расчет основного времени обработки  $\tau_0$  по установленному значению  $\mathcal{I}_S$ .

3.6. Расчеты  $\tau_{шт}$ ,  $\tau_{шк}$  и  $K_{нз}$  по формулам (4.4) – (4.9) и заполнение табл. 4.10.

3.7. Расчет производительности обработки по объему снимаемого материала  $P_V = \Delta V/\tau_0$ , мм<sup>3</sup>/мин.

3.8. Расчет значения силы тока  $I$  при электрохимической обработке заготовки и проверка его по допустимому значению силы тока на станке.

4. Мероприятия по повышению производительности обработки заготовок на станке СНЭ–20МК.

5. Приложение. Протокол измерений (по далее приведенной форме).

Приложение

**ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ  
К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ «НАЗНАЧЕНИЕ И УСТРОЙСТВО  
НАСТОЛЬНОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО СТАНКА  
МОДЕЛИ СНЭ-20МК»**

Группа \_\_\_\_\_

Дата проведения эксперимента « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201 \_\_\_\_ г.

**1. Условия проведения эксперимента**

1.1. Оборудование: \_\_\_\_\_

1.2. Рабочая среда (вид, состав, концентрация, температура,  $pH$ ):  
\_\_\_\_\_

1.3. Характеристики электрода-инструмента: \_\_\_\_\_

1.4. Материал заготовки: \_\_\_\_\_

1.5. Форма и размеры заготовки: \_\_\_\_\_

1.6. Устанавливаемые параметры режима обработки: \_\_\_\_\_

1.7. Измерительные инструменты и приборы: \_\_\_\_\_

**2. Таблицы измерений**

Таблица П1

Результаты хронометрирования элементов  
штучно-калькуляционного времени

Элементы затрат времени	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_5$	$\tau_6$	$\tau_7$	$\tau_8$	$\tau_9$	$\tau_{10}$
Результаты хронометрирования, мин										

Шероховатость торцевой (донной) поверхности отверстия детали по параметру  $Ra$ , мкм: \_\_\_\_\_ .

Таблица П2

Параметры обработанного отверстия детали

Время обработки, $\tau_0$ , мин	Диаметр отверстия, $d$ , мм			$d_{cp}$	Глубина отверстия $\ell$ , мм			$\ell_{cp}$
	Номер измерения				Номер измерения			
	1	2	3		1	2	3	

Студент(ка) \_\_\_\_\_

Преподаватель \_\_\_\_\_

## **5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ НА СТАНКЕ СНЭ–20МК ОТ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОДАХ**

*Цель работы:* умения проводить эксперименты по обработке заготовок методом электрохимического формообразования, строить графики зависимостей технологических характеристик работы настольного электрохимического станка СНЭ–20МК от напряжения на электродах, формулировать выводы.

### **Содержание работы**

Работа включает изучение процесса электрохимического формообразования отверстий в заготовках на станке СНЭ–20МК, экспериментальное определение зависимостей скорости электрохимического растворения материала  $\mathcal{G}_p$  (скорости подачи заготовки  $\mathcal{G}_s$ ), силы тока  $I$ , шероховатости обработанных поверхностей  $Ra$ , межэлектродного зазора  $\delta$  и коэффициента выхода по току  $k_\eta$  от напряжения на электродах  $U$ .

Условия проведения эксперимента: электролит – водный раствор нитрида натрия  $\text{NaNNO}_3$ , концентрация электролита – 15 %, обрабатываемый материал Сталь 40Х, НРС<sub>3</sub>, 40–43. Схема прокачки электролита – поперечная. Дроссель регулирования расхода электролита открыт полностью.

В основу работы положены теоретические сведения о процессе электрохимического растворения материала, теоретические зависимости технологических характеристик электрохимической обработки от режима обработки, устройство и система наладки станка СНЭ–20МК, представленные в работах 3 и 4.

## Последовательность проведения работы

1. Изучите теоретические основы электрохимической размерной обработки, закономерности анодного растворения, устройство и методику наладки станка СНЭ–20МК, представленные в работах 3 и 4, а также в литературе раздела «Библиографический список».

2. Проследите за действиями учебного мастера по наладке станка СНЭ–20МК к проведению эксперимента.

3. Нарисуйте эскизы детали, заготовки и приспособления для ее закрепления. Примите диаметр отверстия детали  $d = 5,0^{+0,05}$  мм, глубину обработки  $\ell = 5,0^{+0,1}$  мм.

Измерьте диаметр используемого электрода-инструмента  $d_{эи}$  и определите номинальный размер принятого в эксперименте межэлектродного зазора  $\delta^{ном} = d^{ном} - d_{эи}$ .

4. Обрабатывайте под руководством учебного мастера одну заготовку при напряжении на электродах  $U$  равном 4, 8, 12, 16 или 20 В (значение напряжения  $U$  задает преподаватель). Измерьте основное время обработки  $\tau_o$ . Установку напряжения осуществляйте рукояткой 10 (см. рис. 4.6), расположенной на панели управления источника технологического тока. Оптимизацию режима обработки в этом эксперименте обеспечьте рукояткой 9 (см. рис. 4.6), приведя в соответствие скорость анодного растворения материала  $\mathcal{G}_p$  и скорость подачи заготовки  $\mathcal{G}_s$ . Форма импульсов на осциллографе должна при этом быть приближена к форме импульсов, представленной на диаграмме рис. 4.8, б.

Результаты эксперимента занесите в табл. П2.2 протокола измерений, форма которого представлена в разделе «Содержание отчета».

5. Получите от учебного мастера пять специально подготовленных для измерения образцов, цилиндрические отверстия на которых получены методом электрохимического формообразования при напряжениях 4, 8, 12, 16, 20 В, сведения о времени обработки  $\tau_o$ , силе тока  $I$  в эксперименте, позиции рукоятки 9 (см. рис. 4.6) при обработке отверстий по каждому образцу. Значения параметров занесите в

табл. П2.1 раздела «Условия проведения эксперимента» протокола измерений.

6. На изготовленных образцах проведите измерения действительных размеров  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $\ell$  (рис. 5.1) на Малом инструментальном микроскопе МИМ и шероховатости цилиндрической поверхности по параметру  $Ra$ . Для измерения шероховатости используйте профилометр MarSurf PS1 (Приложение 1). Занесите средние значения полученных размеров в табл. П2.3 протокола измерений.

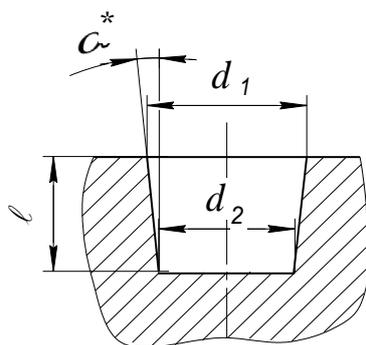


Рис. 5.1. Измеряемые размеры отверстия  
(\*  $\alpha$  – расчетный размер)

7. По табл. 4.5 установите табличное значение скорости подачи при изготовлении каждого образца. Данные занесите в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Параметры точности размеров образцов

Номер образца	$\mathcal{D}_s$ , мм/мин	По диаметру отверстия		По длине обработки		$\alpha$ , град
		Погрешность обработки, $\Delta d$ , мм	Квалитет точности	Погрешность обработки $\Delta \ell$ , мм	Квалитет точности	
1						
2						
3						
4						
5						

8. Рассчитайте погрешности обработки размеров  $\Delta d = \bar{d}_1 - d^{\text{нн}}$  и  $\Delta \ell = \bar{\ell} - \ell^{\text{нн}}$ , угол уклона  $\alpha$  обработанной поверхности и оцените по ГОСТ 25670–83 достигнутую точность полученных размеров. Заполните табл. 5.1.

9. Сделайте выводы о соответствии изготовленных образцов чертежу, выберите оптимальный по размерной точности режим обработки, дайте характеристику технологических возможностей станка.

10. Рассчитайте по каждому режиму обработки значение межэлектродного зазора  $\delta_i$  по формуле  $\delta_i = d_{2i} - d_{\text{эл}}$ . Полученные значения занесите в табл. 5.2.

11. Определите фактическую  $m_{\text{ф}}$  и теоретическую  $m$  массы удаленного материала по каждому эксперименту, рассчитайте коэффициенты выхода по току  $k_{\eta}$ , используя формулы (3.1) и (3.4). Данные занесите в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Расчет коэффициента выхода по току

Номер образца	$U$ , В	Межэлектродный зазор, мм		$\bar{d}_{\text{д}}$ , мм	$m$ , кг	$m_{\text{ф}}$ , кг	$k_{\eta}$
		$\delta_{\text{табл}}$	$\delta_{\text{д}}$				
1	4						
2	8						
3	12						
4	16						
5	20						

12. Определите скорость растворения материала заготовки  $\mathcal{G}_p = \ell_i / \tau_0$  по каждому образцу и занесите полученные данные в табл. 5.3. Сопоставьте полученные значения с табличными данными скорости подачи заготовки  $\mathcal{G}_s$ , указанные в табл. 5.3.

13. Постройте вольт-амперную характеристику  $I = f(U)$  для реализованных при электрохимической обработке условий обработки.

Таблица 5.3

Сопоставление табличных значений скорости подачи заготовки  $\mathcal{G}_S$  и фактических значений скорости растворения материала  $\mathcal{G}_p$

Номер образ-ца	$U$ , В	Скорости $\mathcal{G}_S$ и $\mathcal{G}_p$ , мм/мин		Сила и плотность тока	
		табличная $\mathcal{G}_S$	фактическая $\mathcal{G}_p$	$I$ , А	$\rho_i$ , А/см <sup>2</sup>
1	4				
2	8				
3	12				
4	16				
5	20				

14. Постройте графики зависимостей скорости электрохимического растворения материала заготовки  $\mathcal{G}_p$ , силы тока, коэффициента выхода по току  $k_\eta$ , межэлектродного зазора  $\delta$  от напряжения  $U$  на электродах. Укажите на графиках экспериментальные точки, соединив их тонкими линиями, и нанесите зрительно аппроксимирующую кривую, используя рекомендации, представленные в разделе «Обработка экспериментальных данных».

15. Постройте по аналогичной методике график зависимости значений среднеарифметического отклонения профиля  $Ra$  шероховатости цилиндрической поверхности отверстия детали от напряжения на электродах  $Ra = f(U)$ .

16. Для одной из полученных графическим методом экспериментальных зависимостей (по указанию преподавателя) выберите из представленных в разделе «Обработка экспериментальных данных» наиболее соответствующую сглаживающей кривой графика аппроксимирующую функцию и, используя метод наименьших квадратов, рассчитайте с помощью вычислительного пакета MathCad коэффициенты  $k$  и  $\beta$ . Напишите математически полученное уравнение зависимости и проведите его статистический анализ.

17. Составьте отчет по работе.

### Содержание отчета

1. Наименование работы.
2. Цель, задачи и условия проведения эксперимента.
  - 2.1. Наименование и модель станка.
  - 2.2. Схема электрохимического формообразования, описание движений обработки, значения постоянных элементов режима обработки (гидравлические, механические, электрические).
  - 2.3. Чертеж образца и его характеристики: материал, твердость.
  - 2.4. Эскизы заготовки, приспособления для закрепления заготовки и образцов для измерения.
  - 2.5. Измерительные инструменты, точность измерения.
  - 2.6. Электролит и его характеристики: состав, концентрация, водородный показатель  $pH$ , удельная электропроводимость  $\gamma_{эл}$ .
3. Режимы обработки заготовок (в форме табл. П2.1 раздела «Исходные данные» Приложения 2 к работе).
4. Результаты измерений размеров и шероховатости цилиндрической поверхности экспериментальных образцов (в форме таблиц П2.2 и П2.3).
5. Точностные характеристики образцов (в форме табл. 5.1) и выводы о соответствии образцов чертежу.
6. Расчеты межэлектродных зазоров и коэффициентов выхода по току  $k_{\eta}$  (табл. 5.2). График зависимости  $k_{\eta}$  от напряжения на электродах  $U$ .
7. Определение скорости анодного растворения материала  $\mathcal{G}_p$  и плотности тока  $\rho_i$  (в форме табл. 5.3). Вольт-амперная характеристика процесса и график зависимости скорости подачи заготовки  $\mathcal{G}_p$  от напряжения на электродах  $U$ .
8. Графики зависимостей шероховатости поверхности по параметру  $Ra$  и межэлектродного зазора  $\delta$  от напряжения на электродах  $U$ .
9. Индивидуальное задание по математической обработке экспериментальных данных и вывод зависимости \_\_\_\_\_ (по указанию преподавателя) с помощью пакета MathCad. Статистическая обработка результатов.
10. Выводы.

11. Приложения.

Приложение 1. Презентация расчетов и графических зависимостей, выполненных с помощью вычислительной программы MathCad.

Приложение 2. Протокол измерений (составляется по далее приведенной форме).

Приложение 2

**ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ  
К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ «ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ  
ОТВЕРСТИЙ ОТ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОДАХ  
НА СТАНКЕ СНЭ–20МК»**

Группа \_\_\_\_\_

Дата проведения эксперимента « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

**1. Условия проведения эксперимента**

1.1. Оборудование: \_\_\_\_\_

1.2. Рабочая среда (вид, состав, концентрация, температура,  $pH$ ):

1.3. Характеристики электрода-инструмента: \_\_\_\_\_

1.4. Материал заготовки: \_\_\_\_\_

1.5. Форма и размеры заготовки: \_\_\_\_\_

1.6. Размеры и шероховатость изготавливаемого отверстия детали:

1.7. Измерительные инструменты и приборы: \_\_\_\_\_

1.8. Режимы обработки экспериментальных образцов

Таблица П2.1

Номер образца	$U$ , В	$I$ , А	$\tau_0$ , мин	Позиция рукоятки 9 (рис. 4.6)
1	4			

Окончание табл. П2.1

Номер образца	$U$ , В	$I$ , А	$\tau_0$ , мин	Позиция рукоятки 9 (рис. 4.6)
---------------	------------	------------	-------------------	----------------------------------

2	8			
3	12			
4	16			
5	20			

## 2. Таблицы измерений

Таблица П2.2

Результаты эксперимента по обработке отверстия  
(по пп. 3, 4 раздела «Последовательность проведения  
эксперимента»)

$d_{эв}$ , мм	$\delta$ , мм	$U$ , В	$I$ , А	$\tau_0$ , мин	$d$ , мм	$\ell$ , мм	$\mathcal{G}_S$ , мм/мин

Таблица П2.3

Результаты эксперимента по изготовлению опытных образцов

№ об- раз- ца	$d_1$ , мм			$\bar{d}_1$	$d_2$ , мм			$\bar{d}_2$	$\ell$ , мм			$\bar{\ell}$	$Ra$ , мкм			$\bar{Ra}$
	Измере- ние				Измерение				Измерение				Измерение			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3				
1																
2																
3																
4																
5																

Студент(ка) \_\_\_\_\_

Преподаватель \_\_\_\_\_

## 6. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И ТОЧНОСТЬ ПЛАЗМЕННО-ВОЗДУШНОЙ РЕЗКИ ПЛАЗМОТРОНОМ ПВР-402

**Цель работы:** знания основных закономерностей и показателей качества плазменно-воздушной резки, устройства плазмотрона; умения определять показатели качества реза, находить закономерности этих показателей от параметров процесса обработки, определять припуск на механическую обработку и время плазменно-воздушной резки.

### Технологические характеристики плазменной резки

Плазменно-воздушная резка металла основана на использовании термического и кинетического энергетического воздействий на заготовку плазменной струи, которая образуется при обжати воздуха воздушным потоком электрического дугового разряда в узком канале сопла плазмотрона (рис. 6.1). При этом температура газового потока достигает  $(10...15) \cdot 10^3 \text{ } ^\circ\text{C}$  при плотности энергетического потока до  $4 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2$ . Газы, истекающие из сопла, нагреваются и при расширении ускоряются, образуя высокоскоростную струю, способную расплавить металл и сдуть его жидкие частицы с формируемой поверхности.

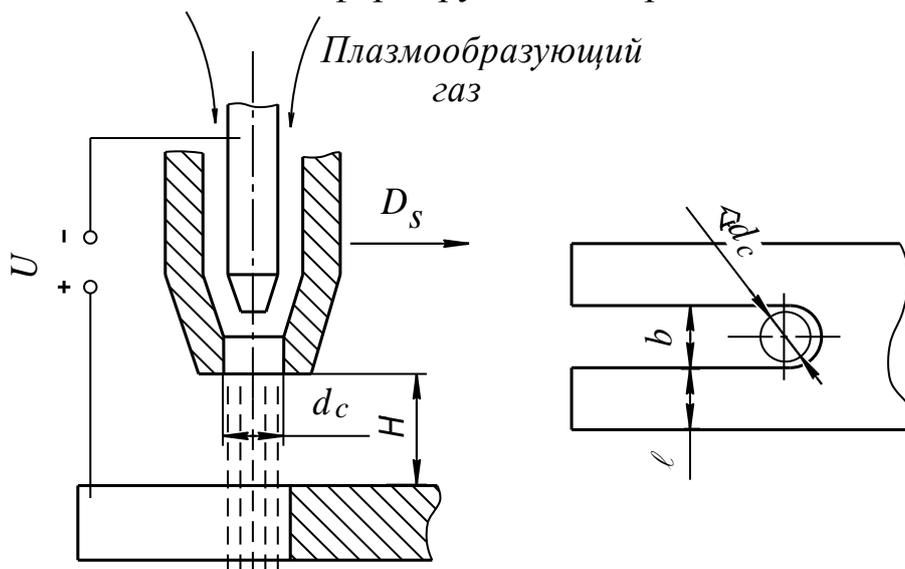


Рис. 6.1. Схема плазменной резки

Методом плазменно-воздушной резки можно обрабатывать металлы различной химической активности на операциях разрезания, удаления припуска, вырезки участков дефектных сварных швов, отрезания прибылей и литников отливок.

Энергетическое воздействие плазменной струи на заготовку приводит к расплавлению металла заготовки на площади пятна контакта струи с обрабатываемой поверхностью, нагреву воздуха, частей плазмотрона и нерасплавляемой части заготовки, а также к механическому ускорению потока газов. Расчет баланса значений подаваемой и расходуемой энергии, выполненный теоретико-экспериментальным способом, позволяет определить по формуле (6.1) максимально возможную скорость перемещения плазмотрона относительно заготовки  $\mathcal{G}_{max}$ , м/с. От этой скорости зависит производительность процесса плазменно-воздушной резки.

$$\mathcal{G}_{max} = \frac{0,75 I_{\partial z} U_{\partial z} - 100 k_{\lambda} \theta_{nl} b h}{b h \rho_m \left[ k_c (\theta_{nl} - \theta_n) + w_m \right]}, \quad (6.1)$$

где  $I_{\partial z}$  — сила тока плазменной дуги, А;  $U_{\partial z}$  — напряжение на электродах, В;  $h$  — толщина заготовки, м;  $b$  — ширина реза, которую при приближенных расчетах можно принять равной  $1,5d_c$ , где  $d_c$  — диаметр сопла плазмотрона, м;  $\theta_{nl}$ ,  $\theta_n$  — соответственно температура плавления и исходная температура материала заготовки, °С;  $\rho_m$  — плотность материала заготовки, кг/м<sup>3</sup>;  $k_c$  — коэффициент теплоемкости, Дж/кг·К;  $k_{\lambda}$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $w_m$  — удельная теплота плавления материала заготовки, Дж/кг (табл. 6.1).

Основными показателями качества плазменно-воздушной резки являются: погрешность размера длины отрезаемой заготовки  $\Delta \ell$ ; отклонение от перпендикулярности стенок реза к опорной плоскости заготовки  $\Delta \rho$ ; параметр шероховатости поверхности реза  $Rz$ ; глубина зоны термического влияния  $h_{зтв}$  поверхностного слоя заготовки, имеющая после плазменного разрезания измененную структуру материала.

Значения этих показателей определяются как физическими особенностями процесса, так и спецификой применяемого оборудования.

Таблица 6.1

Физические характеристики материалов

Материал	$\rho_m$ , кг/м <sup>3</sup>	$k_c$ , Дж/кг·К	$w_m$ , Дж/кг	$k_\lambda$ , Вт/м·К	$\theta_{пл}$ , °С
Алюминий	2700	916	$3,84 \cdot 10^5$	280	680
Железо	7800	458	$2,67 \cdot 10^5$	32	1560
Медь	8900	416	$2,12 \cdot 10^5$	384	1083
Титан	4500	575	$4,36 \cdot 10^5$	17	1665
Никель	8800	458	$3,0 \cdot 10^5$	55	1452
Магний	1740	1040	$2,08 \cdot 10^5$	131	650
Молибден	10200	292	$2,0 \cdot 10^5$	68	2600
Вольфрам	19350	133	$2,54 \cdot 10^5$	124	3395

Погрешность исполнения заданного линейного размера заготовки ( $\Delta \ell$ ) зависит от точности перемещения плазмотрона относительно заготовки, не контролируемого изменения ширины реза, вызванного разгаром сопла плазмотрона и некоторых других специфических характеристик плазменной струи.

Отклонение от перпендикулярности поверхности реза к опорной плоскости заготовки ( $\Delta \rho$ ) возникает при больших (рис. 6.2, б) или меньших (рис. 6.2, в), чем оптимальная, скоростях резки. В первом случае энергии плазменной струи не хватает для расплавления металла в зоне реза, во втором — металла расплавляется значительно больше, чем необходимо для получения равномерного по ширине канала реза (рис. 6.2, а).

Шероховатость поверхности плазменного реза по параметру  $Rz$  довольно высока (40...630 мкм), что связано со сложным характером процесса газодинамического удаления расплавленного металла из зоны обработки.

Специфической особенностью плазменно-воздушной резки является образование на поверхности реза термически измененного слоя ( $h_{зтв}$ ), вызванного процессами фазово-структурных изменений в металле.

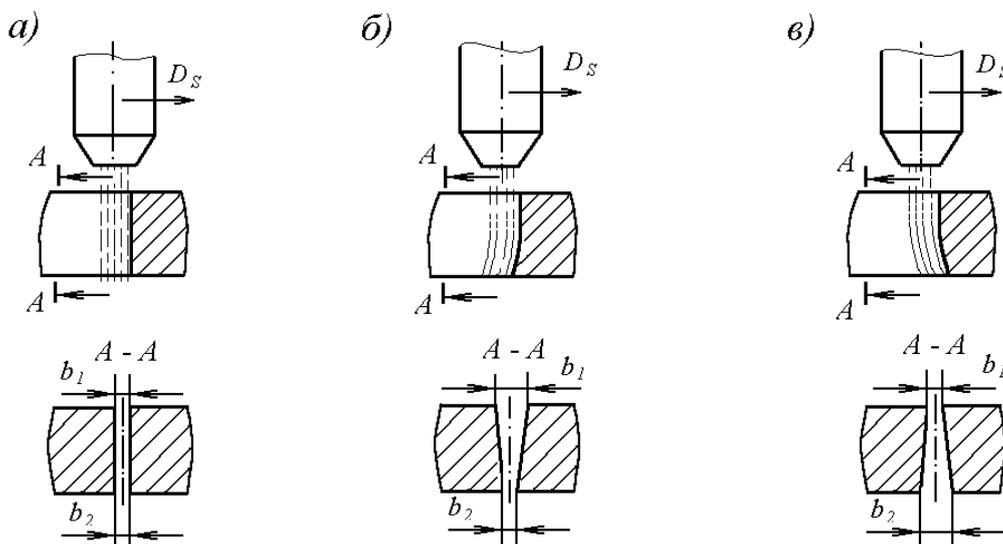


Рис. 6.2. Схемы образования резов

Так, на поверхностях реза заготовок, изготовленных из конструкционных углеродистых сталей, вследствие нагрева выше температуры фазовых превращений и последующего быстрого отвода тепла в основную холодную часть заготовки может образоваться закаленный слой, удаление которого при последующей механической обработке представит значительные трудности.

Допустимые составляющие погрешности резки регламентированы ГОСТ 4792–80, в соответствии с которым выделено три класса точности обработки заготовок. Каждый класс характеризуется совокупностью параметров, значения которых указаны в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Показатели качества плазменной резки заготовок

№ п/п	Параметр качества реза	Обозначение	$h$ , мм	Класс точности плазменного реза		
				1	2	3
1	Погрешность линейных размеров, мм	$\Delta l$	13...30	1,0	2,0	3,5
			31...60	1,0	2,5	4,0

№ п/п	Параметр качества реза	Обозначение	h, мм	Класс точности плазменного реза		
				1	2	3
2	Отклонение от перпендикулярности кромок, мм	$\Delta\rho$	13...30 31...60	0,5 0,7	1,2 1,6	3,0 4,0
3	Шероховатость поверхности реза, мм	$Rz$	13...30 31...60	0,06 0,07	0,2 0,32	0,32 0,63
4	Глубина зоны термического влияния для углеродистых сталей, мм	$h_{зтв}$	13...30 31...60	0,40 0,80	1,6 3,2	3,2 6,4

Приведенные в ГОСТ 4792–80 данные о погрешностях плазменно-воздушной резки позволяют вычислять требуемые размеры заготовок, поступающих после резки на механическую обработку. Размеры заготовок для двухсторонней резки могут быть определены по следующим формулам (без учета погрешности установки на операции механической обработки):

для охватывающих размеров

$$L_{\text{оо}}^{\text{н}} = L_{\text{адо}}^{\text{н}} - 2(l + \Delta\rho + Rz + h_{\text{зтв}}), \quad (6.2)$$

для охватываемых размеров

$$L_{\text{оо}}^{\text{н}} = L_{\text{адо}}^{\text{н}} + 2(l + \Delta\rho + Rz + h_{\text{зтв}}). \quad (6.3)$$

### Оборудование для плазменно-воздушной резки

Установка для плазменно-воздушной резки (рис. 6.3) состоит из источника управляемого тока дуги 1, устройства высоковольтного возбуждения вспомогательной дуги 2, приборов контроля напряжения и силы тока дуги, расхода воздуха, охлаждающей воды и плазмотрона 3.

Устойчивое горение электрического разряда в плазменной струе, также как и в обычной электрической дуге, обеспечивает источник питания, имеющий круто падающую вольт-амперную характеристику. Для получения такой характеристики в настоящее время используют тиристорные фазоуправляемые источники тока. Эксплуатация установки осуществляется от сети трехфазного тока (380 В).

Установка имеет источник сжатого воздуха с давлением 0,4 МПа, обеспечивающий его расход 4...8 м<sup>3</sup>/час. Охлаждение плазмотрона осуществляют технической водой с расходом 2...8 л/мин.

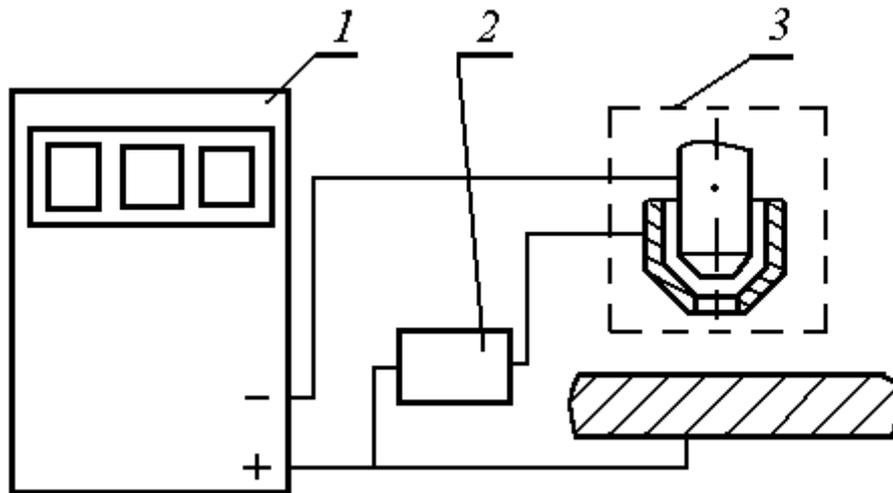


Рис. 6.3. Схема устройства установки для плазменно-воздушной резки

Плазмотрон ПВР-402 (рис. 6.4) состоит из водоохлаждаемого

катода 1, выполненного из меди и имеющего вставку 3 из гафния, обеспечивающую замедление выгорания катода при высоких температурах. Между заготовкой и катодом расположено медное водоохлаждаемое сопло 4 диаметром выходного отверстия  $d_c$  мм. Через него подается закрученный с помощью специального завихрителя 2 поток воздуха.

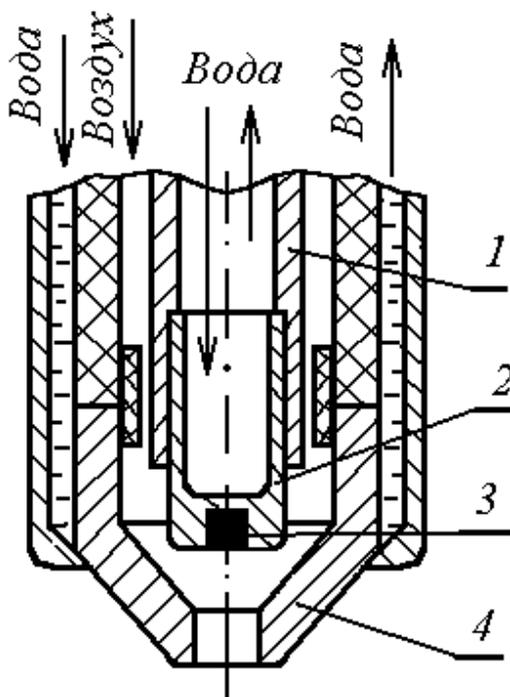


Рис. 6.4. Устройство плазмотрона

горения плазменной дуги, недостаточно для электрического пробоя воздушного промежутка между катодом и заготовкой. Поэтому для зажигания основной дуги с помо-

щью специального высоковольтного источника питания 2 (см. рис. 6.3), производят искровой разряд в малом (менее 3 мм) промежутке между соплом плазмотрона 4 и катодом 1 (см. рис. 6.4). При этом на сопло подают положительный потенциал.

В результате этих действий через ионизированный искровой канал течет ток вспомогательной электрической дуги (менее 100 А). Истекающий из сопла ионизированный поток воздуха достигает заготовки и замыкает электрическую цепь «катод – заготовка», обеспечивая развитие основной электрической дуги, величина силы тока в которой для плазмотрона ПВР–402 может достигать 400 А. После этого сопло отключают от источника питания.

### **Содержание работы**

Работа включает изучение устройства плазмотрона ПВР–402, технологических характеристик и основных закономерностей плазменно-воздушной резки заготовок, проведение эксперимента с определением классов резов в зависимости от напряжения на электродах и силы тока, статистическую обработку результатов экспериментов, вывод формул и построение графиков полученных зависимостей, выполнение индивидуального задания и составление отчета.

### **Последовательность выполнения работы**

1. Проведите резку листовой заготовки из Стали 45 на установке с использованием плазмотрона ПВР–402 на трех различных скоростях  $\mathcal{G}_p$  при  $I_{\partial z} = \text{Const}$  и при трех значениях силы тока плазменной струи при  $\mathcal{G}_p = \text{Const}$  (табл. 6.3), фиксируя параметры процесса ( $U_{\partial z}$ ,  $I_{\partial z}$ ) по приборам установки АПР–404.

2. Получив образцы резов, выполненных на различных режимах обработки, измерьте ширину реза на входе  $b_1$  и выходе  $b_2$  плазменной струи в трех местах реза. Полученные данные занесите в таблицу П2.2 протокола измерений, форма которого приведена в разделе «Содержание отчета».

## Параметры режима резки

Номер реза	Режим резки			
	$U_{дз}$ , В	$\mathcal{G}_p$ , м/с	$I_{дз}$ , А	$d_c$ , мм
1	140	$2,7 \cdot 10^{-3}$	250	4
2		$3,3 \cdot 10^{-3}$		
3		$1,3 \cdot 10^{-3}$		
4		$1,6 \cdot 10^{-3}$	200	
5			300	
6			250	

3. Оцените визуально, используя эталоны шероховатости, высоту микронеровностей обработанных поверхностей по параметру  $R_z$ . Результаты измерений внесите в таблицу П2.2 протокола измерений.

4. На шлифах, изготовленных из вырезанных заготовок, в зоне реза найдите и измерьте на металлографическом микроскопе зону дефектного слоя металла ( $h_{змс}$ ). Результаты измерений занесите в таблицу П2.3 протокола измерений.

5. Рассчитайте среднюю ширину каждого реза на входе  $\bar{b}_{1i}$  и на выходе  $\bar{b}_{2i}$  плазменной струи и среднее значение отклонения от перпендикулярности стенок резов  $\Delta\bar{\rho}_i$  опорной поверхности заготовки по формуле

$$\Delta\bar{\rho}_i = \left| \bar{b}_{1i} - \bar{b}_{2i} \right| / 2, \quad (6.4)$$

где  $i$  – номер реза.

Результаты расчетов занесите в табл. 6.4.

6. Зарисуйте формы профилей резов (см. рис. 6.2). Определите, какие резы выполнены на меньшей, а какие на большей по сравнению с оптимальной скоростью разрезания  $\mathcal{G}_p$ . Определите приблизительно диапазон значений оптимальной скорости плазменного разрезания, обеспечивающей минимальные значения неперпендикулярности стенок реза торцовым поверхностям заготовки.

Таблица 6.4

## Результаты измерения параметров плазменных резов

Но- мер реза	Эскиз профиля реза	$U_{0z},$ В	$I_{0z},$ А	$\mathcal{G}_p,$ м/с	$\bar{b}_1,$ мм	$\bar{b}_2,$ мм	$\overline{\Delta\rho},$ мм	$Rz,$ мкм	$h_{зтв},$ мм

*Примечание.* Средние значения отклонения от перпендикулярности стенок резов  $\overline{\Delta\rho}$  занесите в табл. 6.4 с указанием знака «+» или «-». Примите положительным значение  $\overline{\Delta\rho}$  в случае  $b_1 > b_2$ .

7. Сопоставьте наибольшую полученную ширину реза  $\bar{b}_{max_i}$  с диаметром сопла плазмоторона  $d_c$  и определите неизвестный коэффициент  $k$  приближенной зависимости

$$b_{max} = k d_c. \quad (6.5)$$

8. Сравните экспериментальные данные с регламентируемыми показателями качества плазменного разрезания заготовок (см. табл. 6.2) и определите классы точности полученных резов.

9. Постройте графики зависимости отклонения от перпендикулярности стенок реза  $\Delta\rho$  и глубины зоны термического влияния  $h_{зтв}$  от скорости резки  $\mathcal{G}_p$  и силы тока плазменной струи  $I_{0z}$ . Укажите на графиках экспериментальные точки, соедините их тонкими линиями, и нанесите зрительно аппроксимирующую кривую, используя рекомендации, представленные в разделе «Обработка экспериментальных данных».

В принятых диапазонах изменений варьируемых параметров  $I$  и  $\mathcal{G}_p$  зависимости отклонения от перпендикулярности стенок реза и размеров зоны термического влияния от силы тока  $I$  и скорости разрезания  $\mathcal{G}_p$  описываются следующими формулами:

$$\Delta\rho = \alpha_1 \cdot e^{-\beta_1 \mathcal{G}}, \quad h_{зтв} = \alpha_3 \cdot e^{-\beta_3 \mathcal{G}}, \quad (6.6)$$

$$\Delta\rho = \alpha_2 \cdot e^{-\beta_2 I_{0z}}, \quad h_{зтв} = \alpha_4 \cdot e^{-\beta_4 I_{0z}}. \quad (6.7)$$

На основе сопоставления визуально построенных графиков аппроксимирующих зависимостей и представленных на этих же рисунках теоретических зависимостей, описываемых формулами (6.6) и (6.7), определите те экспериментальные зависимости, которые соответствуют теоретическим представлениям о характере протекания процессов плазменной резки.

10. Для одной из полученных графическим методом экспериментальных зависимостей (по указанию преподавателя) рассчитайте с помощью вычислительного пакета MathCad коэффициенты  $k$  и  $\beta$  формул (6.6), (6.7). Напишите математически полученное уравнение зависимости и проведите его статистический анализ.

11. Получите от преподавателя индивидуальное задание (табл. 6.5) и выполните следующие расчеты:

– рассчитайте максимально возможную скорость реза для получения заготовки по формуле (6.1);

– определите по формулам (6.2), (6.3) размеры и нарисуйте эскиз заготовки, поступающей после плазменной резки на механическую обработку;

– рассчитайте время вырезки заготовки  $\tau_0$  с учетом определенного в эксперименте соотношения между диаметром сопла  $d_c$  и шириной реза  $b_{max}$ .

### Содержание отчета

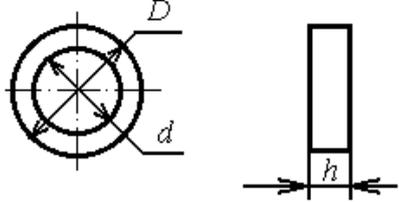
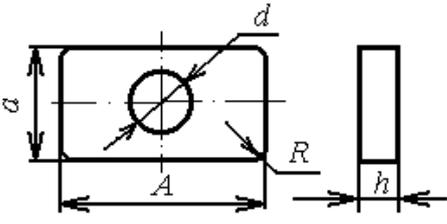
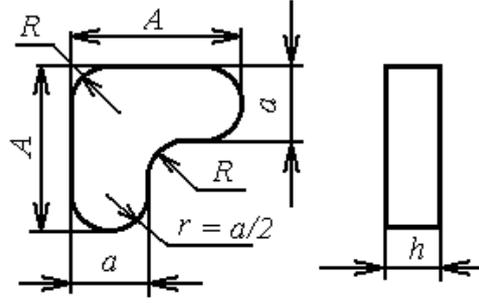
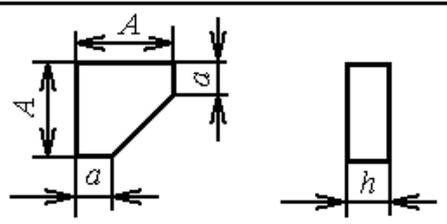
1. Название работы.

2. Условия проведения эксперимента: установка для плазменной резки, приспособление и другая технологическая оснастка, материал и размеры заготовки; измерительные приборы.

3. Результаты эксперимента по форме табл. 6.4. Определение класса точности реза.

4. Обобщенная характеристика качества плазменной резки в сопоставлении с качеством поверхностей после разрезания лезвийным инструментом.

## Индивидуальные задания

Эскиз детали	№ ПП	$D(A)$ , ММ	$d$ , ММ	$b$ , ММ	$a$ , ММ	$h$ , ММ	$R$ , ММ
	1	500	430	3		15	
	2	450	200			60	
	3	400	170			45	
	4	300	250			18	
	5	200	100			30	
	6	100	30			25	
	7	500	150	4	400	55	50
	8	450	350		400	22	40
	9	350	200		300	45	30
	10	200	120		150	14	20
	11	100	50		80	20	15
	12	100	40		70	10	10
	13	300		5	20	20	20
	14	270			50	35	50
	15	220			45	40	45
	16	210			30	50	30
	17	130			40	30	40
	18	100			18	13	20
	19	200		6	20	32	
	20	180			18	28	
	21	160			16	22	
	22	140			14	18	
	23	120			12	14	
	24	110			10	15	

*Примечания.* 1.  $U_{0z} = 200$  В. 2. Значение силы тока  $I_{0z}$  задает преподаватель в диапазоне  $I_{0z} = 200 \dots 400$  А. 3. Материал заготовки назначается преподавателем из табл. 6.1.

5. Графики зависимостей отклонения от перпендикулярности кромок реза и толщины дефектного слоя на поверхности реза от скорости резки и силы тока по форме рис. 1.

6. Определение неизвестных коэффициентов  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  зависимостей (6.6) и (6.7) методом наименьших квадратов по методике, ука-

занной в разделе «Обработка экспериментальных данных». Статистическая обработка полученных зависимостей.

7. Выводы.

8. Номер индивидуального задания, содержание задания и эскиз детали.

9. Расчеты и другие материалы в соответствии с п. 11 раздела «Последовательность выполнения работы». Эскиз заготовки после плазменной резки, поступающей на механическую обработку.

10. Приложения.

Приложение 1. Презентация расчетов и графических зависимостей, выполненных с помощью вычислительной программы MathCad.

Приложение 2. Протокол измерений (по далее приведенной форме).

Приложение 2

**ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ**  
**К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ «ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И**  
**ТОЧНОСТЬ ПЛАЗМЕННО-ВОЗДУШНОЙ РЕЗКИ ПЛАЗМОТРОНОМ ПВР-402»**

Группа \_\_\_\_\_

Дата проведения эксперимента « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201 \_\_\_\_ г.

**1. Условия проведения эксперимента**

1.1. Оборудование: \_\_\_\_\_

1.2. Плазмотрон, его характеристики: \_\_\_\_\_

1.3. Плазмообразующий газ: \_\_\_\_\_

1.4. Материал и размеры заготовки: \_\_\_\_\_

1.5. Режим резки

Таблица П2.1

Режим резки	Номер реза					
	1	2	3	4	5	6
$\vartheta_p$ , м/с	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$		
$I_{O_2}$ , А	250			200	300	250

7. Измерительные инструменты и приборы: \_\_\_\_\_

---

**2. Таблица измерений**

Таблица П2.2

Результаты измерения параметров плазменных резов

Номер реза	$b_1$ , мм			$\bar{b}_1$	$b_2$ , мм			$\bar{b}_2$	$Rz$ , мкм
	Номер измерения				Номер измерения				
	1	2	3	1	2	3			
1									
2									
3									
4									
5									
6									

Таблица П2.3

Результаты измерения размеров зоны термического влияния

Номер измерения	$h_{зтв}$ , мм					
	1	2	3	4	5	6
1						
2						
3						
Среднее значение						

Студент(ка)

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Преподаватель

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА СТОЙКОСТИ ПОРЦИИ ПОРОШКА НА ОПЕРАЦИИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

**Цель работы:** знание основных закономерностей процесса магнитно-абразивной обработки и методики их нахождения; умение устанавливать экспериментальным методом период стойкости порции магнитно-абразивного порошка и основного времени обработки для условий конкретной технологической операции.

### Основные положения

Магнитно-абразивная обработка является разновидностью методов отделочно-зачистной обработки, предназначенных для решения таких технологических задач, как удаление с поверхностей заготовок покрытий, окраски, ржавчины или дефектных слоев; полирование поверхностей с достижением высоких требований по шероховатости; округление кромок и удаление заусенцев.

Режущим инструментом при магнитно-абразивной обработке является магнитно-абразивный порошок (далее для краткости – «порошок»), зерна которого обладают одновременно абразивными и магнитными свойствами. Порошок порционно засыпают в рабочую зону – межполюсное пространство магнитного индуктора – при смене заготовки или периодически в ходе операции при обработке больших поверхностей.

Обработка поверхности происходит следующим образом. Магнитное поле удерживает порошок в рабочей зоне, участвует в создании сил, необходимых для абразивного резания обрабатываемой поверхности, активизирует действие химических и поверхностно активных добавок в составе смазывающе-охлаждающей жидкости, предразрушающих обрабатываемую поверхность и существенно повышающих производительность на завершающих операциях.

Для удаления припуска зерна порошка и обрабатываемая поверхность должны перемещаться друг относительно друга. С этой целью на установке магнитно-абразивной обработки, используемой в лабораторной работе (рис. 7.1), заготовке 2 сообщают вращение  $D_2$ , движение подачи  $D_s$  вдоль рабочей зоны между полюсами 3 и осцилляцию  $D_{oc}$  вдоль собственной оси с частотой  $n_{oc}$  и амплитудой  $A_{oc}$ . Заготовка закреплена с помощью оправки 1 на шпинделе установки.

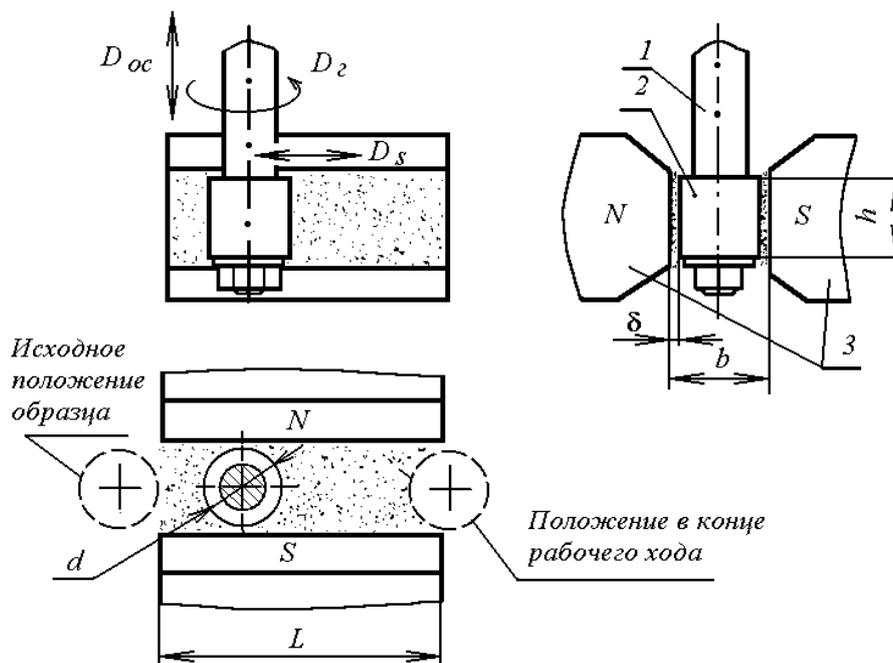


Рис. 7.1. Схема магнитно-абразивной обработки

При проектировании технологических операций магнитно-абразивной обработки ряд условий их выполнения может быть определен лишь с помощью заранее проведенного производственного эксперимента. Применительно к указанным ранее операциям одним из таких условий является период стойкости  $T$  порции магнитно-абразивного порошка. Под термином «период стойкости» здесь, по аналогии с режущим лезвийным инструментом, будем понимать время работы порции порошка между ее периодическими заменами.

Режущие свойства абразивного порошка принято оценивать удельным съемом материала  $q$ ,  $\text{г/см}^2$ , с единицы площади  $S$  обрабаты-

ваемой поверхности за определенный промежуток времени  $\tau$ , мин. Удельный съём вычисляют по формуле

$$q = \frac{m_1 - m_2}{S}, \quad (7.1)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  — масса заготовки (или опытного образца) до и после обработки.

В тех случаях, когда целью магнитно-абразивной обработки является полирование поверхности заготовки, результаты операции оценивают удельным съёмом и достигнутой шероховатостью, которые при увеличении длительности обработки  $\tau$  характеризуются зависимостями  $q = f(\tau)$  и  $Ra = f(\tau)$ . Типичные формы графиков этих зависимостей показаны на рис. 7.2.

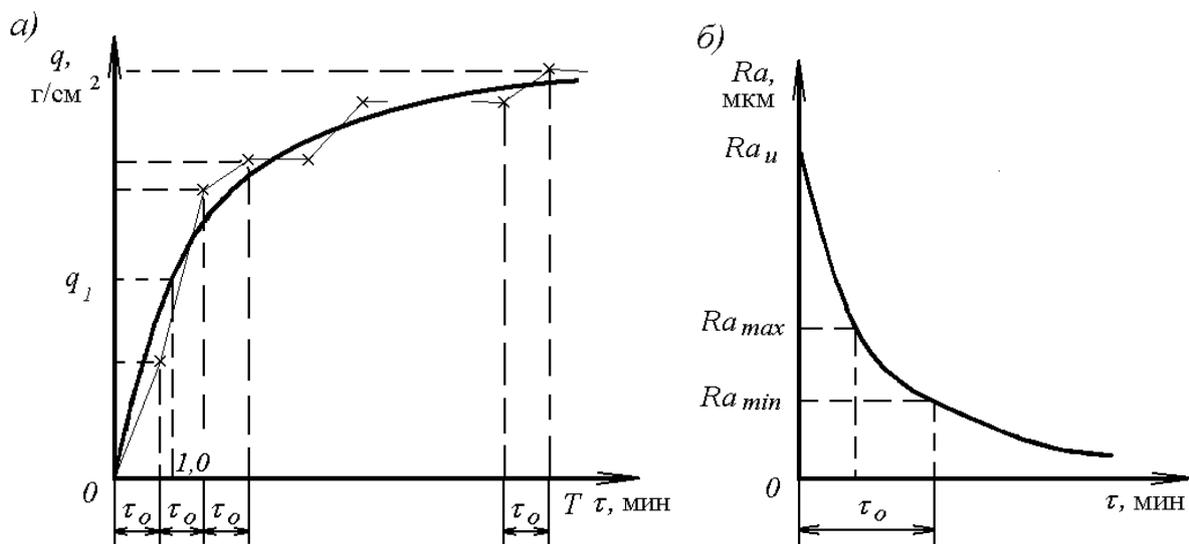


Рис. 7.2. Графики зависимостей удельного съема (а) и шероховатости поверхности (б) от длительности магнитно-абразивной обработки

Зависимость  $q = f(\tau)$  (рис. 7.2, а) отражает изменение режущих свойств порции порошка по мере увеличения длительности  $\tau$  ее работы при обработке партии заготовок. Длительность (основное время) обработки одной заготовки на рисунке обозначена символом  $\tau_0$ . Как видно из графика, суммарный удельный съём  $q$  по мере увеличения количества обработанных заготовок растет, в то время как удельный съём материала с каждой следующей заготовкой уменьшается. Умень-

шение съема происходит из-за снижения режущих свойств порции магнитно-абразивного порошка, вызываемого притуплением абразивных частиц в составе композиционных зерен порошка, отделения их от ферромагнитной составляющей, насыщения порошка шламом и вязкими компонентами СОЖ, а также из-за частичного выбрасывания порошка из рабочей зоны.

Зависимость  $q = f(\tau)$  носит степенной характер с показателем степени  $\beta_1 < 1$ , зависящим от условий обработки:

$$q = q_1 \cdot \tau^{\beta_1}, \quad (7.2)$$

где  $q_1$  — удельный съём материала за первую минуту обработки, г/(см<sup>2</sup>·мин).

Зависимость  $Ra = f(\tau)$ , представленная на рис. 7.2, б характеризует изменение шероховатости обрабатываемой поверхности с увеличением основного времени  $\tau$  на магнитно-абразивной операции. Полирование методом магнитно-абразивной обработки наиболее эффективно, если поверхность предварительно обработана шлифованием или тонким точением с шероховатостью  $Ra_u = 0,63 \dots 1,25$  мкм, которую будем называть исходной. В этом случае после операции магнитно-абразивной обработки полученная шероховатость может варьироваться в диапазоне  $Ra_k = 0,02 \dots 0,32$  мкм.

Удаление припуска на операциях магнитно-абразивной обработки сопровождается сначала быстрым (1 этап), а затем замедляющимся (2 этап) снижением шероховатости поверхности (рис.7.2, б) в соответствии с зависимостью

$$Ra_\tau = Ra_u \cdot e^{\beta_2 \tau}, \quad (7.3)$$

где  $e$  — основание натурального логарифма;  $\beta_2$  — показатель степени, зависящий от условий обработки ( $\beta_2 < 0$ ).

На этапе 1 быстро удаляется исходная шероховатость. На втором этапе формируется шероховатость, параметры которой зависят от режима магнитно-абразивной обработки, свойств обрабатываемого материала и характеристик порошка.

Параметры  $q_1$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  для формул (7.2) и (7.3) находят с помощью эксперимента при проектировании каждой новой технологической операции.

Чтобы получить на всех заготовках из партии шероховатость в заданном интервале значений  $Ra_{min} \dots Ra_{max}$ , необходимо удалить с поверхности каждой заготовки за время  $\tau_0$  припуск, соответствующий удельному съёму в интервале значений от  $q_2$  до  $q_3$  (рис. 7.3).

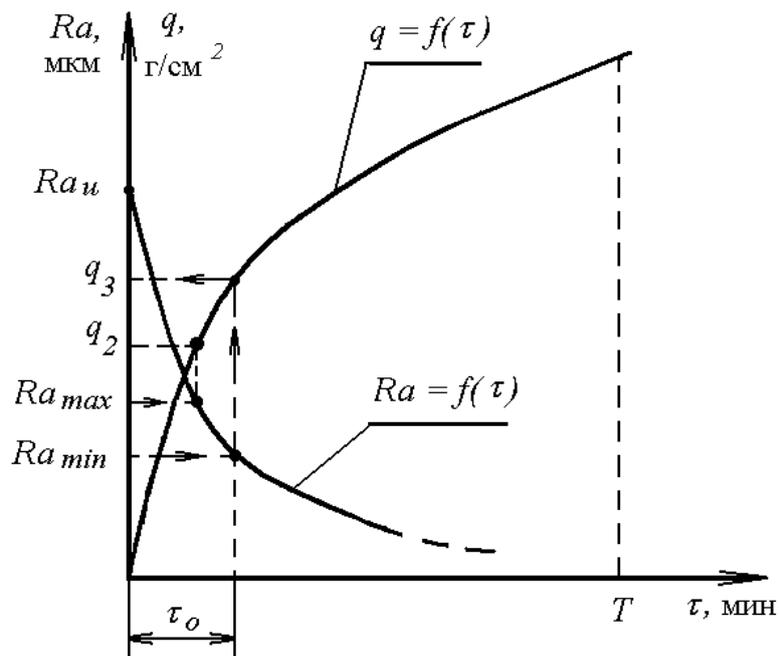


Рис. 7.3. Совмещенные графики зависимостей шероховатости поверхности  $Ra$  и удельного съема  $q$  материала от длительности работы порции порошка

Основное время  $\tau_0$  для проектируемой операции определяют по длительности обработки первой заготовки в порции порошка, когда достигнут нижний предел  $Ra_{min}$  заданного интервала получаемой шероховатости. При этом удельный съём должен соответствовать значению  $q_3$ . При обработке последующих заготовок режущая способность порции порошка будет постепенно снижаться, а высота микронеровностей на поверхности каждой следующей обработанной заготовки будет увеличиваться из-за снижения удельного съема. Одну и ту же порцию порошка можно использовать до тех пор, пока на некоторой

$k$ -ой заготовке значение удельного съема не достигнет значения  $q_2$ , при котором шероховатость соответствует верхнему пределу  $Ra_{max}$  заданного интервала.

Период стойкости  $T$  порции порошка вычисляют по формуле

$$T = \left( \frac{q_1}{q_2} \cdot \tau_o \cdot \beta_1 \right)^{\frac{1}{1-\beta_1}} \quad (7.4)$$

Для использования формулы (7.4) нужно для проектируемой операции с помощью эксперимента узнать параметры  $q_1$ ,  $\beta_1$ ,  $\tau_o$  и удельный съем  $q_2$ , при котором достигается верхняя граница  $Ra_{max}$  заданного интервала конечной шероховатости.

Число заготовок  $k$ , обрабатываемых в одной порции порошка с выполнением заданных требований по шероховатости, будет равно

$$k = T / \tau_o \quad (7.5)$$

Значение  $k$  удобно использовать в производственных условиях взамен периода стойкости порции порошка  $T$ . После обработки  $k$ -ой заготовки производят замену порошка в рабочей зоне.

## Содержание работы

Работа предусматривает проведение эксперимента по определению математических зависимостей шероховатости обработанной поверхности и удельного съема материала от времени обработки, статистическую обработку результатов экспериментов, вывод формулы стойкости магнитно-абразивного порошка, выполнение индивидуального задания и составление отчета.

## Наладка станка на выполнение эксперимента

Лабораторный эксперимент выполняется на универсально-фрезерном станке модели 675, модернизированном для магнитно-абразивной обработки по схеме, представленной на рис. 7.1. Заготовками в эксперименте служат втулки из Стали 45, НРС<sub>3</sub>, 41–43 с наружной цилиндрической поверхностью, полученной предваритель-

ным шлифованием или тонким точением с шероховатостью  $Ra_u = 0,63 \dots 1,25$  мкм.

Магнитно-абразивная обработка выполняется с использованием СОЖ, являющейся 5 %-ным раствором эмульсола в воде, и магнитно-абразивного порошка марки Ж15КТ (TiC – 15 %, Fe – 85 %) зернистостью 160...315 мкм при окружной скорости обрабатываемой поверхности  $v = 1,0 \dots 1,2$  м/с и подаче  $S_m = 60 \dots 80$  мм/мин.

При наладке станка нужно выполнить следующие действия:

- измерить наружный диаметр  $d$  и длину  $h$  (см. рис. 7.1) одной заготовки из подготовленных для эксперимента партии заготовок;
- установить ширину рабочей зоны  $b$  (см. рис. 7.1), рассчитав её по формуле

$$b = d + 2\delta, \quad (7.6)$$

где  $\delta$  — рабочий зазор между обрабатываемой поверхностью и полюсом индуктора  $\mathcal{Z}$ , принимаемый равным 1,5 мм;

- закрепить заготовку в шпинделе станка с помощью специальной оправки  $I$ ;

– наладить одинаковые рабочие зазоры  $\delta$  с обеих сторон заготовки, для установки требуемых зазоров в работе используется щуп из немагнитного материала;

- с помощью графика зависимости  $I = f(b)$ , имеющегося на рабочем месте, определить рабочее значение силы тока  $I_p$  в намагничивающих катушках магнитного индуктора, обеспечивающее магнитную индукцию  $B = 1,0$  Тл на полюсах индуктора;

– включить электрическую схему питания магнитного индуктора и с помощью автотрансформатора и амперметра установить предварительное значение силы тока  $I_{np} = 0,1 I_p$ , достаточное для удерживания порошка в рабочей зоне;

- рассчитать объём порции порошка по формуле

$$V_n = 1,3 \cdot b \cdot h \cdot L, \quad (7.7)$$

где  $b, h, L$  — размеры рабочей зоны (см. рис. 7.1);

– засыпать рассчитанную порцию порошка в рабочую зону, используя мерную емкость из немагнитного материала, и равномерно распределить порошок в рабочей зоне;

– наладить на станке частоту вращения шпинделя, рассчитав ее для окружной скорости заготовки в диапазоне  $\mathcal{V} = 1,0 \dots 1,3$  м/с;

– установить на станке значение продольной подачи  $S_m = 82$  мм/мин;

– установить по амперметру полное рабочее значение силы тока  $I_p$  в намагничивающих катушках индуктора;

– включить полив СОЖ, направив струю на закрепленную в шпинделе станка заготовку.

### **Последовательность выполнения и обработки результатов эксперимента**

1. Изучите физические основы и технологические характеристики магнитно-абразивной обработки.

2. Проследите за наладкой станка учебным мастером для выполнения магнитно-абразивной обработки заготовки на режиме обработки, указанном в предыдущем разделе.

3. Получите у учебного мастера заготовку № 1 из партии заготовок, подготовленных для магнитно-абразивной обработки, и выполните измерения:

– длины  $h$  и диаметра  $d$  — микрометром;

– исходной шероховатости цилиндрической поверхности – профилометром MarSurf PS1;

– массы образца – на аналитических весах АДВ–200 с точностью до третьего знака после запятой (в граммах).

Исходные условия обработки и результаты измерений занесите в таблицу П1 протокола измерений, форма которого представлена в разделе «Содержание отчета».

4. Установите совместно с учебным мастером заготовку № 1 на шпинделе станка и выполните ее обработку в течение 0,5 минут.

Снимите заготовку с оправки, произведите ее размагничивание на демагнетизаторе и тщательно протрите, удалив остатки СОЖ, порошка и ворсинки.

5. Проведите измерения диаметра заготовки, шероховатости цилиндрической поверхности и массы с помощью приборов, указанных в п. 3. Результаты измерений занесите в протокол измерений данной работы (табл. П2).

6. Осуществите действия, аналогичные указанным в пунктах 4 и 5, обработав этот же образец сначала в течение 2,5 минут, а затем 2 минут, повторяя каждый раз измерения. Занесите результаты всех измерений в протокол измерений (таблица П2).

7. Постройте график зависимости  $Ra = f(\tau)$ . Укажите на графике экспериментальные точки, соедините их тонкими линиями и нанесите зрительно аппроксимирующую кривую, используя рекомендации, представленные в разделе «Обработка экспериментальных данных».

8. Рассчитайте методом наименьших квадратов коэффициент  $\beta_2$  аппроксимирующей функции  $Ra = f(\tau)$ . Напишите уравнение искомой зависимости  $Ra_\tau = Ra_0 a^{\beta_2 \tau}$ . При определении параметров функции  $Ra = f(\tau)$  примите значение  $Ra_u$  соответствующее значению, указанному в табл. П1 при  $\tau = 0$ .

9. Получите от учебного мастера четыре образца (втулки) №№ 2–5, предварительно обработанных методом магнитно-абразивной обработки на таком же режиме, что и заготовка № 1, и с исходного диаметра  $d_u$ , равного диаметру этой заготовки. Последовательность обработки образцов соответствует их номерам, замаркированным на торцах. Считайте, что первым номером в партии заготовок является экспериментально обработанная заготовка, по результатам измерения которой в процессе обработки (табл. П2 протокола измерений) построен график и выведена зависимость  $Ra = f(\tau)$ .

Время обработки каждого из образцов равно времени обработки заготовки № 1, т. е. 5 минутам.

10. Измерьте массу каждого образца партии на аналитических весах АДВ–200 с точностью до третьего знака после запятой (в граммах). Результаты измерений занесите в таблицу ПЗ протокола измерений данной работы.

11. Рассчитайте площадь  $S$  обрабатываемой поверхности заготовок и значения удельного съема  $q_i$  для каждого образца, где  $i$  – номер образца. Полученные значения занесите в табл. 7.1.

12. Рассчитайте суммарные значения удельного съема  $q_{\Sigma i}$  при последовательной обработке образцов партии по формуле

$$q_{\Sigma i} = \sum_{i=2}^i q_i \cdot \quad (7.8)$$

Таблица 7.1

Расчетные значения удельного съема партии заготовок

Номер образца	$S$ , см <sup>2</sup>	$m_u$ , г	$m_i$ , г	$\Delta m$ , г	$q_i$ , г/см <sup>2</sup>	$q_{\Sigma i}$ , г/см <sup>2</sup>
1						
2						
3						
4						
5						

13. Постройте график зависимости  $q_{\Sigma} = f(\tau)$ , подобный графику, представленному на рис. 7.2, а. Нанесите на график линии, соединяющие экспериментальные точки, и аппроксимирующую кривую.

14. Используя метод наименьших квадратов и формулы (3) и (4) (см. раздел «Обработка экспериментальных данных»), рассчитайте коэффициенты  $q_1$  и  $\beta_1$  аппроксимирующей функции  $q = q_1 \cdot \tau^{\beta_1}$ . Напишите уравнение полученной математической модели.

15. Получите от преподавателя индивидуальное задание (табл. 7.2) на выполнение расчетов по определению стойкости магнитно-абразивного порошка  $T$  и числа заготовок, которые можно обработать одной порцией порошка  $k$  по данным, приведенным в табл. 7.1. Для этого:

15.1. Нанесите на ось  $Ra$  экспериментально полученного графика  $Ra = f(\tau)$  указанные в индивидуальном задании значения  $Ra_{min}$  и  $Ra_{max}$ , далее по примеру, показанному на рис. 7.2, б найдите значение длительности обработки заготовки  $\tau_0$ , необходимое для достижения нижнего заданного значения параметра  $Ra$ .

15.2. Определите удельный съём материала  $q_2$ , при превышении которого шероховатость поверхности превысит на обработанных образцах значение, превышающее  $Ra_{max}$ , следующим образом:

– на оси ординат  $Ra$  построенного Вами графика  $Ra = f(\tau)$  отметьте заданное значение верхнего предела  $Ra_{max}$ ;

– из этой точки проведите горизонтальную линию до пересечения с кривой  $Ra = f(\tau)$ , а оттуда — вертикальную линию до пересечения с осью  $\tau$ , численное значение этой точки будет соответствовать времени, которое обеспечивает удельный съём равный  $q_2$ ;

– подставьте найденное значение  $\tau = \tau_0$  в математическую зависимость  $q = f(\tau)$  и определите значение  $q_2$ .

15.3. Рассчитайте период стойкости порции порошка  $T$  по формуле (7.4), используя ранее найденные параметры функции  $\beta_1, \beta_2, q_1, q_2, \tau_0$  и определите по формуле (7.5) число заготовок  $k$ , которое можно обработать одной порцией магнитно-абразивного порошка.

Таблица 7.2

### Индивидуальные задания

Номер задания	$Ra$ , мкм		Номер задания	$Ra$ , мкм	
	min	max		min	max
1	0,080	0,100	9	0,040	0,050
2	0,020	0,025	10	0,063	0,100
3	0,250	0,320	11	0,125	0,200
4	0,040	0,05	12	0,040	0,080
5	0,080	0,125	13	0,080	0,160
6	0,032	0,050	14	0,020	0,032
7	0,020	0,025	15	0,050	0,080
8	0,100	0,160	16	0,063	0,010

### Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель и задачи проведения эксперимента.
3. Условия проведения эксперимента: оборудование, данные о применяемых приборах, материале и размерах заготовок, СОЖ, магнитно-абразивном порошке, размерах рабочей зоны, условиях и режиме магнитно-абразивной обработки.
4. Таблица результатов измерения параметров необработанного образца № 1 (по форме табл. П1 протокола измерений).
5. Результаты измерения диаметра  $d$ , шероховатости цилиндрической поверхности по параметру  $Ra$  и массы  $m$  первого образца при его обработке (по форме таблицы П2 протокола измерений).
6. График зависимости  $Ra = f(\tau)$  (по форме рис. 1).
7. Расчет коэффициента  $\beta_2$  функции  $Ra = Ra_0 \cdot a^{-\beta_2 \tau}$  методом наименьших квадратов.
8. Графическое и математическое определение времени обработки  $\tau_0$  заготовки для индивидуального задания.
9. Результаты измерения массы обработанных образцов партии из 5 деталей (в форме таблицы П3 протокола измерений).
10. Расчет площади обработанной поверхности заготовки  $S$ .
11. Расчет удельных съемов  $q_i$ . Представление результатов расчетов в форме табл. 7.1.
12. График зависимости  $q_{\Sigma} = f(\tau)$ .
13. Расчет методом наименьших квадратов неизвестных коэффициентов  $q_1$  и  $\beta_1$  и получение аппроксимирующей функции  $q_{\Sigma} = q_1 \cdot \tau^{\beta_1}$ .
14. Определение значения удельного съема  $q_2$  расчетным и графическим методами, их сопоставление.
15. Расчет периода стойкости  $T$  порошка и числа заготовок  $k$ , которые можно обработать в одной порции порошка.
16. Выводы.
17. Приложение. Протокол измерений (по далее приведенной форме).

**ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ  
К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА  
СТОЙКОСТИ ПОРЦИИ ПОРОШКА НА ОПЕРАЦИИ  
МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ»**

Группа \_\_\_\_\_

Дата проведения эксперимента « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201 \_\_\_\_ г.

**1. Условия проведения эксперимента**

1.1. Оборудование: \_\_\_\_\_

1.2. Магнитно-абразивный порошок: марка, характеристики: \_\_\_\_\_

1.3. СОЖ: \_\_\_\_\_

1.4. Партия экспериментальных образцов, штук \_\_\_\_\_

1.5. Материал заготовки № 1 \_\_\_\_\_

1.6. Исходные параметры заготовки № 1

Таблица П1

Исходные параметры заготовки № 1

$\ell$ , мм	$d_u$ , мм			$\bar{d}_u$	$Ra_u$ , мкм			$\overline{Ra}_u$	$m_u$ , г			$\bar{m}_u$
	Номер измерения				Номер измерения				Номер измерения			
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	

1.7. Режим магнитно-абразивной обработки: \_\_\_\_\_

1.8. Измерительные инструменты и приборы: \_\_\_\_\_

**2. Таблицы измерений**

Таблица П2

Параметры заготовки № 1

Время обработки, $\tau$ , мин	$d$ , мм			$\bar{d}$	$Ra$ , мкм			$\overline{Ra}$	$m$ , г			$\bar{m}$
	Номер измерения				Номер измерения				Номер измерения			
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
0,5												
3,0												
5,0												

Таблица П3

Параметры обработанных заготовок (образцов)

Номер образца	$d$ , мм			$\bar{d}$	$Ra$ , мкм			$\overline{Ra}$	$m$ , г			$\bar{m}$
	Номер измерения				Номер измерения				Номер измерения			
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
1												
2												
3												
4												
5												

Студент(ка)

Преподаватель

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## 8. ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ НА УЛЬТРАЗВУКОВОМ СТАНКЕ МОДЕЛИ УЗСК-1

**Цель работы:** знания физических основ ультразвуковой размерной обработки свободными абразивными зернами (УЗАО), основных закономерностей процесса ультразвукового прошивания отверстий, назначения и устройства ультразвукового станка УЗСК–1; умения устанавливать возможность и целесообразность использования ультразвуковой обработки заготовок, определять производительность и точность ультразвукового прошивания отверстий.

### Физические основы ультразвуковой обработки

Сущность ультразвуковой обработки состоит в том, что материал обрабатываемой заготовки 1 (рис. 8.1) разрушается абразивными зернами 2 под действием ударов инструмента 3, прижатого к ним с небольшой статической силой  $P_{ст} = 20–400$  Н и колеблющегося в абразивной суспензии с ультразвуковой частотой  $f$  (от 16 до 40 кГц) и амплитудой  $A_k$  (10...70 мкм). Это колебательное движение инструмента является главным движением  $D_2$  при ультразвуковой обработке.

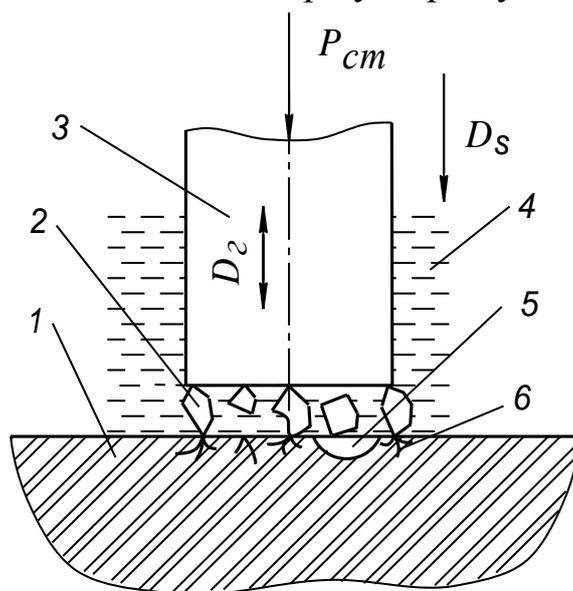


Рис. 8.1. Схема ультразвуковой обработки

Зерна абразивной суспензии производят микросколы поверхностных участков заготовки 5. Под действием их ударов в поверхностных слоях заготовки, непосредственно под инструментом, развиваются трещины, которые, сливаясь, приводят к отделению частиц обрабатываемого материала 6. Для продолжения обработки инструмент постепенно движением подачи  $D_s$  углубляется в обрабатываемый материал, копируя в последнем свою форму.

Отделившаяся частица материала дробится в рабочем зазоре под действием соударений с инструментом и абразивными частицами. Абразивные частицы, находящиеся в рабочем зазоре, тоже дробятся, что приводит к снижению эффективности обработки. Поэтому суспензия в рабочем зазоре должна непрерывно обновляться. Это достигается за счет интенсивного перемешивания суспензии ультразвуковыми колебаниями (при малой площади инструмента и отверстиях небольшой глубины) или периодическим подъемом инструмента за счет его колебаний с большей амплитудой (до 0,5 мм) и малой частотой (до 100 Гц).

Абразивные зерна вводятся в рабочую зону при помощи сопла в виде водной суспензии. В ультразвуковой обработке может также быть принята схема, при которой вся заготовка и рабочий участок инструмента погружаются в ванну с абразивной суспензией.

Сообщая инструменту и заготовке различные виды подачи (продольную, поперечную) и меняя профиль сечения инструмента, можно прошивать глухие и сквозные отверстия, обрабатывать плоскости, углубления, пазы методами прямого и обратного копирования.

Источник ультразвуковых колебаний инструмента включает ультразвуковой генератор (УЗГ) и колебательную систему, нагрузкой которой является рабочий инструмент или технологическая среда. УЗГ преобразует электрический ток промышленной частоты в ток ультразвуковой частоты, предназначенный для питания колебательной системы. Сама система состоит из магнитострикционного преобразователя 2, концентратора 4 и ультразвукового инструмента 5 (рис. 8.2). Все элементы колебательной системы должны быть жестко соединены между собой, что достигается пайкой или с помощью резьбовых соединений. Ультразвуковой инстру-

мент может изготавливаться совместно с концентратором или отдельно от него.

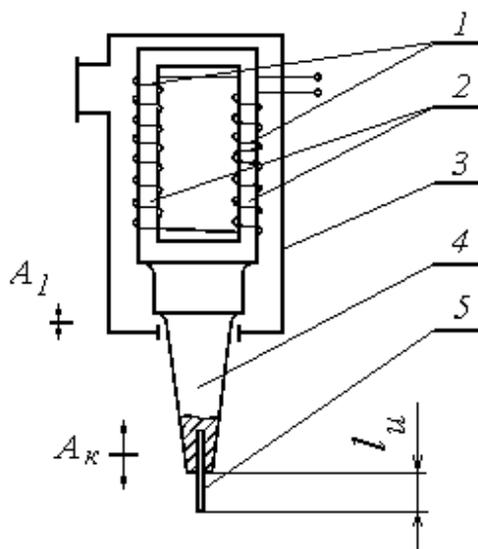


Рис. 8.2. Схема устройства магнитострикционного преобразователя

Магнитострикционный преобразователь осуществляет преобразование электрической энергии в энергию механических колебаний за счет эффекта магнитострикции. Преобразователь представляют собой сердечник из магнитострикционного материала с обмоткой. В магнитострикционном преобразователе используется свойство ферромагнитных материалов изменять в магнитном поле свои размеры вдоль магнитных линий в зависимости от напряженности поля. Эффектом магнитострикции обладают никель, ферриты, железоалюминиевые сплавы, железоникелевые сплавы, ряд титановых сплавов.

Как правило, магнитострикционные преобразователи изготавливают из пакета тонких пластин, склеенных или механически стянутых между собой. Пакет пластин припаивают к концентратору или к промежуточной детали. Толщина пластин преобразователя составляет 0,1–0,2 мм. На сердечник 2 (см. рис. 8.2), собранный из таких пластин, накладывают две электрические обмотки 1, которые запитываются от генератора тока ультразвуковой частоты. Сердечник при этом колеблется с той же частотой и амплитудой  $A_1$ . Значение этой амплитуды, как правило, не превышает 3–4 мкм, что недостаточно для осуществления обработки.

Для увеличения амплитуды колебаний на сердечнике закрепляют резонансный волновод переменного поперечного сечения 4, называемый концентратором. Концентратор является трансформатором упругих колебаний. Он осуществляет передачу ультразвуковых колебаний от преобразователя к инструменту с увеличением значения амплитуды колебаний  $A_k$  до 60...80 мкм. Концентратор рассчитывают таким образом, что максимум амплитуды колебаний ( $A_k$ ) приходится на закрепленный на нем рабочий инструмент 5.

Эффективность трансформации ультразвукового концентратора оценивают с помощью коэффициента усиления амплитуды колебаний  $k_A$ . К примеру, при соотношении диаметров входного (большой диаметр) и выходного (меньший диаметр) торцов конического концентратора равно 3 коэффициент усиления  $k_A = 2,5$ . Длина концентратора должна быть при этом кратна целому числу полувольт.

Магнитострикционный сердечник смонтирован в кожухе 5, сквозь который для охлаждения прокачивается вода или продувается воздух.

### **Режим, качество и точность ультразвуковой абразивной обработки**

**Абразивная суспензия.** Абразивная суспензия при УЗАО содержит 20...40 % абразивного материала (массовое содержание); остальными компонентами являются вода и 1...2 % ингибитора коррозии – азотистокислого натрия  $\text{NaNO}_2$ .

Для ультразвуковой обработки в качестве абразива обычно применяют карбид бора ( $\text{B}_4\text{C}$ ), который хорошо смачивается водой и благодаря сравнительно небольшой плотности удовлетворительно переносится из одной области суспензии в другую. Другие абразивные материалы, такие как карбид кремния ( $\text{SiC}$ ), электрокорунд ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), применяют лишь для изготовления деталей из тех материалов, которые хорошо обрабатываются ультразвуком, например, стекла и германия.

Если производительность обработки стекла карбидом бора принять за единицу, то производительность его обработки карбидом

кремния будет составлять 0,8...0,85 от этой производительности, а при обработке электрокорундом — 0,7...0,75.

Параметры ультразвуковой обработки существенно зависят от среднего размера зерен абразива (под размером зерна понимают диаметр зерна основной фракции  $d_a$ ). Размеры зерен основных используемых шлифпорошков и микрошлифпорошков приведены в таблицах 8.1 и 8.2.

Таблица 8.1

Размеры абразивных зерен шлифпорошков

Зернистость	Размер, мкм	
	наибольший	наименьший
12	160	125
10	125	100
8	100	80
6	80	63

Таблица 8.2

Размеры абразивных зерен микрошлифпорошков

Зернистость	Размер, мкм		Зернистость	Размер, мкм	
	max	min		max	min
M63	63	50	M14	14	10
M50	50	40	M10	10	7
M40	40	28	M7	7	5
M28	28	20	M5	5	3
M20	20	14	M3	3	1

**Производительность УЗАО** свободными абразивными зернами  $\Pi$  принято оценивать в линейных  $\Pi_\ell$  (мм/мин) или объемных  $\Pi_V$  (мм<sup>3</sup>/мин) единицах. Она зависит от амплитуды  $A_k$  и частоты колебаний  $f$  инструмента, вида и величины зерен абразива (зернистости), состава и свойств абразивной суспензии, силы статического прижима инструмента  $P_{ст}$ , площади поперечного сечения инструмента и глубины обработки  $\ell$ , свойств обрабатываемого материала.

Материал заготовки в значительной степени определяет производительность и стабильность процесса УЗАО. Чем более хрупок об-

рабатываемый материал, тем выше производительность его обработки. Это связано с тем, что при ультразвуковой абразивной обработке пластичных материалов зерна суспензии производят многократную пластическую деформацию поверхностных слоев заготовки, а отделения частиц материала не происходит.

Для оценки степени хрупкости материала используют такие показатели, как твердость материала  $HV$ , величину относительного удлинения образца при испытании на разрыв,  $\delta$ , %, ударную вязкость материала  $KC$ ; соотношение пределов прочности материала на разрыв  $\sigma_{вр}$  и на сжатие  $\sigma_{сж}$  и ряд других. Чем большую твердость имеет материал, чем меньшие значения имеют относительное удлинение образца при растяжении  $\delta$  и ударная вязкость образца, тем более хрупким считается материал. К хрупким материалам относят и материалы, у которых значение коэффициента  $k_x = \sigma_{вр} / \sigma_{сж}$  менее 1,0.

Все материалы по этим характеристикам и виду разрушения при ультразвуковой обработке делят на три группы. К материалам первой группы относят: стекло, кварц, ситаллы, керамика, германий, кремний, ферриты. При ультразвуковой обработке эти материалы практически не подвергаются пластической деформации, и основную часть всей работы диспергирования занимает работа упругих деформаций.

Во вторую группу входят: твердые сплавы, закаленные, цементированные и азотированные стали, титановые сплавы, вольфрам. При их обработке под действием абразивных зерен наряду с упругими деформациями происходят и микроскопические пластические деформации. Чем большую роль играют пластические деформации, тем хуже обрабатываемость материала ультразвуковым методом. Наилучшие характеристики по обрабатываемости из этой группы материалов имеют металлокерамические твердые сплавы.

При обработке материалов третьей группы, к которой относят мягкие стали, свинец, медь и близкие по свойствам материалы, почти вся работа абразивных зерен расходуется на микропластическую деформацию поверхностных слоев. В таких случаях разрушения мате-

риала почти не наблюдается. Поэтому заготовки из материалов третьей группы методом ультразвуковой обработки не обрабатывают.

Представленное деление материалов на пластичные и хрупкие является довольно условным, поскольку при разных условиях нагружения многие хрупкие материалы способны вести себя как пластичные, а пластичные – как хрупкие. Значения объемной производительности  $P_v$  и относительной обрабатываемости ряда широко используемых материалов приведены в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Показатели обрабатываемости материалов методом ультразвуковой размерной абразивной обработки

Обрабатываемый материал	Производительность, $P_v$ , мм <sup>3</sup> /мин	Относительная обрабатываемость
Стекло	5–20	1,0
Ферриты	3-8	0,8
Кремний	3-8	0,4–0,7
Кварц	2,5–10	0,5
Германий	3-8	0,3–0,6
Керамика	2–8	0,4
Сталь	0,05–0,1	0,01–0,02
Твердый сплав (ВК8)	0,1–1,0	0,02–0,05

Выполняемые в данной лабораторной работе эксперименты ставят целью определение производительность ультразвуковой абразивной обработки ряда материалов первой группы. Для сравнительной оценки влияния вышеперечисленных показателей хрупкости материалов на производительность обработки в табл. 8.4 приведен ряд характеристик используемых материалов этой группы. Широкие диапазоны изменений ряда механических характеристик некоторых материалов связаны с наличием широкой номенклатуры марок этих материалов, используемых в промышленности. В связи с этим при проведении экспериментов следует ориентироваться на показатели используемых марок материала, которые следует устанавливать по данным соответствующих ГОСТ или других нормалей.

Таблица 8.4

## Сопоставительные характеристики хрупких материалов

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_{сж}$ , МПа	$\sigma_p$ , МПа	$k_x$
Гранит	2700–2800	150–250	3–5	0,02
Бетон тяжелый	2600–2900	10–50	1–4	0,1
Кирпич ке- рамический	2600–2900	7,5–30	1,8–4,4	0,15–0,2
Стекло	2500	500–800	25–100	0,06
Мрамор	2500–2800	50–250		0,065
Фарфор	2200–2400	450–550	40	0,08

На производительность ультразвуковой обработки влияет и концентрация абразива в суспензии. При оптимальной концентрации по всей обрабатываемой поверхности в рабочей зоне должен укладываться один слой зерен абразива.

Линейную производительность УЗАО можно рассчитать по эмпирической формуле

$$P_\ell = k (A_k^2 \cdot P_{cm})^x \cdot f^y, \quad (8.1)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала и абразивной жидкости;  $x = 0,5...1$  и  $y = 0,5...1$  – степенные показатели, зависящие от условий обработки;

$A_k$  – максимальная амплитуда колебаний, мм;

$P_{cm}$  – сила подачи (сила статического прижима инструмента), Н,

$f$  – частота колебаний ультразвукового инструмента, Гц.

Амплитуда колебаний инструмента определяет скорость главного движения  $D_e$  – максимальную скорость линейного перемещения рабочего торца инструмента  $\mathcal{G}$ , м/с:

$$\mathcal{G} = 4f \cdot A_k / 10^3. \quad (8.2)$$

Увеличение скорости главного движения путем увеличения частоты колебаний инструмента или его амплитуды способствует увеличению производительности обработки. Однако увеличивать эти пара-

метры колебаний можно только до определенного предела, ограниченного усталостной прочностью материала инструмента и концентратора.

На производительность обработки влияет также твердость и размер абразивных зерен  $d_a$ . Чем выше твердость абразива и размер зерен, тем больше съём материала и производительность обработки. Наибольшая производительность ультразвуковой обработки достигается при выполнении следующего условия:

$$\frac{2A_k}{d_a} = 0,6 \dots 0,8, \quad (8.3)$$

где  $d_a$  – размер абразивного зерна основной фракции.

Наличие в условии оптимизации обработки параметров  $A_k$  и  $d_a$  связано с тем, что при очень малых размерах зерна и при больших амплитудах колебаний ( $2A_k / d_a > 1$ ) происходит, главным образом, не внедрение зерен в обрабатываемую поверхность, а их дробление. Если же амплитуда колебаний мала, а зерна абразива крупные ( $2A_k / d_a < 0,5$ ), импульс ударной силы, воздействующий на зерно, недостаточен для внедрения зерен в обрабатываемый материал и разрушения материала.

Сила подачи  $P_{cm}$  также влияет на эффективность обработки. При работе без статической нагрузки скорость процесса резко падает. Оптимальная сила подачи подбирается обычно экспериментально и составляет при размерной обработке  $P_{cm} = 20 \dots 200$  Н. Производительность обработки растет с ростом усилия подачи, но до определенного предела – оптимального значения  $P_{cm}$ . При увеличении силы подачи выше оптимального значения производительность падает.

Все факторы, влияющие на производительность процесса, взаимосвязаны. Так, например, при определенных соотношениях амплитуды колебаний и силы подачи между количеством диспергированных и поступающих зерен абразива наступает динамическое равновесие, и распределение абразива в рабочей зоне, а также сам процесс диспергирования становятся стабильными.

*Шероховатость обработанной поверхности* при УЗАО зависит от размеров зерен абразива, физико-механических свойств обрабатываемого материала, амплитуды колебаний инструмента, шероховатости поверхности инструмента и состава абразивной суспензии. При наиболее благоприятных условиях обработки шероховатость обработанной поверхности методом УЗАО достигает  $Ra = 0,32$  мкм.

Наибольшее влияние на параметры шероховатости оказывает зернистость абразива. Высота микронеровностей обработанной поверхности пропорциональна среднему размеру абразивных зерен. При обработке материалов с крупнозернистой структурой скалываются крупные частицы, и получить высокое качество поверхности не удастся.

Чем выше амплитуда колебаний инструмента, тем формируется большая шероховатость поверхности. Объясняется это тем, что при увеличении амплитуды колебаний инструмента увеличиваются силы, действующие на зерно, растет средняя глубина внедрения абразивных зерен. Например, при обработке стекла увеличение амплитуды колебаний  $A_k$  с 10 до 30 мкм вызывает рост шероховатости  $Ra$  с 6,3 до 12,5 мкм.

Параметры микронеровностей обрабатываемой поверхности зависят и от шероховатости рабочих поверхностей инструмента, так как неровности инструмента копируются на поверхности заготовки. На чистовых операциях высота микронеровностей рабочих поверхностей инструмента должна быть в 2...3 раза меньше требуемой высоты микронеровностей детали.

Из-за кавитационной эрозии высота микронеровностей боковых обработанных поверхностей детали меньше, чем высота микронеровностей поверхности торца. В результате действия кавитационной эрозии на поверхностях могут появляться макро и микроизъяны, имеющие обычно локальный характер. Чаще всего они наблюдаются при обработке твердых сплавов.

При ультразвуковой обработке мелкими шлифпорошками (№ 3) и микрошлифпорошками при амплитуде колебаний  $A_k = 15...20$  мкм шероховатость поверхности по параметру  $Ra$  составляет  $1,2...0,4$  мкм.

Увеличение статической нагрузки  $P_{ст}$  приводит к увеличению шероховатости.

При ультразвуковой обработке твердых сплавов и закаленных сталей происходит упрочнение поверхностного слоя, и появляются сжимающие остаточные напряжения.

*Точность ультразвуковой размерной обработки* определяется стабильностью зазора между поверхностями изделия и инструмента. Она зависит от размера абразивных зерен, твердости обрабатываемого материала, формы инструмента и амплитуды его поперечных колебаний.

Минимальная погрешность размера в сечении, перпендикулярном направлению движения подачи, ограничивается предельными колебаниями размера бокового зазора. Обычно этот размер в 1,5 раза больше среднего размера зерна  $d_a$  абразива основной фракции. С уменьшением размера зерна точность изготовления возрастает.

При изготовлении глухих отверстий на точность размеров по глубине прошиваемого профиля влияет износ инструмента. Износ происходит в результате ударов абразивных зерен, кавитационной эрозии и истирания инструмента. В основном изнашивается торец инструмента, значительно слабее изнашиваются боковые поверхности.

Продольный относительный износ инструмента зависит главным образом от физико-механических свойств обрабатываемого материала и материала инструмента, толщины стенок инструмента и зернистости абразива. Продольный относительный износ  $h_\ell$  оценивают как отношение длины изношенной части инструмента  $\Delta\ell_u$  к глубине  $\ell_\delta$  обработанной полости детали:  $h_\ell = \Delta\ell_u / \ell_\delta$ .

Поперечный износ инструмента происходит вследствие действия абразива, находящегося между его боковой поверхностью и стенками обрабатываемого отверстия. Он выражается в том, что на инструменте появляется конусность. На поперечный износ инструмента

оказывают значительное влияние его поперечные колебания и геометрические параметры.

Интенсивность износа увеличивается при плохих условиях подвода свежей абразивной суспензии и отвода продуктов обработки. В то же время сила подачи и амплитуда колебаний инструмента не оказывают существенного влияния на его износ.

Чтобы уменьшить износ, прежде всего, необходимо подбирать материал, обладающий достаточной износостойкостью. Для УЗАО стекла инструмент изготавливают из твердого сплава, инструмент для обработки твердого сплава – из закаленной стали.

Из-за поперечных колебаний инструмента происходит «разбивание» отверстия, т. е. поперечные размеры полученного отверстия оказываются больше соответствующих размеров инструмента. Обычно при строгой прямолинейности осей и соосности преобразователя, концентратора и инструмента, а также при точной выверке инструмента и заготовки отклонение от круглости отверстий, получаемых при чистовых операциях, не превышает 10 мкм. В неблагоприятных случаях погрешность формы может достигать 30...60 мкм. Односторонний боковой зазор при обработке абразивами с зернистостью № 6...10 находится в пределах 80 мкм, а при использовании абразивов № 3...5 зазор уменьшается до 30 мкм.

При обработке отверстий диаметры отверстия на входе и выходе получаются несколько большими чем размер диаметра центральной части отверстия. Происходит так называемое «разбивание отверстия». Разбивание на входе можно значительно уменьшить, если на заготовку положить накладку из материала, который хорошо обрабатывается ультразвуком, например, из стекла или керамики. Толщина накладки обычно принимается равной 1...3 мм. Для предотвращения скола выходной кромки подкладку кладут под заготовку.

Разбивание отверстия на входе больше, чем на выходе. Это вызывает появление конусности отверстия. Например, при обработке отверстий глубиной 5... 10 мм абразивом № 12 конусность может со-

ставлять 25...40 мкм. При обработке того же отверстия более мелким абразивом № 3 конусность не превышает 10 мкм.

С целью увеличения точности обработки при сквозном прошивании используют инструмент, состоящий из двух участков: чернового и чистового.

При ультразвуковой размерной обработке обычно применяемыми абразивными порошками погрешность изготовления диаметрального и линейного размеров достигает 20 мкм, в лабораторных условиях можно получить погрешность обработки в пределах 5...10 мкм.

### Устройство станка УЗСК-1

Ультразвуковой станок модели УЗСК–1 (рис. 8.3) предназначен для ультразвукового прошивания отверстий диаметром  $d$  от 0,5 до 5,0 мм в хрупких материалах в условиях единичного и мелкосерийного производств. Конструкция станка обеспечивает глубину обработки до 6 мм и нерегулируемое усилие прижима инструмента  $P_{ст}$  до 4000 Н. Некоторые технические характеристики станка приведены в виде следующих данных:

- генератор ультразвуковых колебаний — УЗГ8–0,1/22;
- напряжение однофазной питающей сети — 200 В;
- частота питающей сети — 50 Гц;
- рабочая частота —  $22 \pm 1,65$  Гц;
- выходная мощность генератора — 100 Вт;
- мощность, потребляемая от сети — 0,18 кВт·А;
- КПД генератора — 50 %.

Станок УЗСК– 1 состоит из блока питания (генератора высокочастотного тока (30кГц) 4, столика 14 со стойкой 11, на которой с возможностью вертикального перемещения установлен обрабатывающий блок 7. На стойке закреплена емкость для жидкости 8 и лоток для подачи суспензии в зону обработки 5. Рабочее перемещение индуктора и концентратора с инструментом может осуществляться ручкой 9 или барабанчиком точного перемещения 6. Величина пере-

мещения инструмента в процессе обработки контролируется измерительным цифровым прибором 10.

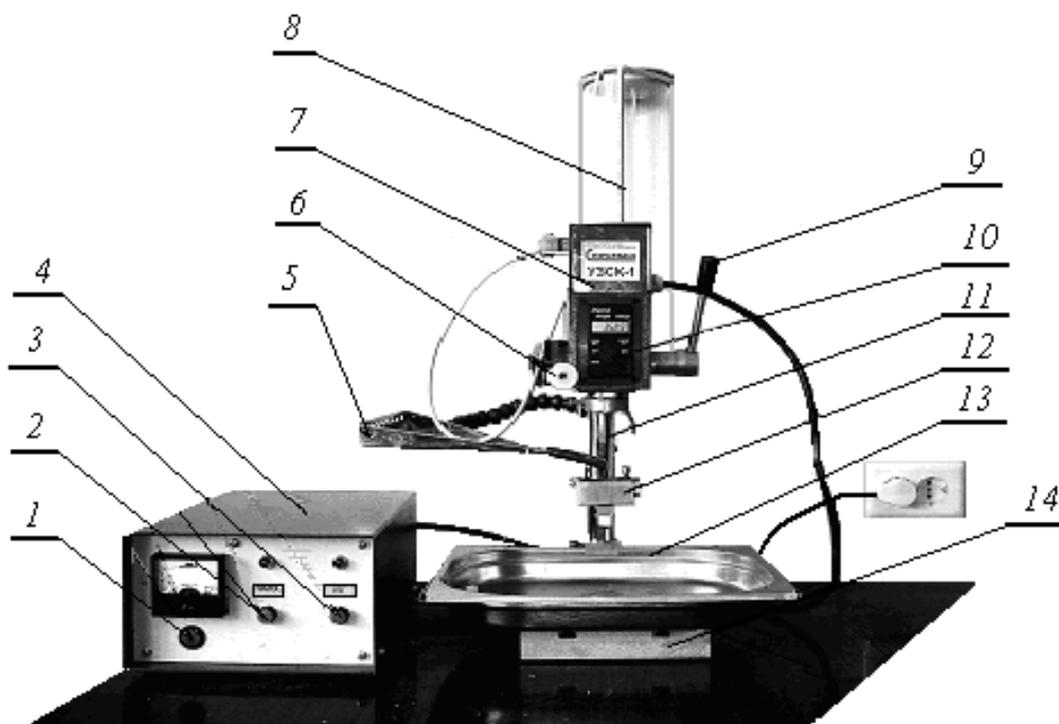


Рис. 8.3. Общий вид станка УЗСК-1

На стойке 11 также закрепляется кронштейн для установки обрабатываемой заготовки 12. В процессе обработки излишки суспензии, подаваемой из лотка 5, стекают в ванну 13 и могут использоваться при обработке следующих заготовок. Станок включается пусковой кнопкой 1. При использовании станка в режиме прошивания отверстий ультразвуковой генератор включается кнопкой 3.

Инструмент для обработки представляет собой стержень, крепежная часть которого имеет цилиндрическую часть с диаметром, равным диаметру отверстия в торцевой части концентратора. Этой частью он вставляется в отверстие концентратора и закрепляется в нем пайкой (рис. 8.4).

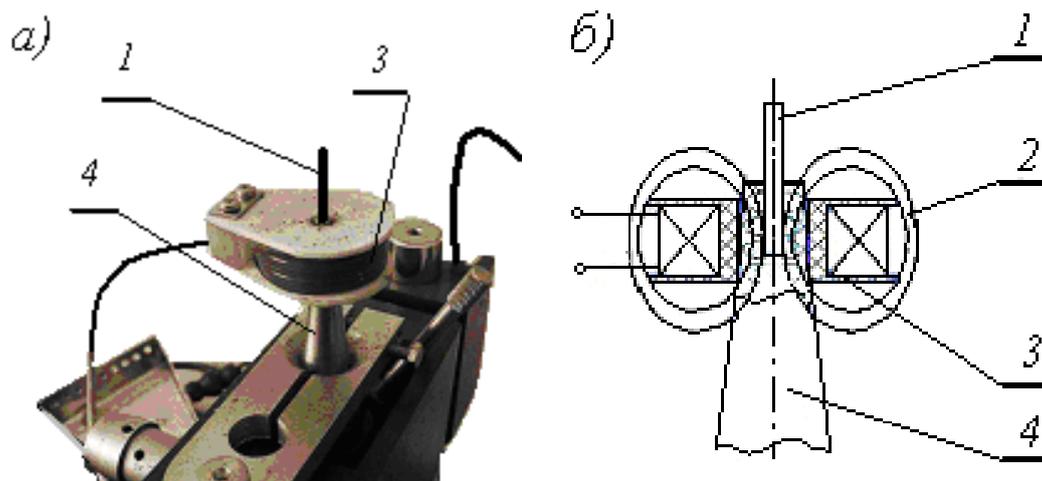


Рис. 8.4. Схемы пайки ультразвукового инструмента

При пайке обрабатываемый блок 7 (см. рис. 8.3) поворачивается на  $180^\circ$  и на концентратор 4 (рис. 8.4, а) в месте крепления инструмента 1 одевается специальная катушка-индуктор 3, подключенная к генератору высокочастотного тока, используемого и для создания высокочастотных ультразвуковых колебаний.

Вокруг витков катушки создается переменное магнитное поле, силовые линии которого 2 условно показаны на рис. 8.4, б. Переменное магнитное поле создает в металле концентратора электрические высокочастотные токи, которые нагревают металл концентратора до температуры плавления припоя.

При пайке ультразвуковых колебательных систем используют высокопрочные серебряные припои с высокой температурой плавления и оловянно-свинцовые припои, имеющие более низкие температуры плавления, а потому обеспечивающие меньшую прочность соединения. Некоторые марки припоев этих групп и их характеристики приведены в табл. 8.5.

На станке УЗСК–1 для пайки инструмента используются оловянно-свинцовистые припои.

Таблица 8.5

Припои, применяемые при пайке ультразвуковых колебательных систем

Марка припоя	Температура плавления, $\theta$ , °С	Прочность соединения $\sigma_6$ , МПа
ПСр25	740–755	289–350
ПСр45	665–730	
ПОС 40	283	32
ПОС 61	190	38
ПОС 90	220	43

### Содержание работы

Работа включает изучение назначения и устройства ультразвукового станка модели УЗСК–1, технологических характеристик и закономерностей ультразвуковой прошивки отверстий, проведение эксперимента по определению производительности и точности прошивания отверстий в заготовках, изготовленных из разных материалов, выполнение индивидуального задания и составление отчета.

### Последовательность проведения работы

1. Изучите теоретические основы, технико-технологические характеристики и устройство станка ультразвуковой обработки.
2. Получите у преподавателя задание на прошивание цилиндрического отверстия заданного диаметра  $d$  в трех образцах, изготовленных из разных материалов.
3. Зафиксируйте в протоколе наблюдения следующие условия обработки: модель и наименование станка, вид инструмента (нарисуйте эскиз), форму заготовок и их материал, характеристики материала; вид и зернистость используемого абразивного порошка, концентрацию суспензии, используемые приспособления, измерительные приборы.
4. Проследите за наладкой станка учебным мастером для выполнения ультразвуковой обработки образцов при указанном преподавателем режиме обработки.
5. Измерьте начальный диаметр инструмента  $d_u$  с точностью 0,01 мм на расстоянии 1 мм от его торца и исходную длину рабочей части инструмента  $\ell_u$  (см. рис. 8.2). Результаты измерений занесите в

таблицы П2 и П3 протокола измерений, форма которого приведена в разделе «Содержание отчета» данной работы.

6. Проведите прошивание отверстий в трех образцах из разных материалов при заданном режиме обработки, измеряя время обработки  $\tau_o$ , после каждого эксперимента – диаметр инструмента  $d_{\hat{e}_i}$  с точностью 0,01 мм на расстоянии 1 мм от его торца и длину рабочей части инструмента  $\ell_{\hat{e}_i}$ . Результаты измерений занесите в таблицы П2 и П3 протокола измерений данной работы.

7. Определите абсолютные и относительные продольный и диаметральный размерные износы инструментов по формулам:

$$\Delta d_u = d_{u_n} - d_{u_k}; \quad \frac{\Delta d_u}{d_{u_n}} = \frac{d_{u_n} - d_{u_k}}{d_{u_n}} \cdot 100, \quad (8.4)$$

$$\Delta \ell_u = \ell_{u_n} - \ell_{u_k}; \quad \frac{\Delta \ell_u}{\ell_{u_n}} = \frac{\ell_{u_n} - \ell_{u_k}}{\ell_{u_n}} \cdot 100. \quad (8.5)$$

где  $d_{u_n}$  – диаметр инструмента до прошивания отверстия;  $d_{u_k}$  – диаметр инструмента после обработки,  $\Delta d_u$  – абсолютный диаметральный износ инструмента, мм;  $\frac{\Delta d_u}{d_{u_n}}$  – относительный диаметральный износ, %;  $\ell_{u_n}$  – рабочая длина инструмента до прошивания отверстия;  $\ell_{u_k}$  – рабочая длина инструмента после обработки,  $\Delta \ell_u$  – абсолютный продольный износ инструмента, мм;  $\frac{\Delta \ell_u}{\ell_{u_n}}$  – относительный продольный износ, %.

Занесите полученные данные в табл. 8.6.

Таблица 8.6

Результаты ультразвукового прошивания отверстий

№ ПП	Материал заготовки	$d_{u_n}$ , мм	$d_{u_k}$ , мм	$\Delta d_u$ , мм	$\frac{\Delta d_u}{d_{u_n}}$ , %	$\ell_{u_n}$ , мм	$\ell_{u_k}$ , мм	$\Delta \ell_u$ , мм	$\frac{\Delta \ell_u}{\ell_{u_n}}$ , %

1									
2									
3									

8. Измерьте на Малом инструментальном микроскопе МИМ действительные диаметры прошитых отверстий  $d_i^{\ddot{a}}$  ( $i$  – номер образца) и определите объемную производительность обработки  $\Pi_v$ , мм<sup>3</sup>/мин. Зафиксируйте полученные результаты в табл. 8.7.

Таблица 8.7

Расчетные характеристики ультразвукового прошивания отверстий

№ пп	Материал заготовки	$\tau_o$ , мин	$d_i^{\hat{m}}$ , мм	$d_i^{\ddot{a}}$ , мм	Квалитет точности	$\delta_b$ , мм	$\Pi_v$ , мм <sup>3</sup> /мин	$k_x$
1								
2								
3								

9. Установите для каждой заготовки (материала) коэффициент хрупкости  $k_x = \sigma_{вр}/\sigma_{сжс}$ , используя указанные преподавателем механические свойства обрабатываемых материалов (табл. П1 протокола наблюдений данной работы). Запишите полученные результаты в табл. 8.7.

10. Сопоставьте полученные данные по фактической производительности обработки различных материалов с отношениями указанных в табл. 8.7 коэффициентов хрупкости  $k_x$ . Сделайте выводы о правомерности использования коэффициента  $k_x$  для оценки относительной обрабатываемости материалов методом УЗАО.

11. Определите размеры бокового зазора  $\delta_b$ , возникающего при ультразвуковой прошивке отверстий, и численно сравните эту величину с зернистостью используемого при обработке абразива.

12. Установите достигнутый квалитет точности диаметров отверстий.

13. Получите у преподавателя индивидуальное задание (табл. 8.8) и выполните по нему действия в соответствии с пунктами раздела работы «Содержание отчета».

Таблица 8.8

Индивидуальные задания

№ задания	Эскиз отверстия	Размеры, мм				
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>R</i>	<i>r</i>
1		2	1	2	0,5	
2		1	0,5	3	0,25	
3		3	0,8	4	0,4	
4		4	0,6	5	0,3	
5			2	2	0,2	
6			3	3	0,1	
7			1	4	0,1	
8			1,5	3	0,2	
9		2	2	2	0,1	
10		2,6	1,5	1	0,2	
11		3	1	3	0,3	
12		2,4	1,5	4	0,2	
13		2	1	4	0,5	0,2
14		3	1,4	3	0,7	0,3
15		2,5	1	2	0,5	0,2
16		4	2	3	1	0,2

### Содержание отчета

1. Название работы.
2. Условия проведения эксперимента: наименование и модель станка, характеристика абразивной суспензии, абразивный материал, зернистость, форма, материал и диаметр инструмента; обрабатываемый материал.

мые материалы и их механические свойства (по форме табл. П1 протокола измерений); измерительные инструменты и приборы.

3. Схема обработки с условными обозначениями размеров инструмента, отверстия, зазора, движений инструмента.

4. Режим обработки:  $f$ ,  $A_k$ ,  $P_{cm}$ .

5. Результаты эксперимента (по форме табл. 8.6 и 8.7).

Расчет значений коэффициента хрупкости  $k_x$ , объемной производительности  $П_v$ , абсолютной и относительной погрешности обработки.

5. Определение качества точности прошитых отверстий.

6. Выводы по результатам эксперимента по обрабатываемости материалов методом УЗАО, достигнутой точности выполнения размеров и области использования УЗАО, обрабатываемости экспериментальных материалов и возможности использования коэффициента хрупкости для оценки обрабатываемости методом УЗАО.

7. Индивидуальное задание (табл. 8.8): номер, данные, эскиз заготовки.

7.1. Эскиз инструмента для обработки заданного отверстия, номинальные размеры поперечного сечения.

7.2. Расчет основного время обработки заданного отверстия.

8. Приложение. Протокол измерений (по далее приведенной форме).

Приложение

### ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ

#### К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ «ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ НА УЛЬТРАЗВУКОВОМ СТАНКЕ МОДЕЛИ УЗСК-1»

Группа \_\_\_\_\_

Дата проведения эксперимента « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201 \_\_\_\_ г.

#### 1. Условия проведения эксперимента

1.1. Оборудование: \_\_\_\_\_

1.2. Рабочая среда (абразивная суспензия, характеристики):  
\_\_\_\_\_

1.3. Измерительные инструменты и приборы: \_\_\_\_\_ .

1.4. Форма, материал и размеры инструмента: \_\_\_\_\_

1.5. Форма и размеры заготовок: \_\_\_\_\_.

1.6. Выполняемые размеры отверстия:  $d = \underline{\hspace{2cm}}$ ;  $h = \underline{\hspace{2cm}}$ .

1.7. Режим обработки:  $f = \underline{\hspace{1cm}}$  Гц.;  $A_k = \underline{\hspace{1cm}}$  мм;  $P_{cm} = \underline{\hspace{1cm}}$  Н.

1.8. Материалы заготовок, их характеристики.

Таблица П1

Материалы заготовок и их характеристики

№ пп	Материал	$\sigma_{вс}$ , МПа	$\sigma_{вр}$ , МПа	$k_x$
1	Стекло			
2	Кирпич керамический			
3	Фарфор			

## 2. Таблицы измерений

Таблица П2

Результаты измерения диаметров отверстий и инструментов

№ пп	Материал заготовки	$\tau_0$ , мин	Диаметр отверстия, $d_i$ , мм				Диаметры инструмента										
			Номер измерения			$\bar{d}_i$	$d_{u_n}$ , мм			$d_{u_k}$ , мм							
			1	2	3		Номер измерения			$\bar{d}_{i_i}$	Номер измерения			$\bar{d}_{\hat{e}_i}$			
							1	2	3		1	2	3				
1																	
2																	
3																	

Таблица ПЗ

## Результаты измерения длины рабочей части инструмента

№ пп	Материал заготовки	$\tau_0$ , мин	Длина рабочей части инструмента							
			$l_{u_n}$ , мм				$l_{u_k}$ , мм			
			Номер измерения			$\bar{l}_{i_i}$	Номер измерения			$\bar{l}_{e_i}$
			1	2	3		1	2	3	
1										
2										
3										

Студент(ка)

\_\_\_\_\_

Преподаватель

\_\_\_\_\_

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 1977. – 479 с.
2. Никифоров В. И. Электрохимические и электрофизические технологии. Практикум по электрохимической размерной обработке: учеб. пособие / В. И. Никифоров, В. С. Медко, А. И. Фоломкин. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 112 с.
3. Прошин В. И., Сидоров В. Г. Метрология, стандартизация и сертификация. Методы обработки результатов измерений. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 139 с.
4. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Под ред. В. А. Волосатова. – Л.: Машиностроение, 1988. – 719 с.
5. Технология конструкционных материалов: Учеб. пособие / Под ред. М. А. Шатерина. – СПб.: Политехника, 2005. – 597 с.
6. Технология конструкционных материалов. Практикум по технологическим методам обработки заготовок: учеб. пособие / Под ред. В. И. Никифорова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 305 с.
7. Технология машиностроения: В 2-х кн. Кн. 1. Основы технологии машиностроения: Учеб. пособие для вузов / Э. Л. Жуков и др. / Под ред. С. Л. Мурашкина. – М.: Высш. шк., 2003. – 278 с.
8. Технология машиностроения: В 2-х кн. Кн. 2. Основы технологии машиностроения: Учеб. пособие для вузов / Э. Л. Жуков и др. / Под ред. С. Л. Мурашкина. – М.: Высш. шк., 2003. – 295 с.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

### **ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПРОФИЛОМЕТРОМ MarSurf PS1**

Профилометр MarSurf PS1 используется для измерения в производственных условиях параметров шероховатости наружных и внутренних, цилиндрических, конических и фасонных поверхностей, канавок, уступов, торцовых поверхностей на деталях простых и сложных форм. Прибор позволяет измерять шероховатость поверхностей отверстий диаметром от 6 мм, пазов шириной от 3 мм, зубьев зубчатых колес, коренных и шатунных шеек коленчатых валов, профильных поверхностей кулачковых валов.

На приборе можно измерять 24 параметра шероховатости поверхности по международным стандартам ISO (DIN), JIS, ANSI/ASME и MOTIF. Среди измеряемых профилометром характеристик есть шесть параметров, установленных ГОСТ 25142–82 «Шероховатость поверхности. Термины и определения».

В связи с тем, что в обозначениях ряда параметров шероховатости, высвечиваемых на дисплее прибора, используются индексы, отличающиеся от обозначений, принятых в ГОСТ 25142–82, далее приводится таблица П1.1, включающая обозначения параметров по прибору и обозначения, установленные ГОСТ 25142–82.

Таблица П1.1

Обозначения параметров шероховатости, принятые в ГОСТ 25142–82 и показываемые на дисплее профилометра MarSurf PS1

Параметр шероховатости, единица измерения по ГОСТ 25142–82	Обозначение параметра		
	ГОСТ 25142–82	Прибор MarSurf PS1	
		Параметр	Обозначение на дисплее
Базовая длина, мм.	$\ell$	$Lc$	Lc
Среднее арифметическое отклонение профиля, мкм <sup>1</sup> .	$Ra$	$Ra$	RA
Высота неровностей профиля по десяти точкам, мкм.	$Rz$	$Rz$	RZ
Наибольшая высота неровностей профиля, мкм.	$Rmax$	$Rmax$	RMAX
Средний шаг неровностей профиля, мкм.	$Sm$	$RSm$	RSM
Средний шаг местных выступов, мкм.	$S$	$S$	S
Относительная опорная длина профиля, мкм.	$tp$	$Rmr$ или $tp$ (по стандартам JIS, ASME)	RMR

*Примечание.* Параметры шероховатости, имеющие на приборе MarSurf PS1 иное обозначение, чем в ГОСТ 25142–82, будут далее в тексте представлены двойными обозначениями: первое обозначение дается по ГОСТ 25142–82, далее в скобках приводится обозначение параметра шероховатости по прибору MarSurf PS1.

<sup>1</sup> На дисплее прибора единица измерения длины «мкм» обозначается как « $\mu\text{m}$ ».

Профилометр позволяет измерять параметры шероховатости поверхности детали с наибольшей высотой профиля 350 мкм при расположении выступов и впадин относительно базовой линии профиля  $m$ – $m$  равными соответственно «+ 250 мкм» и «– 150 мкм». Максимальная длина участка ощупывания поверхности равна 17,5 мм.

Для контроля точности выполнения предельных значений параметров шероховатости на профилометре MarSurf PS1 могут быть установлены границы допусков для всех выбранных параметров детали. Превышения допусков, верхнего и нижнего отклонений, выявленные при измерениях, фиксируются в памяти прибора и могут быть выведены на дисплей в виде определенных сигналов. Прибор способен запоминать и воспроизводить результаты 20000 измерений и 15 записей профиля.

### Устройство и элементы управления

Внешний вид профилометра MarSurf PS1 показан на рисунке П1.1.



Рис. П1.1. Профилометр MarSurf PS1:

1 – корпус; 2 – клавиатура; 3 – дисплей; 4 – две кнопки «Старт» включения прибора, запуска и прерывания текущего измерения; 5 – щуп; 6 – устройство защиты щупа; 7 – привод подачи щупа, а также продольного и поворотного установочных движений щупа с защитным устройством; 8 – контакты подключения к электросети, компьютеру и принтеру

Две кнопки «Старт» 4 (на рис. П1.1 видна одна кнопка) используются для включения прибора, запуска и прерывания текущего измерения, а также для выполнения следующих действий в комбинациях с другими клавишами:

- для открытия каталога установки параметров измерения нужно нажать одну из кнопок «Старт» и клавишу «Lt/Lc»;
- для показа выбранных параметров измерения последовательно нажимается одна из кнопок «Старт» и клавиша «Ra»;
- для выключения прибора нужно нажать на одну из кнопок «Старт» и клавишу «Rz».

При использовании комбинаций клавиш нужно держать нажатой одну из кнопок «Старт», а потом нажать на клавишу, включающую нужную команду.

Клавиатура 2 профилометра, расположенная на корпусе 1, имеет четыре клавиши.

*Клавиши «Ra» и «Rz»* служат для выбора при измерении одного из параметров  $Ra$  или  $Rz$ .

*Клавиша «F1»*. При нажатии на данную клавишу на дисплее показываются результаты измерения параметра, на который клавиша на предыдущем измерении была настроена. Клавиша «F1» используется также при настройке прибора в случае необходимости измерения дополнительного параметра, не относящегося к нормативным параметрам, указанным в стандартах.

*Клавиша «Lt/Lc»* позволяет устанавливать базовую длину  $\ell$  ( $Lc$ )<sup>1</sup> и длину участка ощупывания  $Lt$ . Она также используется при автоматическом выборе величины базовой длины и участка ощупывания.

Участок ощупывания  $Lt$  состоит из начального нерабочего участка, нескольких отдельных измерительных участков (обычно 5 участков) с базовой длиной измерения  $\ell$  ( $Lc$ ) и конечного нерабочего участка. Общий измерительный участок имеет обозначение  $Ll$ .

---

<sup>1</sup>Термин «Базовая длина» в инструкции по эксплуатации прибора имеет название «Отсечка шага».

Клавиши «▼», «▲», «◀», «▶» позволяют изменять установки на измерения значений параметров шероховатости, содержащихся в электронном каталоге прибора.

Для измерения поверхностей различной формы и расположений в комплект прибора входит набор специальных датчиков (рис. П1.2).

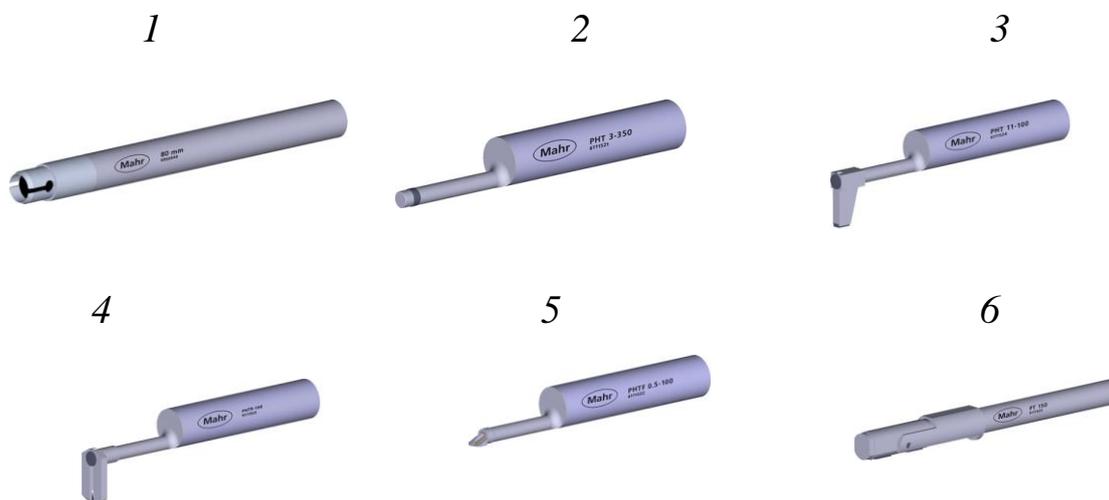


Рис. П1.2. Специальные датчики для прибора MarSurf PS1:

1 – удлинитель для датчика на 80 мм; 2 – датчик для измерения в отверстиях диаметром от 3 мм; 3 – датчик для измерения в труднодоступных местах, например, в канавках от 2,5 мм ширины и 7,7 мм глубины; 4 – датчик для измерения на выпуклых и вогнутых поверхностях; 5 – датчик для измерения на поверхности зуба шестерни; 6 – двухопорный датчик для измерения на металлическом листе и поверхности валов

Профилометр MarSurf PS1 имеет встроенный, многократно заряжаемый аккумулятор, позволяющий в автономном режиме без подключения к сети проводить до 500 измерений. Для подзарядки аккумулятора в покупном комплекте прибора имеется три сменных сетевых адаптера, с помощью которых прибор может быть в любой стране подключен к сети через розетку 4 (рис. П1.3), расположенную на панели внешних соединений прибора 8 (см. рис. П1.1).

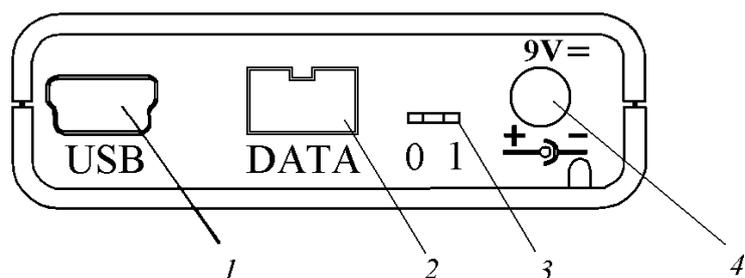


Рис. П1.3. Контакты подключения профилометра MarSurf PS1

Профилометр MarSurf PS1 можно подключать непосредственно к компьютеру через USB-порт 1 и к принтеру через порт 2. Профилометр воспринимается компьютером как USB-модуль памяти и распознается без драйвера. Таким образом, можно переносить результаты измерений и профили с профилометра MarSurf PS1 в компьютер для того, чтобы, например, анализировать и оценивать их с помощью программы оценки MarSurf XR 20.

Движок перенастройки 3 (рис. П1.3) служит для перевода прибора из состояния поставки, позиция «0», в рабочее положение, позиция «1». В положении движка 3 на позиции «1» осуществляется зарядка аккумулятора прибора через розетку 4.

### **Включение, последовательность измерения и выключение профилометра**

#### ***Включение профилометра***

Для включения профилометра MarSurf PS1 выполните перечисленные далее действия.

1. Передвиньте движок 3 (рис. П1.3) в позицию «1», приведя тем самым прибор в рабочую готовность.

2. Переведите щуп с помощью привода подачи 7 (рис. П1.1) из позиции стоянки в позицию измерения. Рычаг щупа должен быть параллелен осязываемой поверхности.

3. Мягко нажмите на одну из кнопок «Старт» 4 (рис. П1.1). Через небольшой промежуток времени на дисплее 3 высвечиваются результаты последнего измерения, объединенные в виде 4-х полей (рис. П1.4).

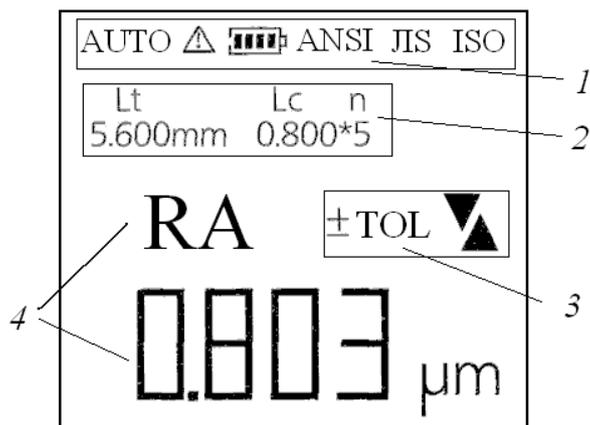


Рис. П1.4. Поля данных дисплея:

1 – указания на используемый стандарт и зарядку аккумулятора (аккумулятор заряжен полностью); 2 – текстовое поле для индикации участка ошупывания *Lt*; 3 – символы, указывающие на превышение установленных значений допуска или отклонений на параметр шероховатости («+ TOL» — превышение верхней границы допуска показанного параметра; «- TOL» — превышение нижней границы допуска показанного параметра); 4 – измеряемый параметр и результат измерения

Представленные на полях дисплея текстовые и числовые сведения дают оператору возможность:

- проверить установки прибора по каталогу установок;
- осуществить наладку измеряемых параметров;
- контролировать ход измерения;
- определить результаты измерения параметров.

При проведении измерений на дисплее профилометра появляются не все указанные на рис. 8 символы. Дается только их определенный, установленный системой набор.

4. Проверьте и при необходимости зарядите аккумулятор. Аккумулятор нужно зарядить, если:

- прибор впервые запускается в эксплуатацию;
- после последней зарядки прошло приблизительно три месяца;
- на дисплее мигает символ , обозначающий наличие у аккумулятора приблизительно 15 % его исходной емкости;

– если невозможно произвести измерение, хотя символ  не мигает.

5. Просмотрите и при необходимости установите с помощью клавиш 2 (рис. П1.1) заданные установки и параметры измерения. Инструкция по просмотру параметров измерения и их установке на профиллометре приведена далее в разделе «Подготовка профиллометра к работе и установка параметров измерения».

6. Повторно нажмите на одну из кнопок «Старт». В результате нажатия запускается процесс измерения. Измерение нужно проводить, как правило, перпендикулярно к направлению следов обработки на объекте измерения.

### ***Показания профиллометра***

Если включена автоматическая установка значения базовой длины  $\ell$  ( $L_c$ ) и участка ощупывания, на дисплее появляется и сохраняется текст «Измерение = = А = =». Число, записанное в виде буквы «А», обозначает отрезок участка ощупывания (1, 2, ... 7), через который в данный момент проходит щуп.

После измерения на индикаторе высвечивается сообщение «Конец измерения» и показывается, столько времени потребуется, пока щуп снова не возвратится в исходную позицию.

Если измерение проведено правильно, на индикаторе показывается первый выбранный для определения параметр. При выходе его значения за границы допуска измеряемый параметр сначала показывается на индикаторе, а затем появляется надпись «+TOL», означающая, что верхняя граница поля допуска превышает установленное значение, или «-TOL» (меньше нижней границы). Это означает, что нижняя граница поля допуска располагается ниже установленного при наладке прибора значения.

Измерение можно в любое время прервать, нажав на кнопку «Старт». Механизм перемещения и поворота щупа после нажатия клавиши немедленно останавливается, и щуп возвращается в исход-

ную позицию. После этого можно с помощью кнопки «Старт» запустить новое измерение.

Во время измерения прибором контролируется значение отклонения щупа от заданного в установках на измерение исходного значения параметра. При выходе значения параметра измерения за пределы диапазона измерения механизм перемещения и поворота немедленно останавливается, и щуп возвращается в исходную позицию. На индикаторе появляется символ «D» или «▼» и сообщение об ошибке.

Как только на индикаторе будет снова показана длина участка ощупывания, можно с помощью одной из кнопок «Старт» запускать новое измерение.

Чтобы показать на индикаторе значения всех подлежащих измерению параметров, следует, держа нажатой одну из кнопок «Старт», нажать на клавишу «Ra». Затем с помощью клавиш «▼» или «▲» можно показать на дисплее последовательно измеренные значения параметров. Клавиша «◀» служит для выхода из режима «Параметры».

Если вместо результата измерения на дисплее появятся символы «— — —», то результат принять нельзя, потому что:

- нет действительного измерения, поскольку последнее измерение было прервано;
- нет действительного измерения из-за того, что были изменены условия измерения;
- условия для расчета результата этого параметра не были выполнены.

### ***Выключение профилометра***

При мобильном использовании на профилометре устанавливается временной лимит работы, равный одной минуте. В течение минуты с начала измерения не нужно нажимать никаких клавиш. По завершении минуты прибор выключается автоматически. При этом установки профилометра и результаты последнего измерения сохраняются.

При длительном использовании профилометра временной лимит можно выключить, осуществляя наладку прибора. Временной лимит не действует, если MarSurf PS1 подключен:

- через розетку 4 (рис. П1.3) к сети;
- через USB-порт 1 к компьютеру.

Если профилометр сам не выключается, то для выключения следует нажать на одну из кнопок «Старт» и, удерживая ее, нажать на клавишу «Rz».

Перед транспортировкой профилометра механизм подачи и щуп необходимо установить в нерабочую позицию. Для этого следует:

- выдвинуть механизм подачи вперед из корпуса (рис. П1.5, движение  $D_1$ );

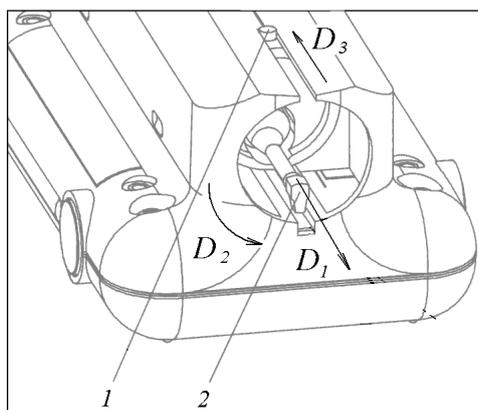


Рис. П1.5. Положение щупа в позиции стоянки:

1 – щуп в положении стоянки; 2 – щуп

- повернуть механизм подачи вправо на  $180^0$ , в результате чего головка щупа будет направлена вверх (рис. П1.5, движение  $D_2$ );

- задвинуть механизм подачи в корпус, пока не будет достигнуто крайнее положение упора, позиция 1 (рис. П1.5, движение  $D_3$ ). При этом штифт механизма подачи должен войти в направляющую канавку.

## **Подготовка профилометра к работе и установка параметров измерения**

### ***Введение установок профилометра***

Перед проведением измерений необходимо ввести на приборе основные установки:

– выбрать стандарт измерения из реализуемых в приборе международных стандартов ISO, JIS, ANSI/ASME; оценка параметров по стандарту MOTIF проводится по ISO 12085;

– установить длину участка ощупывания  $Lt$ ;

– ввести базовую длину (отсечку шага)  $\ell$  ( $Lc$ ).

Все другие установки можно изменять перед измерением или после измерения.

Для изменения основных установок профилометра необходимо:

1) мягко нажать на одну из кнопок «Старт» 4 (см. рис. П1.1). Через небольшой промежуток времени на индикаторе высветятся результаты последнего измерения;

2) повторно нажать на одну из кнопок «Старт» и, держа ее в нажатом состоянии, нажать на клавишу «Lt/Lc»; на дисплее появляется извещение об открытии первого подкаталога «Условия измерения»;

3) с помощью клавиш 2 (см. рис. П1.1) «▼» или «▲» выбрать желаемый подкаталог, например, «Основные установки»;

4) с помощью клавиши «►» открыть подкаталог; при этом будет показана первая строка, например, «Язык»;

5) нажатием клавиш «▼», «▲» нужно выбрать желаемую строку, например, «русский»;

6) для изменения значения параметра нажать на клавишу «►», а затем с помощью клавиш «▼» или «▲» выбрать желаемое значение, например, «Polski»;

7) нажатием клавиши «◀» подтвердить изменение;

8) снова нажать на эту же клавишу, чтобы закрыть подкаталог и еще раз нажать на нее для закрытия каталога.

Установки прибора можно изменять только тогда, когда они не заблокированы, т. е.:

– в подкаталоге «Основные установки» выбрана установка «Блокирование ВЫК»;

– в каталоге «Результаты» выбрана установка «Запомнить ВЫК» или «Запомнить Пауза».

Для того чтобы измененные установки прибора после выключения MarSurf PS1 сохранились, следует провести безошибочное измерение с этими установками прибора.

В таблице П1.2 приведена выборка настраиваемых параметров каталога профилометра с его подкаталогами и имеющимися в каталоге строками. Полный перечень установок прибора приведен в Инструкции по эксплуатации профилометра MarSurf PS1, прилагаемой к прибору.

Таблица П1.2

Фрагмент каталога установок профилометра

Подкаталог	Строка	Значение	Действие оператора
Параметры	<i>n</i>	5	Выбрать количество отдельных измерительных участков <i>n</i> .
	<i>Lc</i>	Стандарт	Выбрать стандартную или кратную величину базовой длины $\ell$ ( <i>Lc</i> ) согласно стандартам ISO, JIS, ANSI/ASME.
	CREF	5.00 мм	Установить базовую линию для относительной опорной длины профиля <i>tp</i> ( <i>Rmr</i> ), мкм.

Продолжение табл. П1.2

Подкаталог	Строка	Значение	Действие оператора
------------	--------	----------	--------------------

Подкаталог	Строка	Значение	Действие оператора
Протокол	Автомат. печать	ВКЛ ВЫКЛ	Включить или выключить автоматическое печатание протокола.
	<i>Ra</i>	ВКЛ ВЫКЛ	Включить или выключить значение параметра шероховатости <i>Ra</i> для протокола.
	...		Установить границы допуска для других параметров.
Границы допуска	<i>Ra</i> Max	0.00 μм	Установить верхнюю границу допуска <i>Ra</i> .
	<i>Ra</i> Min	0.00 μм	Установить нижнюю границу допуска <i>Ra</i> .
Основные установки	Язык	русский	Выбрать язык для установок, указаний по обслуживанию и сообщений об ошибках.
	Размерность	mm Inch	Выбрать единицу измерения для фиксации результатов и установок.
	Норма	ISO JIS MO- TIF FNSI/ ASME	Выбрать стандарт для назначения параметров участка ошупывания, значения $Rz^1$ и выбора функции клавиши «F1». Выбранный стандарт показывается на поле <i>I</i> дисплея (см. рис. П1.4) сверху справа.

Окончание табл. П1.2

<sup>1</sup> Параметр  $Rz$  при одинаковом обозначении в стандартах различных стран имеет разное содержание и определения. Указываемое на дисплее профилометра значение параметра  $Rz$  соответствует значению  $Rz$  по ГОСТ 25142–82 только при установке измерения по японскому стандарту JIS B 0601–1982.

Подкаталог	Строка	Значение	Действие оператора
	Огранич. время	ВЫК ВКЛ	Выключить или включить режим автоматического выключения прибора.
	Блокирование	ВЫК ВКЛ	Выключить или включить блокировку установок прибора.
	Batt	%	Показать емкость аккумулятора.
	F1=	Rmax	Выбор параметра для клавиши «F1».
	Тип щупа	350	Выбрать тип щупа.
	Калибровка		Запустить калибрование щупа.
	Дата	15.01. 2010	Установить дату.
	Время	14:35	Установить время.
Профили	Профиль запомнить		Сохранить актуальный профиль во внутреннем блоке памяти.
	Профиль стереть		Удалить файл профиля из памяти. Чтобы удалить все итоговые файлы нужно выбрать команду «R000*.TXT».
	Запомнить	ВЫК ВКЛ	Выключить или включить автоматическое сохранение профилей.
Результаты	Результат запомнить		Сохранить актуальные результаты как файл во внутреннем блоке памяти.
	Результат стереть		Удалить итоговый файл из памяти. Чтобы удалить все итоговые файлы, нужно выбрать команду «R000* .TXT».
	Запомнить	ВЫК ВКЛ Пауза Дальше	Сохранение результатов во внутреннем блоке памяти: включить или выключить, прервать, продолжить.

***Установка прибора для измерения параметров Ra и Rz***

Для измерения прибором параметров  $Ra$  или  $Rz$  нажимаются соответственно клавиши «Ra» или «Rz».

**Внимание!** Нажатие на клавишу «Rz» обеспечит фиксацию параметра  $Rz$  по ГОСТ 25142–82 только в том случае, если на приборе будет установлен японский стандарт JIS B 0601 – 1982.

Если для измерения не выбирается никакой параметр, то автоматически на дисплее прибора показывается измеренное значение параметра  $Ra$ .

### ***Установка длины участка ошупывания $Lt$ и базовой длины $\ell$ ( $Lc$ )***

На текстовом поле дисплея 2 (см. рис. П1.1) при измерениях показываются: длина участка ошупывания  $Lt$ , базовая длина  $Lc$  и количество отдельных измерительных участков  $n$  на длине ошупывания.

При подготовке прибора к измерению на нем нужно установить значение базовой длины  $\ell$  ( $Lc$ ). Профилометр MarSurf PS1 имеет в наборе три значения базовой длины, а, соответственно, и три значения длины ошупывания поверхности  $Lt$  с измерением по пяти участкам на длине ошупывания.

В соответствии со стандартом ISO 4288 значение  $\ell$  ( $Lc$ ) устанавливаются в зависимости от:

- средней ширины элементов профиля  $Sm$  ( $RSm$ ) при периодических профилях;
- измеряемых параметров  $Ra$  или  $Rz$  при аperiodических профилях.

Рекомендации по выбору базовой длины, длины ошупывания и общей длины измерения приведены в табл. П1.3.

Для установки значения базовой длины  $\ell$  ( $Lc$ ) необходимо нажать на клавишу «Lt/Lc», не торопясь, несколько раз до тех пор, пока не будут показаны желаемая величина базовой длины «Lc» и вытекающий из этого стандартный участок ошупывания «Lt».

Таблица П1.3

Определение значений базовой длины  $\ell$  ( $L_c$ ), длины ошупывания  $L_t$  и общей длины измерения  $L_n$  по параметрам  $R_a$  и  $R_z$

Периодические профили	Апериодические профили		$\ell$ ( $L_c$ ), мм	$n$	$L_n$ , мм	$L_t$ , мм
	$R_z$ , мкм	$R_a$ , мкм				
$Sm$ ( $RSm$ ), мкм	$R_z$ , мкм	$R_a$ , мкм				
$Sm \leq 0,13$	$R_z \leq 0,5$	$R_a \leq 0,1$	0,250	5	1,250	1,750
$0,13 < Sm \leq 0,4$	$0,5 < R_z \leq 10$	$0,1 < R_a \leq 2$	0,800	5	4,000	5,600
$0,4 < Sm$	$10 < R_z$	$2,0 < R_a$	2,500	5	1,500	17,500

Если для значений  $L_t$  и  $\ell$  ( $L_c$ ) вместо нужного параметра показаны символы «\*\*\*\*» и над этим условным обозначением появляется надпись «АУТО», это означает, что на приборе используется автоматическая установка величины базовой длины и длины участка ошупывания.

Если объект измерения не допускает использования длины участка ошупывания, которая следует из стандарта, можно уменьшить  $n$  – количество базовых участков. Если будет принято  $n$  меньше 5, то на индикаторе дисплея в поле 2 (рис. П1.4) появляется символ . При измерении по стандартам ISO/JIS количество участков измерения постоянно и корректировке не подлежит.

### ***Просмотр результатов установки выбранных параметров***

Выбранные в подкаталоге «Протокол» параметры могут быть показаны последовательно друг за другом в режиме «Параметры». Для этого нужно, держа нажатой одну из кнопок «Старт», нажимать на клавишу «Ra», не торопясь, несколько раз до тех пор, пока не будет показана желаемая величина.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ОСЦИЛЛОГРАФ УНИВЕРСАЛЬ- НЫЙ СЕРВИСНЫЙ 1С–94: УСТРОЙСТВО И НАЛАДКА

### Назначение осциллографа 1С–94

Осциллограф универсальный сервисный 1С–94 (рис. П2.1) — одноканальный сервисный осциллограф, предназначенный для исследования импульсных сигналов в амплитудном диапазоне от 0,01 до 300 В и во временном диапазоне от  $0,1 \cdot 10^{-3}$  до 0,5 с и синусоидальных сигналов амплитудой от  $5 \cdot 10^{-3}$  до 150 В частотой от 5 до  $10^7$  Гц.



Рис. П2.1. Осциллограф сервисный С1–94

Прибор эксплуатируется в следующих условиях:

- температура окружающей среды от 10 до 35°C;
- относительная влажность воздуха до 80 % при температуре 25 °С;
- напряжение питающей сети  $220 \pm 22$  В или  $240 \pm 24$  В с частотой 50 или 60 Гц;

Осциллограф С1–94 обеспечивает паспортные технические характеристики после 5 минут прогрева и стабильную непрерывную работу в рабочих условиях в течение 8 часов.

## Органы управления осциллографом

На рисунке П2.2 представлена лицевая панель осциллографа 1С–94 и расположенные на ней кнопки и рукоятки управления.

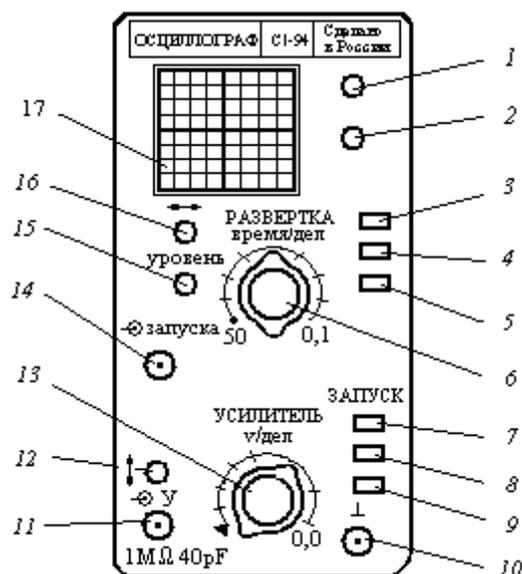


Рис. П2.2. Лицевая панель осциллографа 1С–94

Кнопки и рукоятки панели управления имеют назначения, указанные в табл. П2.1.

Таблица П2.1

### Органы управления осциллографом. Лицевая панель

Номер позиции	Назначение органа управления	Обозначение органа управления
1	2	3
1	Ручка регулировки фокусировки	
2	Ручка регулировки яркости	
3	Кнопка «Включение прибора»	
4	Кнопка «Грубое переключение коэффициентов развертки»	ms μs
5	Кнопка переключения автоколебательного и ждущего режимов работы	АВТ ЖДУЩ
6	Переключатель коэффициента развертки	ВРЕМЯ/ДЕЛ

1	2	3
7	Кнопка переключения полярности запускающего сигнала	
8	Кнопка переключения режима синхронизации	ВНУТР ВНЕШН
9	Кнопка переключения открытого и закрытого входов канала вертикального отклонения	
10	Клемма заземления	
11	Входной разъем подключения исследуемых сигналов к каналу вертикального отклонения	Y 1 мΩ 40 pF
12	Ручка смещения луча по вертикали	↑ ↓
13	Переключатель коэффициента отклонения	V/ДЕЛ
14	Гнездо подключения сигнала внешней синхронизации	 Гнездо ЗАПУСКА
15	Ручка выбора уровня запуска развертки	УРОВЕНЬ
16	Ручка смещения луча по горизонтали	↔
17	Экран осциллографа	ЭЛТ

На рис. П2.3 представлены устройства управления, расположенные на задней стенке осциллографа.

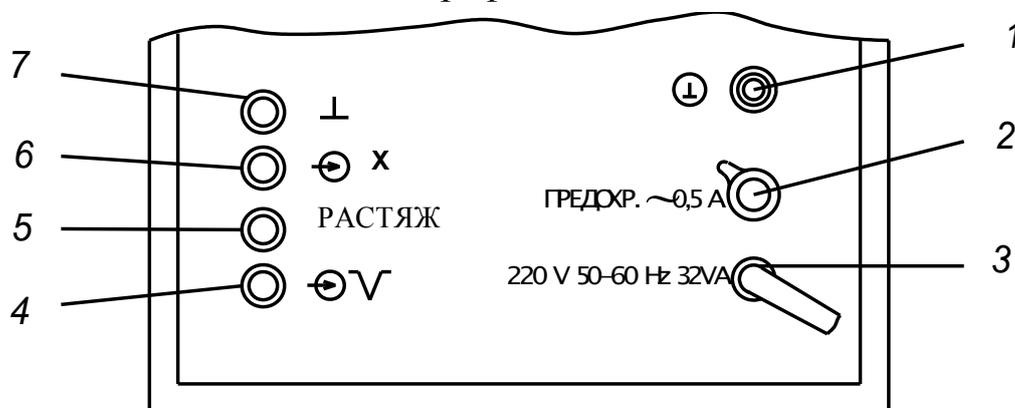


Рис. П2.3. Задняя панель осциллографа С1-94

Таблица П2.2

## Органы управления осциллографом. Задняя панель

Номер позиции	Назначение органа управления	Обозначение органа управления
1	Клемма заземления	
2	Предохранитель на 0,5 А	
3	Гнездо подключения к внешней сети	220 V 50–60 Hz 32VA
4	Выход пилообразного напряжения	
5	Изменение коэффициента усиления усилителя развертки	РАСТЯЖ
6	Подключение сигнала внешней развертки	
7	Защитное заземление корпуса	

На левой стенке прибора выведены под шлиц резисторы: «КОРР, УСИЛ» – для корректировки коэффициента отклонения, «БАЛАНС» – для балансировки усилителя вертикального отклонения.

### Блок-схема и основы действия осциллографа

На рис. П2.4 представлена блок-схема устройства осциллографа. Структурно в нее входят:

– канал вертикального отклонения (КВО), предназначенный для усиления сигнала в заданном частотном диапазоне 0–10 МГц до уровня, необходимого для получения коэффициента отклонения от 10 мВ/деление до 5 В/деление с минимальными амплитудными и частотными искажениями исследуемого сигнала на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). КВО включает: входной делитель, предварительный усилитель, линию задержки, оконечный усилитель;

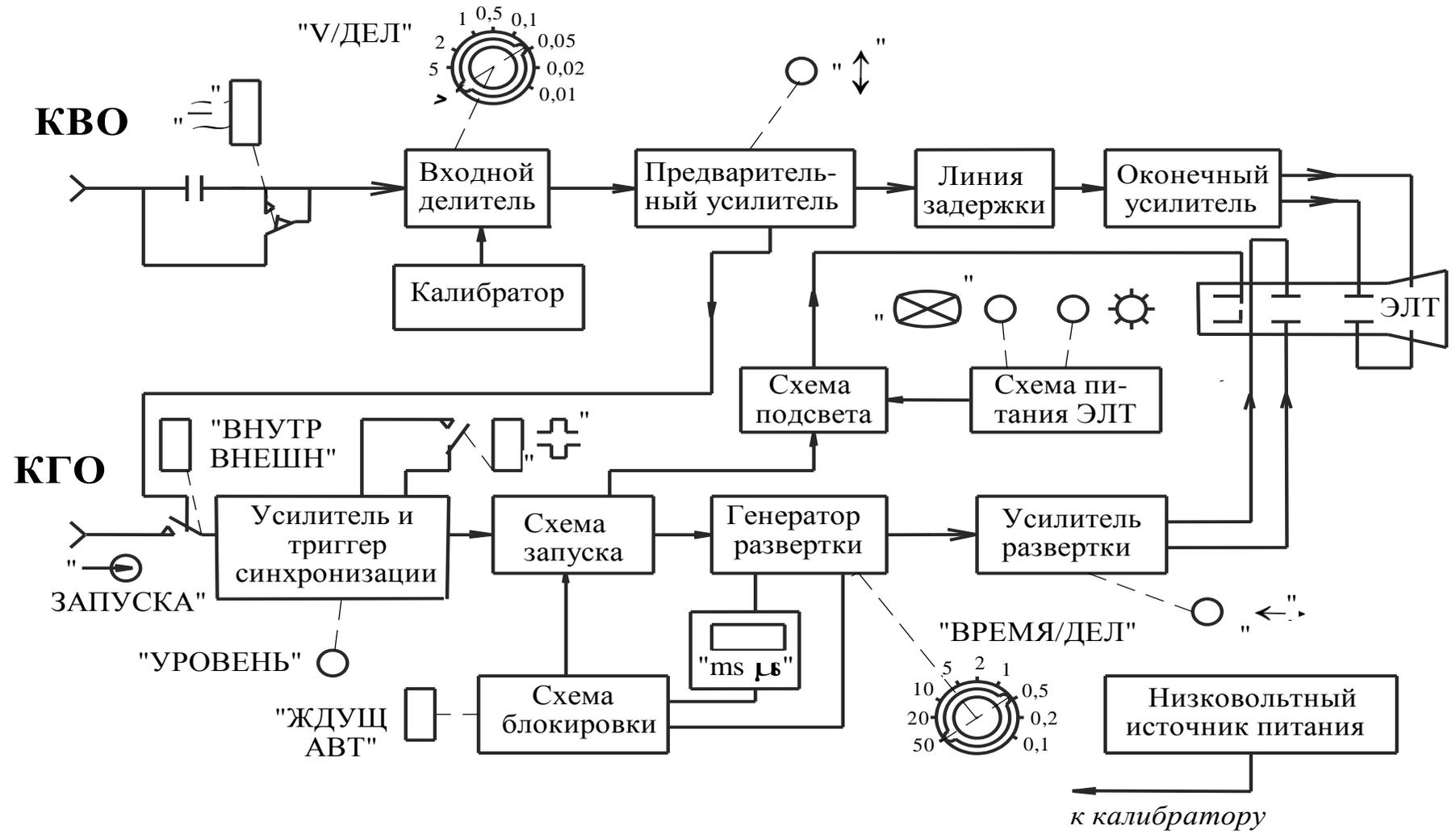


Рис. П2.4. Блок-схема устройства осциллографа С1-94

– канал горизонтального отклонения (КГО), предназначенный для обеспечения линейного отклонения луча с заданным коэффициентом развертки. КГО включает: усилитель и триггер синхронизации, схему запуска, генератор развертки, схему блокировки, усилитель развертки;

– калибратор, предназначенный для формирования сигнала, калиброванного по амплитуде и времени;

– электронно-лучевой индикатор, предназначенный для визуального исследования сигналов, включающий схему подсвета и схему питания ЭЛТ;

– низковольтный источник питания, предназначенный для обеспечения электропитанием всех функциональных устройств.

Исследуемые электрические сигналы подаются на входной разъем КВО прибора и через один из входных делителей (1 : 10 или 1 : 100) или непосредственно поступают на вход предварительного усилителя. Переключение ввода сигналов на делитель или непосредственно на предварительный усилитель осуществляется кнопочным переключателем 7 (см. рис. П2.2), что характеризуется соответственно как открытый и закрытый входы прибора. Предварительный усилитель совместно с оконечным усилителем усиливают исследуемый сигнал до величины, достаточной для наблюдения на экране ЭЛТ. Заданный диапазон коэффициентов отклонения обеспечивается схемой входного делителя и предварительного усилителя и устанавливается переключателем «V/ДЕЛ». Смещение луча по вертикали и изменение коэффициента усиления производятся предварительным усилителем ручкой « $\updownarrow$ ».

Осциллограф С1–94 имеет простейшую схему калибратора амплитуды и времени. Калибрационные сигналы видны на экране ЭЛТ при крайнем левом положении « $\blacktriangledown$ » переключателя «V/ДЕЛ».

Исследуемый сигнал из КВО со схемы предварительного усилителя поступает на вход схемы усилителя синхронизации КГО через переключатель «ВНУТР, ВНЕШН», находящийся в положении

«ВНУТР». В положении переключателя «ВНЕШН» синхронизирующий сигнал поступает на усилитель синхронизации с внешнего синхронизирующего устройства через гнездо «ЗАПУСКА».

Канал синхронизации (КГО) управляет работой генератора развертки с целью получения неподвижного изображения на экране ЭЛТ. Основными его блоками являются: усилитель и триггер синхронизации, схема запуска, генератор развертки и усилитель развертки. Усилитель синхронизации формирует уровень и полярность сигнала, идущего на схему запуска генератора развертки. Изменения уровня синхронизации производится ручкой «УРОВЕНЬ». Изменение полярности синхронизирующего сигнала осуществляется соответствующей кнопкой.

Схема запуска совместно с генератором развертки формирует линейно изменяющееся пилообразное напряжение в ждущем и автоколебательном режимах. Переключение режима работы системы запуска обеспечивается кнопкой «АВТ, ЖДУЩ». В ждущем режиме схема запуска отключена от генератора развертки. Скорость развертки сигнала, характеризуемая коэффициентом развертки, регулируется переключателями точной «ВРЕМЯ/ДЕЛ» и грубой «ms,  $\mu$ s» настройки.

Пилообразное напряжение усиливается в усилителе развертки и подается на горизонтально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки ЭЛТ. Смещение луча по горизонтали обеспечивается ручкой « $\leftrightarrow$ ».

Электронно-лучевой индикатор осциллографа позволяет наблюдать и исследовать сигналы на экране ЭЛТ. Схема питания обеспечивает ЭЛТ всеми необходимыми напряжениями, а также регулировку яркости и фокусировку луча ручками 1 и 2 (см. рис. П2.2).

В приборе предусмотрена возможность поворота ЭЛТ с экраном для нормальной ориентации положения луча. ЭЛТ с экраном может быть свободно вынута из прибора при снятии кожуха.

В приборе предусмотрена возможность подачи внешнего сигнала на усилитель развертки при положении переключателя 8 (см. рис. П2.2) в режим «ВНЕШН» и снятия пилообразного напряжения на внешние гнезда. Для этого на заднюю стенку прибора выведены гнезда 4, 5, 6 (см. рис. П2.3). Внешний сигнал подается на гнездо 6, а пилообразное напряжение снимается на гнездо 4. Гнездо 5 обеспечивает возможность изменения коэффициента усиления усилителя развертки.

### **Подготовка осциллографа к работе и проведение измерений**

*До включения прибора произведите следующие операции:*

– установите прибор на рабочее место, обеспечьте естественную вентиляцию в вертикальном направлении и свободный доступ к нему при подсоединении к питающей сети;

- соедините клемму  с шиной защитного заземления;
- убедитесь в наличии сетевого предохранителя 2 (рис. П2.3);
- установите органы управления в исходные положения; указанные в табл. П2.3, предварительно посмотрев расположение органов управления на рис. П.2.2;

Таблица П2.3

Положения органов управления, представленных на рис. П2.2  
и в таблице П.2.1, перед работой осциллографа

Органы управления	Обозначение на передней панели прибора	Исходное положение
Кнопка 3		Не нажата
Ручка 2		Среднее
Ручка 1		Среднее
Кнопка 8	ВНУТР ВНЕШН	Нажата

Окончание табл. П2.3

Органы управления	Обозначение на передней панели прибора	Исходное положение
Ручка 16	↔	Среднее
Ручка 12	↑ ↓	Среднее
Кнопка 5	АВТ ЖДУЩ	Не нажата
Кнопка 4	ms μs	Не нажата
Переключатель 6	ВРЕМЯ/ДЕЛ	«2»
Переключатель 13	V/ДЕЛ	«1»
Кнопка 9	≈	Не нажата
Кнопка 7	⊞	Не нажата
Ручка 15	УРОВЕНЬ	Среднее

– подключите вилку сетевого соединительного шнура к розетке питания.

Нажмите кнопку 3 «Включение прибора» (см. табл. П2.1).

### ***Подготовка к проведению измерений***

1. Через 5 минут после включения прибора убедитесь в его нормальном функционировании путем проверки действия основных органов управления в нижеуказанной последовательности:

– установите органы управления в положения, указанные в таблице П.2.3; на экране ЭЛТ должна появиться линия развертки;

– добейтесь органами управления 1 и 2 (см. табл. П.2.3) оптимальной яркости и фокусировки луча развертки; обратный ход луча не должен быть виден;

– сместите ручкой 16 «↔» начало развертки в левую часть экрана;

– ручкой 12 «↑» сместите луч развертки в центр экрана.

2. Прибор готов к проведению измерений через 5 мин после включения.

3. Проведите балансировку усилителя вертикального отклонения (в процессе эксплуатации сохранность балансировки периодически проверяйте и при необходимости подстраивайте резистором «БАЛАНС», выведенным под шлиц на левую стенку прибора).

Для этого:

- поставьте переключатель 13 «V/ДЕЛ» в положение «0,5»;
- поместите ручкой 12 « $\updownarrow$ » луч в центр шкалы;
- переверните переключатель 13 «V/ДЕЛ» в положение «1»;

Если луч находится не в центре экрана, то резистором «БАЛАНС» верните его в центр экрана.

Повторите подстройку несколько раз.

Считайте балансировку законченной, если луч на экране не перемещается при переключении переключателя 13 «V/ДЕЛ».

4. Откалибруйте прибор следующим образом.

Установите органы управления прибора в следующие положения:

- переключатель 13 «V/ДЕЛ» — ▲;
- переключатель 6 «ВРЕМЯ/ДЕЛ» – «2»;
- кнопку 4 «ms / $\mu$ s» — «ms»;
- кнопку 5 «ЖДУЩ, АВТ» – «ЖДУЩ»;
- кнопку 8 «ВНУТР, ВНЕШН» – «ВНУТР».

Синхронизируйте изображение ручкой 15 «УРОВЕНЬ».

Проведите подстройку калибровки прибора резистором «КОРР УСИЛ», если амплитуда калибровочных импульсов меньше или больше пяти делений по вертикали.

Считайте калибровку коэффициента отклонения законченной, если амплитуда калибровочных импульсов на экране ЭЛТ занимает 5 делений по вертикали.

Проверьте калибровку коэффициента развертки.

Проведите при необходимости подстройку коэффициента развертки резистором «КОРР РАЗВЕРТКИ».

Считайте коэффициент развертки откалиброванным, если в положении «2» переключателя 6 «ВРЕМЯ/ДЕЛ» период калибрационно-

го сигнала занимает 10 делений шкалы ЭЛТ при питании прибора от сети частотой 50 Гц или 8,3 деления при питании от сети частотой 60 Гц.

После проведенных операций считайте прибор готовым к работе и приступайте к выбору режима работы и проведению необходимых измерений.

5. Производите необходимые измерения и наблюдения по экрану ЭЛТ, снабженному прозрачной шкалой, используемой для измерений по вертикали и горизонтали.

Шкала разделена на 8 делений по вертикали и 10 делений по горизонтали (1 деление по вертикали равно 5 мм, 1 деление по горизонтали равно 6 мм).

6. Для подключения исследуемого сигнала к прибору используйте делитель 1 : 1 и 1 : 10, Применяйте делитель 1 : 1 для исследования сигналов амплитудой от  $10^{-2}$  до 30 В, при этом входной импеданс прибора 1 МОм с параллельной емкостью 40 пФ (без учета емкости кабеля). Пользуйтесь делителем 1 : 10 во всех случаях при исследовании сигналов амплитудой до 300 В, а также при необходимости увеличения входного сопротивления прибора до 10 МОм и уменьшения входной емкости до 25 пФ. При работе с делителем 1 : 10 необходимо предварительно скомпенсировать входную емкость прибора согласно методике, приведенной в п. 10 следующего раздела «Проведение измерений».

7. При работе прибора в режиме максимальных чувствительностей пользуйтесь заземлением 5.098.000.

Заземление наденьте на корпус делителя и закрепите так, чтобы винт заземления имел непосредственный контакт с экраном делителя. Присоедините крепящий винт коротким проводником к клемме заземления источника сигнала.

8. Для обеспечения синхронизации телевизионным сигналом используйте фильтр 5-067.026. Фильтр подключите к гнезду «ЗАПУСКА» 14.

## *Проведение измерений*

Прибор имеет следующие режимы работы:

– открытый вход (кнопка 9 (см. рис. П2.2) в положении  $\sim$ ) предназначен для исследования процессов, содержащих в своем спектре постоянную составляющую или низкие частоты;

– закрытый вход (кнопка 9 в положении « $\sim$ ») предназначен для исследования электрических процессов, не содержащих в своем спектре низких частот, а также для отделения постоянной составляющей.

При наблюдении исследуемых сигналов и измерении их параметров (амплитуды, частоты, временных интервалов) пользуйтесь следующими режимами работы развертки и синхронизации:

- ждущим;
- автоколебательным.

1. Выберите режим работы генератора развертки. Для обеспечения ждущего и автоколебательного режимов развертки кнопка 5 «ЖДУЩ, АВТ» устанавливается в следующие положения:

- «ЖДУЩ» – нажата;
- «АВТ» – не нажата.

2. При работе в ждущем режиме запуск и синхронизация развертки производится:

- исследуемым сигналом (кнопка 8 «ВНУТР, ВНЕШН» — нажата);
- внешним синхронизирующим импульсом (кнопка 8 «ВНУТР ВНЕШН» – не нажата).

Добейтесь четкого запуска развертки ручкой 15 «УРОВЕНЬ».

Осуществите переключателем полярности синхронизации 7 запуск развертки от положительной или отрицательной части сигнала, установив его в положение «» или «». Используйте ждущий режим при синхронизации низкочастотным сигналом.

3. Используйте автоколебательный режим работы развертки при синхронизации ее высокочастотными периодическими сигналами.

Добейтесь устойчивой и четкой синхронизации ручкой 15 «УРОВЕНЬ».

4. Примените развертку от внешнего источника, когда для горизонтального отклонения луча необходимо использовать не пилообразное напряжение генератора развертки, а посторонний сигнал; например, для измерения частот методом фигур Лиссажу, для получения синусоидального или иных форм развертки. В этом случае органы управления установите в следующие положения:

— кнопка 8 «ВНУТР, ВНЕШН» – положение «ВНЕШН»;

— кнопка 5 «ЖДУЩ, АВТ» – положение «ЖДУЩ».

Подайте развертывающее напряжение от внешнего источника на гнездо 6 «Подключение сигнала внешней развертки» (см. рис. П.2.3).

5. При измерении прибором временных интервалов пользуйтесь следующими рекомендациями:

а) установите измеряемый временной интервал ручкой 16 « $\leftrightarrow$ » в центр экрана;

б) произведите измерения либо оба по правым, либо оба по левым краям линии изображения (для уменьшения погрешности измерения за счет толщины линии луча);

в) выберите коэффициент развертки (точность измерений временных интервалов увеличивается при увеличении длины измеряемого интервала на экране ЭЛТ).

Определите измеряемый временной интервал как произведение длины измеряемого отрезка на экране по горизонтали (в делениях) на показание переключателя 6 «ВРЕМЯ/ДЕЛ», размерность определяется положением кнопки «ms/ $\mu$ s».

6. Произведите измерение частоты сигнала, измерив его период по формуле:

$$f = 1/T,$$

где  $f$  – искомая частота сигнала, Гц;  $T$  – измеряемый период сигнала, с.

Измерьте размер целого числа периодов сигнала (в делениях), укладываемых наиболее близко к 10 делениям шкалы.

Например, пусть 5 периодов занимают расстояние 9 делений шкалы при коэффициенте развертки  $2\mu\text{s}/\text{деление}$ .

Тогда искомая частота сигнала:

$$T = \frac{n}{\ell T_p},$$

где  $n$  — число измеренных периодов;  $\ell$  — расстояние, которое занимают измеренные периоды, деление;  $T_p$  — коэффициент развертки на измеряемом диапазоне, с/деление.

Определите частоту методом фигур Лиссажу, для чего:

– подайте на вход усилителя вертикального отклонения сигнал, частоту которого необходимо измерить, а на вход усилителя горизонтального отклонения напряжение от генератора образцовой частоты. При сближении частот на экране появляется вращающийся эллипс, остановка которого указывает на полное совпадение частот. При кратном соотношении частот на экране получается более сложная фигура, причем частота по вертикали как относится к частоте по горизонтали, так число точек касания по горизонтали относится к числу точек касания к касательной по вертикали.

7. При измерении прибором амплитуды исследуемых сигналов с большей точностью пользуйтесь следующими рекомендациями:

а) совместите ручками 12 « $\updownarrow$ » и 16 « $\leftrightarrow$ » сигнал с делениями шкалы, так чтобы было удобно проводить измерения;

б) проводите измерения либо оба по нижним, либо оба по верхним краям линий изображения (для уменьшения погрешности измерения за счет толщины линии луча);

в) выбирайте положение переключателя 13 «V/ДЕЛ» таким, чтобы размер исследуемого сигнала получался наибольшим в пределах рабочей части экрана.

Величина исследуемого сигнала в вольтах равна произведению измеренной величины изображения (в делениях), умноженной на цифровую отметку показаний переключателя «V/ДЕЛ».

Умножьте на 10 полученный результат при работе с делителем 1 : 10.

8. Компенсация входной емкости прибора с делителем 1 : 10 производится следующим образом:

– поставьте органы управления прибора в следующие положения: «ВРЕМЯ/ДЕЛ» – «20»; «V/ДЕЛ» – «0,05»; ms /  $\mu$ s» – «ms»; «ВНУТР, ВНЕШН» – положение «ВНЕШН»;

– от генератора Г5-53 подайте сигнал на вход прибора через делитель 1 : 10, а синхронизирующий сигнал на гнездо ЗАПУСКА 4. Длительность входного сигнала 100 мкс, период 500 мкс;

– вращением подстроенного конденсатора У4-С2 на делителе добейтесь минимального перекоса вершины импульса.

### **Техника безопасности при работе с осциллографом**

К работе с прибором допускаются лица, ознакомившиеся с техническим описанием и инструкцией по эксплуатации прибора, а также прошедшие инструктаж по технике безопасности. В приборе имеется напряжение, опасное для жизни.

При работе с осциллографом выполняйте следующие основные правила техники безопасности.

1. Заземлите корпус осциллографа перед подключением к источнику питания. Работа с прибором без заземления категорически запрещена. В приборе имеются напряжения минус 2000 В, 100 и 200 В, опасные для жизни, поэтому при эксплуатации, контрольно-профилактических и регулировочных работах, производимых с прибором, строго соблюдайте соответствующие меры предосторожности.

Во избежание электрического удара в особо опасном месте прибора установлен защитный щиток и нанесен предупредительный знак.

2. При работе прибора совместно с другими приборами необходимо соединить заземленную клемму 10 с соответствующими клеммами других приборов.

3. Не используйте прибор в местах, где существует сильное магнитное или электрическое поле. Такие поля могут нарушить точность измерений.

4. Старайтесь не подвергать себя воздействию высокого напряжения – это опасно для жизни. Снимайте защитный кожух и экраны только по мере необходимости. Не касайтесь высоковольтных конденсаторов сразу, после выключения прибора.

5. Постарайтесь использовать только одну руку (правую), при регулировке цепей, находящихся под напряжением. Избегайте небрежного контакта с любыми частями оборудования, потому что эти касания могут привести к поражению высоким напряжением.

6. При использовании пробника, касайтесь только его изолированной части.

7. Постарайтесь изучить цепи, с которыми Вы работаете, для того чтобы избегать участков с высокими напряжениями. Помните, что электрические цепи могут находиться под напряжением даже после выключения оборудования.

8. Металлические части оборудования с двухпроводными шнурами питания не имеют заземления. Это не только представляет опасность поражения электрическим током, но также может вызвать повреждение оборудования.

9. Оберегайте осциллограф от попадания на корпус бензина, толуола, ксилола, ацетона или подобных растворителей. Для чистки осциллографа, используйте мягкую ткань, смоченную спиртом или водой. Не используйте абразив для чистки загрязнённых поверхностей осциллографа.



*Никифоров Валерий Иванович*  
*Барон Юрий Михайлович*  
*Коротких Михаил Тимофеевич*

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И  
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ**  
**Лабораторный практикум**

Лицензия ЛР 020593 от 07.08.1997

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции  
ОК 005-93, т. 2; 95 3004 — учебная литература

---

Подписано в печать	Формат	Печать	
Усл. печ. л.	Уч.-изд. л.	Тираж	Заказ

---

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного авторами,  
в Цифровом типографском центре Издательства Политехнического  
университета:

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29.

Тел.: (812) 550-40-14

Тел./факс: (812) 297-57-76