

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Институт высокоточных систем им. В.П.Грязева
Кафедра «Электротехника и электрооборудование»

Утверждено на заседании кафедры
«Электротехника и электрооборудование»
« 31 » августа 2020 г., протокол № 1

Заведующий кафедрой
_____ *А.Э. Соловьев*

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению практических занятий
по курсу “ Основы электротехнологии ”

основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы бакалавриата

по направлению подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
с направленностью (профилем)
Электрооборудование и электрохозяйство предприятий,
организаций и учреждений

Формы обучения: *очная, заочная*

Идентификационный номер образовательной программы: 130302-01-20

Тула 2020 год

Сборник методических указаний по проведению практических занятий составлен профессором кафедры ЭТЭО Климовым С.А. и обсужден на заседании кафедры *электротехника и электрооборудование* ИВТС им. В.П.Грязева

Протокол № 1 от «31» августа 2020г.

Зав. кафедрой ЭТЭО _____ **А.Э.Соловьев**

Введение.

Курс «Основы электротехнологии» является одной из технических дисциплин, изучаемых студентами по направлению «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений». Он является базовым для конструкторско-технологической подготовки студентов и для последующего использования ими средств вычислительной техники и современных пакетов прикладных программ при проектировании и расчете сложных электротехнических устройств, выполнении курсовых и дипломных проектов.

Практические занятия позволяют студентам закрепить и самостоятельно углубить знания по отдельным разделам курса.

Настоящие методические указания помогут организовать проведение практических занятий и самостоятельную работу студентов по данному курсу, а также могут быть использованы студентами направления 13.02 при выполнении курсовых и контрольных работ и проектов.

1 Цель, задачи и порядок проведения практических занятий.

Основной целью ПЗ является:

- систематизация, расширение теоретических знаний и практических навыков при расчете и проектировании конкретных электротехнических устройств - электродов-инструментов для электроэрозионной обработки;
- развитие навыков самостоятельной работы с научно – технической литературой, патентами (авторскими свидетельствами) и ГОСТами при решении конкретных инженерных задач;
- развитие навыков разработки и оформления технической документации.

Практические занятия проводятся в течение одного семестра и ориентированы на выполнение студентами контрольной работы.

В соответствии с темой практического занятия каждому студенту выдается индивидуальное задание, которое он выполняет в аудитории и дома. Каждый раздел задания студенты защищают. Практические занятия проводятся в следующей последовательности:

- разбор домашнего задания;
- выдача нового домашнего задания, пояснения по теме;
- опрос студентов по изучаемой теме;
- разбор решения задач (проводят студенты);
- разбор наиболее сложных разделов темы преподавателем, ответы на вопросы.

При проведении практических занятий важное значение приобретает организация самостоятельной работы студентов и непрерывного контроля их знаний. С этой целью преподаватель задает на дом задачи по изучаемой теме и рекомендует литературу, где наиболее подробно рассмотрена данная тема.

Решение отдельных этапов задания студенты оформляют в рабочей тетради и объясняют ее решение своим товарищам. После объяснения решения задачи докладчик отвечает на вопросы студентов.

При опросе студентов преподаватель учитывает их ответы на вопросы и в конце занятия ставит зачет по изучаемой теме. Студенты, не получившие зачет, сдают эту тему дополнительно.

В конце занятия преподаватель рассматривает наиболее трудные моменты темы и отвечает на вопросы студентов.

На последнем занятии проводится контрольная (зачетная) работ, заключающаяся в обсуждении рабочего чертежа электрод-инструмента.

2. Темы практических занятий.

В качестве тем для практических занятий выбраны основные темы, которые в дальнейшем будут использованы студентами при выполнении контрольной работы по данному курсу.

Практические занятия проводятся по следующим темам:

1. РАЗРАБОТКА СХЕМ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ ФОРМООБРАЗОВАНИЕМ

Занятия предназначены для закрепления студентами знаний, полученных по курсу, для расширения границ их информированности по специальности, развития у них навыков подготовки исходной информации для проектирования и разработки технологических процессов изготовления деталей.

Занятия проводятся как групповые, и предполагают самостоятельную работу студентов по индивидуальным заданиям под непосредственным контролем (руководством) преподавателя.

ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ.

Выдается студентам по вариантам в виде рабочего чертежа объекта, детали. Необходимая дополнительная информация выбирается студентами самостоятельно или по согласованию с преподавателем.

СТРУКТУРНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ЗАДАНИЯ.

Задание включает разделы:

- Набор признаков формируемого объекта;
- Анализ геометрических характеристик формируемого объекта;
- Составление классификатора признаков объекта;
- Выбор электролитной среды;
- Выбор схемы электролизера;
- Выбор кинематической схемы;
- Выбор гидродинамической схемы;
- Расчет (выбор) режимов технологического процесса.
- Разработка технологической операции ВЭФ.

УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАНИЯ.

План построения и содержание работы

Введение.

1. Набор признаков формируемого объекта.

Свойства любого создаваемого объекта можно условно разделить на две группы: набор свойств, принадлежащих поверхности ($\Gamma_n \pm \Delta \Gamma_n$; $\Phi_n \pm \Delta \Phi_n$; $X_n \pm \Delta X_n$; $M_n \pm \Delta M_n$) и распределенных на ней определенным образом, и набор свойств внутри объекта: ($\Gamma_v \pm \Delta \Gamma_v$; $\Phi_v \pm \Delta \Phi_v$; $X_v \pm \Delta X_v$; $M_v \pm \Delta M_v$). При этом задаются их основные значения и возможный диапазон изменения.

Студентам выдаются (предлагаются) для анализа чертежи деталей (объектов).

Для оценки свойств создаваемого объекта разработан классификатор признаков, позволяющий выявить характерные и наиболее важные из них для последующего использования при проектировании схем высокоэффективного электролитического формирования (ВЭФ).

Следующая группа факторов, определяющих возможность создания объекта, представляет собой его химические параметры ($X_j \pm \Delta X_j$):

X- химсостав :

X_1 - однокомпонентный;

X_2 - многокомпонентный (X_{2i} - % содержание i-го компонента в осадке);

X_3 - многослойный ("п"одно- или многокомпонентных слоев).

Набор физических свойств объекта представлен следующими показателями: ($\Phi_k \pm \Delta \Phi_k$): Φ_1 - электропроводность; Φ_2 - пористость; Φ_3 -адгезия; Φ_4 - паяемость и т.д.

Механические параметры ($M_n \pm \Delta M_n$): M_1 - внутренние напряжения (M_{11} - положительные; M_{12} - отрицательные; M_{13} - нулевые); M_2 - относительное удлинение; M_3 - твердость; M_4 - микротвердость; M_5 - предел прочности и т.д.

В результате анализа студентами определяются основные признаки создаваемого объекта и допустимые диапазоны их изменения.

2. Анализ геометрических характеристик формируемого объекта.

Геометрические факторы, определяющие возможность создания объекта с заданными характеристиками ($\Gamma_i \pm \Delta \Gamma_i$), предложено ранжировать по значимости следующим образом:

A - площадь осаждения, см^2 : $A_1 \leq 100$; $100 \leq A_2 \leq 500$; $A_3 \geq 500$.

B - вид поверхности ;

V₁ - плоские и малой кривизны : **V**₁₁ - $a/b \approx 1$; **V**₁₂ - $a \gg b$; **V**₁₃ - $a \ll b$, где a - длина; b - ширина формируемой поверхности;

V₂ - симметричные поверхности : **V**₂₁ - цилиндрические (**V**₂₁₁ - $l/d \leq 1$; **V**₂₁₂ - $l/d \geq 1$, где l - длина объекта; d - диаметр); **V**₂₂ - конические ; **V**₂₃ - сферические; **V**₂₄ - параллелепипед (**V**₂₄₁ - $a \approx b \approx h$; **V**₂₄₂ - $a \approx b \leq h$; **V**₂₄₃ - $a \approx b \geq h$); **V**₂₅ - комбинация симметричных поверхностей;

V₃ - асимметричные поверхности :

V₄ - сложнофасонные поверхности;

C - наличие пазов : **C**₁ - мелкие пазы $h \ll b$ (h - глубина паза; b - характерный размер паза) ; **C**₂ - средние пазы $h \approx b$; **C**₃ - глубокие пазы $h \gg b$;

D - сплошность осадка на поверхности (**D**): **D**₁ - есть (1); **D**₂ - нет (0);

E - толщина осадка, мкм : $E_1 \leq 10$; $10 \leq E_2 \leq 100$; E_3 - свыше 100 ;

F - разнотолщинность: $F_1 - \leq 10 \%$; $10 < F_2 < 50 \%$; $F_3 - \geq 50 \%$;

G - шероховатость: **G**₁ - естественная; **G**₂ - искусственная; **G**₃ - наследственная;

J - наличие рельефа: **J**₁ - микрорельеф: (**J**₁₁ - на всей поверхности; **J**₁₂ - на части поверхности); **J**₂ - макрорельеф (**J**₂₁ - на всей поверхности; **J**₂₂ - на части поверхности).

Студенты составляют в соответствии с разработанным классификатором набор геометрических признаков с указанием приоритетных значений.

3. Составление классификатора признаков объекта.

В результате составления классификатора признаков создаваемого объекта готовятся исходные данные для разработки технологической схемы ВЭФ.

4. Выбор электролитной среды.

Уровень электролитных сред с набором основных химических и физических свойств представляет собой проекцию всех возможных вариантов сочетаний этих свойств на единую ось параметров (база данных).

Свойства межэлектродной среды могут изменяться или оставаться постоянными как в пространстве, так и во времени (прил.).

При этом возможны следующие комбинации постоянства и переменности свойств электролита:

1 - постоянные свойства во времени и переменные в пространстве;

2 - переменные во времени и постоянные свойства в пространстве;

3 - последовательное чередование переменных и постоянных свойств во времени;

4 - последовательное чередование постоянных и переменных свойств в пространстве.

Для реализации всех рассмотренных выше вариантов свойств межэлектродной среды возможны следующие пути:

- стабилизация параметров среды;
- задание закона изменения или распределения свойств среды во времени и в пространстве.

По результатам анализа выбранного набора физико-химико-механических и геометрических свойств формируемого объекта студенты осуществляют выбор электролита.

5. Выбор схемы электролизера.

Выбор схемы электролизера зависит от целого ряда параметров, связанных с будущими свойствами формируемого объекта.

Уровень схем электролизеров включает матрицы вариантов схем электролизеров с эквидистантными и неэквидистантными основными электродами (ОЭ) при наличии или отсутствии дополнительных электродов (ДЭ) и изолирующих экранов (ИЭ), в которых варьируется количество и расположение всех элементов схемы.

Количественные характеристики, определяющие взаимное расположение основных электродов (M_i) через соответствующие углы $\angle \gamma_i$; дополнительных электродов (N_j) через $\angle \alpha_j$, а изолирующих экранов (K_m) через $\angle \beta_m$, позволяют синтезировать варианты схем электролизеров в виде матриц.

Для конкретной детали в соответствии с составленным с помощью классификатора набором признаков студенты создают (синтезируют) схему электролизера согласно алгоритму.

6. Выбор кинематической схемы.

Уровень кинематических схем включает все варианты кинематических схем, обеспечивающих возможность перемещения (вращения) одного или нескольких электродов в одном или нескольких направлениях и подразумевает подвижность или неподвижность любого из элементов схемы.

Уровень кинематических схем может быть представлен проекцией всех вариантов движений на единую ось.

Н	П	ВПJ	ВРJ	ВПJ+ВРJ	ВПJДЭi	ВРJДЭi	ВПJДЭi + ВРJДЭi	ВПJИЭj	ВРJИЭj	ВПJИЭj+ВРJИЭj
---	---	-----	-----	---------	--------	--------	-----------------	--------	--------	---------------

При этом приняты следующие обозначения:

Н - элемент схемы неподвижен;

П - элемент подвижен в одном направлении;

ВПJ - возвратно-поступательное движение элемента в j-том направлении;

ВРJ - вращательное движение элемента в j-том направлении ;

ДЭi - i- й дополнительный электрод;

ИЭj - j- й изолирующий экран.

Из анализа вариантов движений применительно к основным и дополнительным элементам электролизера составить множество кинематических схем, которые позволят с одной стороны организовать, например, последовательное, одновременное или комбинированное формование объекта или слоя, а с другой - создать условия для более интенсивного осаждения металлов и сплавов.

В качестве примера предлагается рассмотреть варианты взаимных перемещений анода $F_a = f(x, y, z, t)$ и катода $F_k = f(x, y, z, t)$ в системе координат, связанной с электролизером (x, y, z) .

7. Выбор гидродинамической схемы.

Уровень гидродинамических схем предусматривает проекцию всех вариантов схем подачи электролита в зону обработки.

Анализ возможных вариантов гидродинамических схем применительно к электролизерам показал, что наряду с обработкой в неподвижном электролите (стационарные ванны) широкое распространение получили электролизеры с перемешиванием электролита (барботаж, магнитные и механические мешалки, струйная обработка и т.д.), а также их комбинация во времени и пространстве. При этом подвижный электролит может подаваться локально, распределенно по поверхности или в комбинации. Кроме того, на процесс осаждения металлов и сплавов влияет характер течения электролита: ламинарный или турбулентный, поэтому поток можно еще охарактеризовать направлением его движения.

Количество локальных потоков электролита в схеме может изменяться от 1 до N, распределенных от 1 до K, а комбинированных от 1 до J. При этом они еще характеризуются направлением движения $V_x; V_y; V_z; V_{xy}; V_{xz}; V_{yz}; V_{xyz}$. Кроме того, необходимо учитывать, что направление потока электролита по отношению к формируемой поверхности может быть параллельным, перпендикулярным или под углом к ней.

В соответствии с заданными свойствами формируемого объекта выбирается соответствующая схема гидравлического потока.

8. Расчет (выбор) режимов технологического процесса.

Уровень режимов включает следующие составляющие:

- электрические параметры (**ЭЛ** - плотность тока, **ЭЛQ** - скважность, **ЭЛF** - частота следования импульсов);
- физико-химические (**Ф1...ФМ**: температура электролита, концентрация ионов осаждаемого металла, электропроводность; **X1 ... XK**: химсостав, pH, добавки и т.д.);
- гидродинамические (**ГД1 ... ГДK**: расход, давление электролита, скорость истечения и т.д.).

Электрические режимы предусматривают возможность применения как постоянного, так и импульсного токов, а также реверсивного с различным соотношением анодной и катодной составляющих. При этом надо учитывать, что форма импульсов может быть прямоугольной, трапецевидной, синусоидальной, треугольной и т.д. Кроме того, на этом уровне необходимо предусмотреть возможность комбинации вариантов формы и амплитуды тока как во времени, так и в пространстве.

9. Разработка технологической операции ВЭФ.

Уровень принятия решения необходим для выбора схемы электролитического формования объекта из нескольких возможных вариантов с оформлением технической документации или повтора цикла с внесением корректив на различных уровнях.

Условия перехода на каждом уровне устанавливаются в зависимости от требований к создаваемому объекту. Например, при выборе схемы электролизера условием перехода является равномерность распределения перепада плотностей тока на поверхности создаваемого объекта. В случае выбора кинематической схемы условием перехода может быть необходимость движения одного или нескольких элементов электролизера, а также возможность реализации схемы, а при назначении гидродинамического режима это допустимая неравномерность распределения скорости электролита в МЭЗ и т.д.

Алгоритм синтеза схем ВЭФ приведен на рис.1.

Таким образом, на конкретных примерах определены количество и требуемые характеристики различных уровней схем для реализации системного анализа при создании высокоэффективного электролитического формования объектов с заданными физико-химико-механическими свойствами и геометрическими характеристиками.

Разработанный метод синтеза схем высокоэффективного электролитического формования апробирован при разработке методов, технологий и оборудования для изготовления различных объектов с заданными или программируемыми физико-химико-механическими и геометрическими характеристиками.

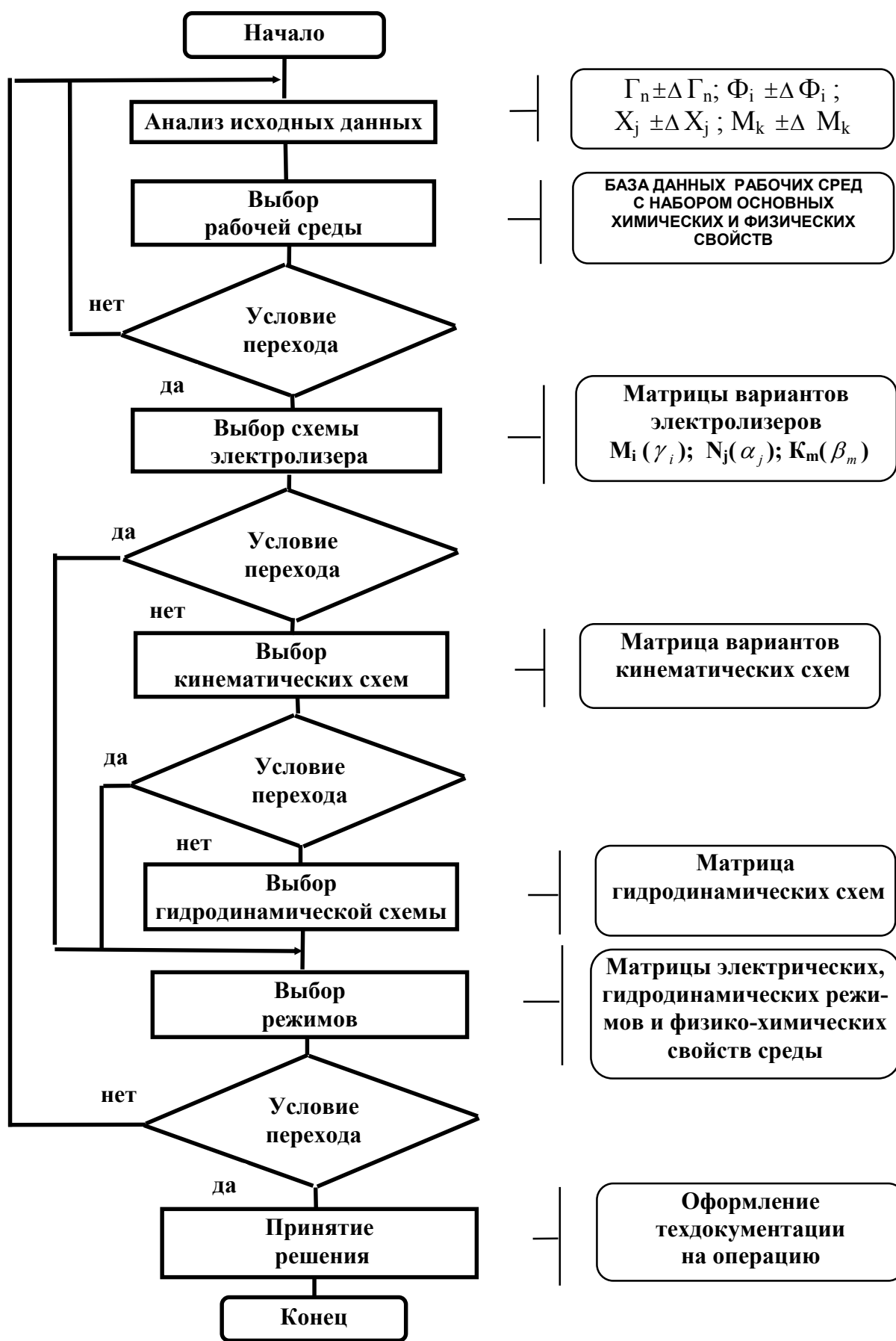


Рис. Алгоритм синтеза схем электролитического формования

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДОВ-ИНСТРУМЕНТОВ

2.1. Материалы для электродов-инструментов

Удаление материала в процессе ЭЭО происходит за счет импульсного выделения электрической энергии непосредственно в зоне обработки. В, связи с малой, длительностью импульса ($t_u < 10^{-3}$) и выделением электрической энергии на ограниченной по размерам поверхности, температура в канале разряда доходит до 100000°C . В результате как с обрабатываемой заготовки так и с электрода-инструмента удаляется порция металла частично в испаренном, частично в расплавленном состоянии. При этом разрушение электродов (заготовки и электрода-инструмента) происходит неодинаково. Превышение. величины эрозии одного из электродов над другим носит название эффекта полярности. Количественным критерием эффекта полярности служит величина относительной эрозии катода.

$$\Delta \gamma_k = \frac{\gamma_k}{\gamma_a} \quad (1)$$

где: γ_k и γ_a - объем металла, удаленный за равный промежуток времени с катода и анода соответственно.

Принято считать, что полярность эрозии положительна, если $\Delta \gamma_k < 1$ и отрицательна, если $\Delta \gamma_k > 1$. При положительной полярности электрод-инструмент подключается к отрицательному полюсу источника питания, а заготовка - к положительному. Такое включение электродов называют прямым, а полярность электродов - прямой. При отрицательной полярности электрод-инструмент подключается к положительному полюсу источника питания, а заготовка - к отрицательному. Такое включение электродов называют обратным, а полярность электродов - обратной.

Износ электрода-инструмента зависят от многих факторов. Он определяется тепловым разрушением, механическим износом за счет истирания частицами, перемещаемыми потоком рабочей жидкости, а также явлением восстановления размера электрода-инструмента за счет отложения углерода при разложении рабочей жидкости и за счет переноса материала обрабатываемой заготовки на рабочую поверхность электрода-инструмента. Однако, тепловое разрушение является фактором, определяющим стойкость электрода-инструмента. Если тепловые явления определяют износ электрода-инструмента, величина его эрозии зависит от теплофизических характеристик материала электрода-инструмента. Качественно физический смысл такой связи можно показать следующим образом. На удаление за один импульс порции металла в расплавленном состоянии затрачивается количество тепла Q , которое равно:

$$Q = c \cdot \gamma I \cdot (T_{пл} - T_0) + \gamma_i \cdot q_{пл} \quad (2)$$

Или, учитывая, что

$$\gamma_i = \frac{Q}{c T_{пл} + q_{пл}} = \frac{Q}{q_{пл}^n} \quad (3a)$$

Для предварительной оценки соотношения можно записать:

$$\gamma_i \approx \frac{Q}{c T_{пл}} \quad (3b)$$

- где: C - удельная теплоемкость, $T_{пл}$ - температура плавления, T_0 - исходная температура заготовки, $q_{пл}$ - скрытая теплота плавления, $q_{пл}^n$ - полная теплота плавления

Принимая во внимание равенства 1 и 3, получим для случая преобладающего удаления металла в испаренном состоянии (при ЭЭО импульсами малой длительности, условно при $t_u < 10^{-5}$ с)

$$\Delta \gamma_3 = \frac{\gamma_3}{\gamma_3} = \frac{Q_3 \cdot q_{исп.3}^n}{q_{исп.3}^n \cdot Q_3} \quad (4a)$$

или для предварительной оценки

$$\Delta\gamma_{\text{э}} = \frac{Q_{\text{э}} * T_{\text{исп.з}} * C_{\text{з}}}{T_{\text{исп.э}} * Q_{\text{з}} * C_{\text{э}}} \quad (46)$$

где – $q_{\text{исп}}^{\text{п}}$ полная теплота испарения, $T_{\text{исп}}$ - температура испарения, $Q_{\text{э}}$, $Q_{\text{з}}$ - кол-во тепла, выделяемого во время электрического разряда на электроде-инструменте и заготовке соответственно.

Для случая, когда металл в основном удаляется в расплавленном состоянии (при ЭЭО импульсами большой длительности, условно при $t_u > 10^{-4}$ с) имеем:

$$\Delta\gamma_{\text{э}} = \frac{\gamma_{\text{э}}}{\gamma_{\text{з}}} = \frac{Q_{\text{э}} * q_{\text{пл.з}}^{\text{п}}}{q_{\text{пл.э}}^{\text{п}} * Q_{\text{з}}} \quad (5a)$$

или для предварительной оценки

$$\Delta\gamma_{\text{э}} = \frac{Q_{\text{э}} * T_{\text{пл.з}} * C_{\text{з}}}{T_{\text{пл.э}} * Q_{\text{з}} * C_{\text{э}}} \quad (5б)$$

Выражения 4 и 5 по фамилии автора получили название критерии Золотых [2, 3]. В выражениях 4 и 5 индексы "э" и "з" относятся соответственно к электроду-инструменту и обрабатываемой заготовке.

Вышеизложенное позволяет с научных позиций подойти к выбору материала электрода-инструмента.

Так как процесс ЭЭО является электрическим, то естественно, что материал электрода-инструмента должен обладать малым удельным сопротивлением» т.е. высокой электропроводностью. Из критерия Золотых (выражения 4,5) следует, что для уменьшения износа электрода-инструмента необходимо обеспечить:

$$\begin{aligned} q_{\text{пл.э}}^{\text{п}} &> q_{\text{пл.з}}^{\text{п}} \\ q_{\text{исп.э}}^{\text{п}} &> q_{\text{исп.з}}^{\text{п}} \end{aligned} \quad (6a, 6б)$$

Для грубой оценки материала можно пользоваться следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} T_{\text{пл.э}} &> T_{\text{пл.з}} \\ T_{\text{исп.э}} &> T_{\text{исп.з}} \end{aligned} \quad (7a, 7б)$$

При ЭЭО импульсами малой длительности значительная часть энергии поступает на поверхность электрода-инструмента факелами, перемещающимися от места выделения энергии на обрабатываемой заготовке. В связи с этим, для уменьшения энергии, выделяемой на электроде-инструменте, необходимо, чтобы скорость перемещения паров металла (факелов) электрода-инструмента была больше скорости паров металла (факелов) обрабатываемой заготовки.

Это требование можно записать в виде:

$$M_3 > M_2 \quad (8)$$

где: $M = \frac{V_{cp}}{V_0}$ - число Маха, равное отношению скорости перемещения факелов к скорости

звука в данной среде.

Температуропроводность «а» материала электрода-инструмента оказывает существенное влияние на его стойкость. Известно, что для получения максимальной производительности необходимо использовать соответствующую длительность импульса при данной энергии W_u . Отсюда следует, что материал электрода-инструмента необходимо выбирать таким образом, чтобы максимальная величина его эрозии была сдвинута в сторону более длительных импульсов при данном W_u . С точки зрения теплофизических свойств материала электрода-инструмента необходимо выполнить следующее требование:

$$a_3 > a_2 \quad (9)$$

Эти требования к материалу электрода-инструмента, установленные Б. И. Золотых, находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

Многочисленные исследования показали, что наиболее подходящими материалами для изготовления электродов-инструментов являются медь М1, М2, М3, графитированный материал ЭЭГ, МПГ-6. Во многих случаях в качестве материала электрода-инструмента используются различные композиционные материалы, состоящие из элементов, имеющих высокие температуры плавления и испарения (W, Mo, C и др.) и высокую электропроводность, главным образом, медь. К таким материалам относятся меднографитовые, вольфрамомедные и другие композиции.

2.2. Сведения об износе электродов-инструментов

Различают весовой, объемный и линейный износ электрода-инструмента. Отсюда относительный износ электрода-инструмента характеризует долю веса, объема или толщины слоя металла, удаляемого с электрода-инструмента, по отношению соответственно к весу, объему или припуску, удаленному с обрабатываемой заготовки за равный промежуток времени.

На рисунке 1 показан электрод-инструмент 1, внедренный в обрабатываемую заготовку 2. Объем АБВГ высотой h_3 при ЭЭО удален с электрода-инструмента и характеризует собой его износ. За Время ЭЭО с заготовки удален объем металла ДЕЖЗ толщиной h_3 . Относительный износ электрода-инструмента в общем виде можно записать следующим образом:

$$\Delta\gamma_3 = \frac{\gamma_3}{\gamma_3} \quad (10)$$

Весовой, объемный и линейный относительный износ соответственно можно записать:

$$\begin{aligned} \Delta\gamma_{\text{эв}} &= \frac{G_3}{G_3}; \quad \Delta\gamma_{\text{эв}} = \frac{V_3}{V_3} = \frac{G_3 * d_3}{G_3 * d_3} \\ \Delta\gamma_{\text{эв}} &= \frac{h_3}{h_3} = \frac{V_3 * S_3}{V_3 * S_3} = \frac{G_3 * d_3 * S_3}{G_3 * d_3 * S_3} \end{aligned} \quad (11)$$

где: G, V, h - соответственно обозначают вес, объем и толщину слоя металла, удаленного с электрода-инструмента (индекс э) и обрабатываемой заготовки (индекс з);

d - плотность;

S_3, S_3 - площадь поперечного сечения электрода-инструмента и площадь углубления, полученного в результате внедрения электрода-инструмента в заготовку.

Указанные методы определения износа электрода-инструмента позволяют получить некоторое среднее его значение, хотя известно, что электрод-инструмент изнашивается неравномерно. В большей степени подвергаются износу ребра, образованные пересечением торцевой и боковой поверхности а также боковых поверхностей электрода-инструмента, и особенно участки, которые имеют малое поперечное сечение. На рис. 2 - показан электрод-инструмент с трапецидальным поперечным сечением до I и после 2 ЭЭО.

В зависимости от материала электродов и режима ЭЭО величия относительного объемного износа электрода-инструмента изменяется в значительных пределах. Так, в частности при ЭЭО стальных деталей электродом-инструментом из графитированного материала износ изменяется от 0 до 20%, а медных - от I до 50% в зависимости от режима обработки. При этом больший износ соответствует мягким

режимам ЭЭО. Износ медных электродов-инструментов при ЭЭО твердых сплавов находится в пределах от 20 до 100%.

Несмотря на то, что знание величины износа электрода-инструмента крайне необходимо для правильного определения его размеров, аналитических методов расчета износа пока не существует. В литературе приведены многочисленные экспериментальные данные по износу электрода-инструмента от различных факторов [4-6 и др.]

2.3. Медэлектродный зазор

Электрод-инструмент 1 при внедрении в обрабатываемую заготовку 2 копирует в ней свою форму (рис. 3). При этом между торцевыми и боковыми поверхностями электрода-инструмента и обрабатываемой заготовки образуются зазоры, обозначаемые соответственно l_t и l_b . В связи со случайными колебаниями режима обработки и условий протекания процесса размеры указанных зазоров изменяются в некоторых пределах. Так, поле рассеивания зазора между боковыми поверхностями равно $l_{b\max}-l_{b\min}=\delta_b$ а торцевыми $l_{t\max}-l_{t\min}=\delta_t$. Среднее значение бокового и торцевого зазоров соответственно обозначается $l_{b\text{ср}}=l_b$ и $l_{t\text{ср}}=l_t$. Следует отметить, что величина l_b находится в зависимости от наклона боковых поверхностей электрода-инструмента и заготовки, что связано с характером распределения продуктов эрозии в зоне обработки. При угле наклона, меньшем 90° , результирующая сила P , воздействующая на продукты эрозии, складывается из силы тяжести G_t , подъемной силы G_n силы воздействия со стороны потока P_n рабочей жидкости. В итоге сила P будет способствовать концентрации продуктов эрозии у поверхности обрабатываемой заготовки. При угле, приближающемся к 90° , продукты эрозии будут более равномерно распределяться в межэлектродном промежутке. Следовательно, в обоих случаях фактическая величина межэлектродного промежутка $l_{\text{пр}}$, который может быть пробит электрическим разрядом, будет меньше величины l_b сумму размеров продуктов эрозии $\sum d_i$, расположенных в данном сечении, т.е.

$$l_{\text{пр}}=l_b-\sum d_i \quad (12)$$

при этом с ростом угла наклона боковых поверхностей увеличивается в данном сечении объем продуктов эрозии, что ведет к росту вероятности возникновения дополнительных разрядов. Значит, в этом случае с обрабатываемой поверхности будет снят больший слой металла. Отсюда следует, что $l_6 > l_a > l_T > l_{пр}$.

Размеры l_6 и l_T зависят от режима обработки, материала электрода-инструмента и обрабатываемой заготовки, глубины внедрения электрода-инструмента в заготовку и др. факторов.

Так как межэлектродные зазоры имеют различную величину между вертикальными, горизонтальными и наклонными поверхностями электрода-инструмента и обрабатываемой заготовки, то рабочий профиль электрода-инструмента должен рассчитываться раздельно для вертикальных, горизонтальных и наклонных участков.

На рис. 4 приведена принципиальная зависимость l_6 , l_T и δ_6 , δ_T от энергии импульса. При использовании мягких режимов обработки l_6 находится в пределах нескольких сотых долей мм (при $W_u=0,0002$ Дж $l_6=0,028$ мм при обработке твердого сплава латунным электродом-инструментом $l_6=0,03$ мм – медным и $l_6=0,04$ мм электродом-инструментом из серого чугуна, СЧ18-36). При обработке твердосплавных деталей на грубом режиме ($W_u=0,2$ Дж) боковой зазор увеличивается и становится равным 0,16 мм при использовании латунного, 0,18 мм -медного и 0,21 мм- чугунного электрода-инструмента. При обработке стальных деталей при среднем токе 60 А с использованием электрода-инструмента из алюминиевого сплава АЛ5 зазор между горизонтальными и наклонными поверхностями $l_T=0,42$ мм, меди- 0,25 мм, графитированного материала ЭЭГ - 0,07 мм, а между вертикальными поверхностями при использовании медного электрода-инструмента $l_6=0,47$ мм, графитированного - 0,49 мм.

С увеличением глубины обработки l_6 растет и достигает при $H=5$ мм 0,05 мм, а при $H=20$ мм - 0,13 мм и при дальнейшей росте H боковой зазор не изменяется (рис. 5).

На величину бокового зазора, а следовательно, и конусность отверстия оказывает влияние условие выполнения операции, в частности, прокачивание рабочей жидкости через зону обработки. На рис. 6 показано влияние отношения глубины отверстия H_0 к его диаметру d на изменение конусности $K = \frac{d_{вх} - d_{вых}}{2H_0}$ (кривые 1, 3) и разности размеров отверстия Δd со стороны входа ($d_{вх}$) и выхода ($d_{вых}$) электрода-инструмента (кривые 2, 4) из заготовки

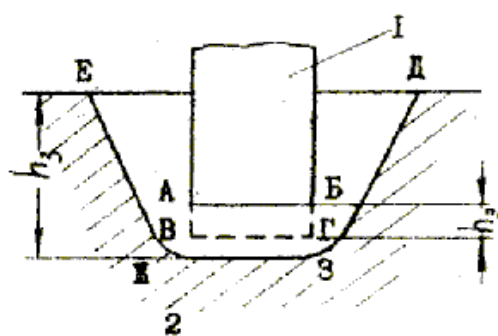


Рис. 1

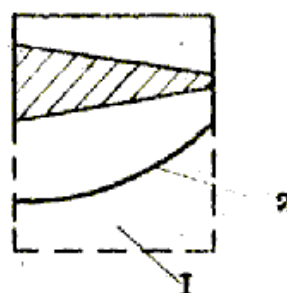


Рис. 2

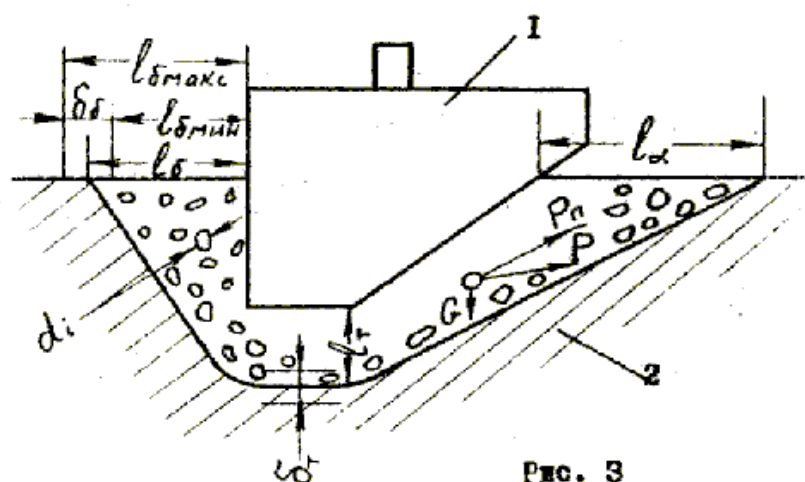


Рис. 3

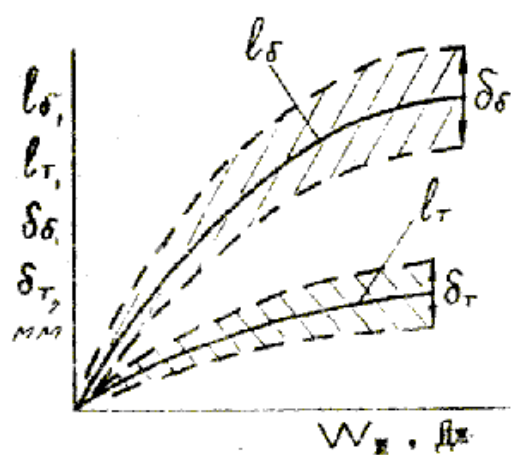


Рис. 4

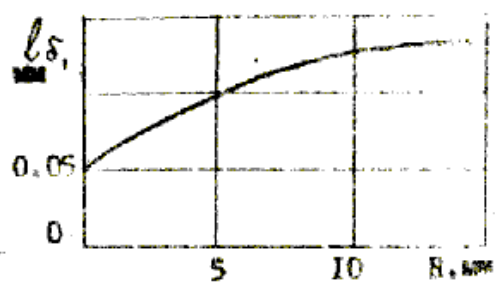


Рис. 5

БЕЗ прокачивания (кривые 1, 2) и с прокачиванием (3, 4) рабочей жидкости через электрода-инструмента. При обработке отверстий без прокачивания рабочей жидкости величина бокового зазора больше, чем при прокачивании ее через зону обработки, в результате чего в первом случае конусность и относительная разность диаметров отверстия больше. Относительная разность диаметров отверстия, обработанного без прокачки, в 2 раза больше, чем с прокачкой рабочей жидкости. При этом до $\frac{H_o}{d} = 5 + 6$ значения относительной разности диаметров отверстия растут, а при последующем увеличении остаются неизменными.

2.4. Общие условия при расчетах электрода-инструмента

В общем виде ЭЭО заготовки складывается из ряда последовательных операций: обработка на черновых режимах с целью удаления основного объема металла, наибольшего по величине припуска $Z_{\text{черн}}$, обработка на средних режимах с целью выравнивания поверхности и удалению дефектов, полученных от предыдущей операции со снятием припуска $Z_{\text{ср}}$; обработка на чистовых режимах с получением требуемой точности и качества поверхности со снятием припуска $Z_{\text{чист}}$.

Знание припуска позволяет определить величину износа электрода-инструмента, а следовательно, правильно рассчитать его размеры. Так, из выражения 2 следует, что $h_3 = \Delta\gamma_{\text{эл}} * h_3$; $h_3 = \Delta\gamma_{\text{эл}} * Z$. Таким образом, при постоянном значении $\Delta\gamma_{\text{эл}}$ основным фактором, определяющим размер электрода-инструмента является величина снимаемого на каждом режиме припуска Z . При этом минимальный припуск должен быть равен величине всех погрешностей, оставшихся после предыдущей обработки, а также вносимых при базировании и закреплении детали и электрода-инструмента ϵ_{yi} на выполняемом переходе, т.е.

$$Z_{\text{мин}} = (R_{zi-1} - h_{gi-1}) + \sqrt{\rho_{i-1}^2 + \epsilon_{yi}^2} \quad (13)$$

где: R_{zi-1} - высота микронеровностей и h_{gi-1} - глубина дефектного слоя, ρ_{i-1} - геометрическая сумма пространственных отклонений взаимосвязанных поверхностей заготовки, получившихся на предшествующем переходе.

Это положение, взятое из металлообработки, безусловно, должно быть использовано при расчете припусков при ЭЭО.

Однако следует отметить, что наличие меж электродного промежутка, а также прохождение электрического разряда по наикратчайшему расстоянию между электродами вносят определенную специфику в расчет величины припусков.

На рис. 7 представлен электрод-инструмент "э", перемещающийся по направлению стрелки "с" в сторону обрабатываемой заготовки. Принято, что электрод-инструмент в процессе ЭЭО не изнашивается, а между боковыми поверхностями нет дополнительных электрических разрядов. Такая идеализированная схема ЭЭО позволяет более четко выявить особенности определения припусков, снимаемых с разных поверхностей обрабатываемой заготовки. В данном случае все поверхности электрода-инструмента параллельны обрабатываемым поверхностям заготовки, а межэлектродный промежуток во всех нормальных сечениях равен l_T .

Участки 6, 8, 10 торцовой поверхности электрода-инструмента "удалили" припуск с заготовки, равный Z . При этом необходимо подчеркнуть особенности ЭЭО в точках 6 и 10. Здесь электрические разряды проходили не только в направлениях 6-7 и 10-11, но и между всеми точками заготовки, находящимися на поверхностях 5-7 и 11-12 и точками 6 и 10 соответственно. В итоге в направлении перемещения электрода-инструмента, совпадающем с направлением 6-7, 10-11, будет снят припуск $Z=H_3+l_T$, а в направлении 5-6 припуск, равный l_T . Таким образом, между точками 4 и 3, 2 и 1 вообще не будет проходить каких-либо разрядов, т.к. зазор l_T уже образован в результате ЭЭО точкой 6 и на этих участках с обрабатываемой заготовки не будет удаляться металл, т.е. снимаемый припуск на этих участках равен нулю. Съем металла на наклонной поверхности заготовки любым участком электрода-инструмента происходит благодаря прохождению электрических разрядов в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности. Т.е. каждая точка электрода-инструмента "удаляет" металл с заготовки не в направлении перемещения электрода-инструмента, а по направлению, в котором поверхности заготовки и электрода-инструмента находятся на самом близком расстоянии, т.е. по нормали к обрабатываемой поверхности. Отсюда ясно, что электрические разряды будут проходить по направлениям 13-15 и 17-18, а не по 13-14, 17-16, совпа-

дающим с направлением перемещения электрода-инструмента. Таким образом, точкой 10 в направлении 10-12 и точкой 13 в направлении 13-15 «удалены» припуски, равные соответственно: $Z_{10}=H_{\alpha}+l_T$ и $Z_{13}=H_{\alpha x}+l_T$. Значения H_{α} и $H_{\alpha x}$ отсчитывают от точек 19 и 20, являющимися точками пересечения плоскости а-а, проходящей через верхнюю поверхность заготовки, с линиями, проходящими через рассматриваемые точки электрода-инструмента (в данном случае точки 10 и 13) в направлении, параллельном перемещению электрода-инструмента. Размер H_{α} и $H_{\alpha x}$ равен величине отрезка, отсчитываемого по нормали, опущенной из точек 19 и 20 на боковую поверхность электрода-инструмента. Отсюда следует, что в случае ЭЭО без износа электрода-инструмента и без дополнительных разрядов между боковыми поверхностями электрода-инструмента и заготовки, величина припуска, удаляемого на любом участке любой поверхности, может быть определена по уравнению:

$$Z_x=H_x*\sin\alpha+l_T \quad (14)$$

где: H_x - расстояние от рассматриваемой точки на поверхности электрода-инструмента до плоскости а-а, α - угол наклона рассматриваемой поверхности электрода-инструмента к направлению его перемещения в процессе ЭЭО.

Рассмотрим схему ЭЭО без износа электрода-инструмента, но с наличием дополнительных разрядов между боковыми поверхностями электрода-инструмента и заготовки (рис. 8). В этом случае $l_6>l_{\alpha}>l_T$.

Каждый участок вертикальной боковой поверхности 2-6 электрода-инструмента "снял" с заготовки припуск, равный

$$Z_6=l_{6x}-l_T \quad (15)$$

Вполне очевидно, что точка 2 только вступила в процесс ЭЭО и этот участок электрода-инструмента еще не смог "удалить" с заготовки ощутимый по размеру припуск. Очевидно, что удаление припуска $Z_{6\max}=l_6-l_T$ определялось дополнительными разрядами в точке 6 по направлению 5-6 и можно полагать, что именно этот участок электрода-инструмента "удалил" с заготовки припуск $Z_{6\max}$. Для удобства последующих расчетов допустим, что участок 1-5 боковой поверхности заготовки является прямолинейным, а угол меж

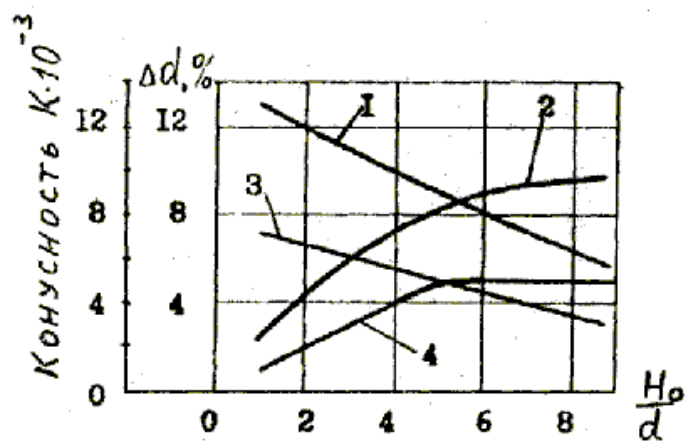


Рис. 6

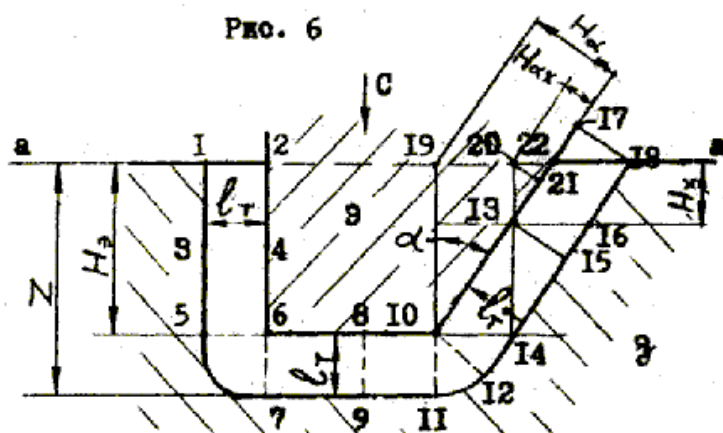


Рис. 7

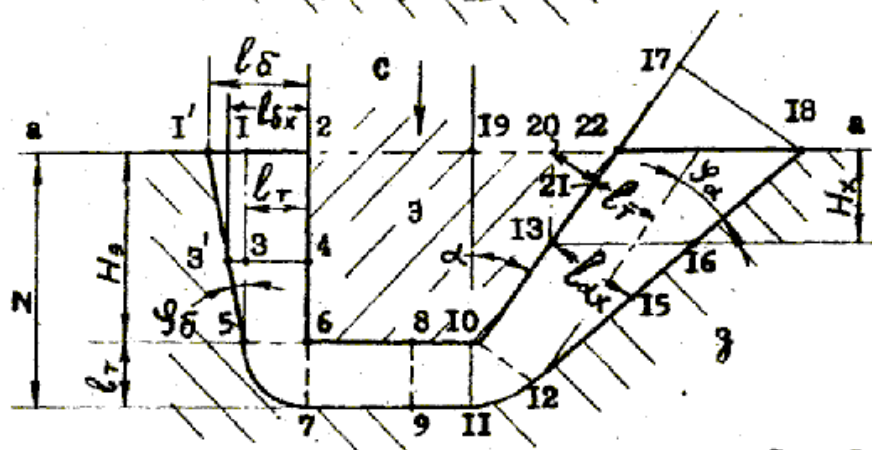


Рис. 8

ду ней и направлением перемещения электрода-инструмента равен φ_6

$$\operatorname{tg} \varphi_6 = \frac{l_6 - l_T}{H_9} \quad (16)$$

Отсюда следует, что припуск, удаляемый с любой точки вертикальной боковой поверхности заготовки равен

$$Z_{6x} = l_{6x} - l_T = H_x * \operatorname{tg} * \varphi_6 = \frac{H_x}{H_9} * (l_6 - l_T) \quad (17)$$

При этом расстояние H_x отсчитывается от плоскости а-а, проходящей через верхнюю поверхность заготовки. Исходя из выражения 17, точка 2 электрода-инструмента "удалила" припуск $Z_{62}=0$ (т.к. $H_x=0$), а точка 6 в направлении 6-5 – припуск $Z_6=l_6-l_T$, (т.к. $H_x=H$).

Используя аналогичные рассуждения можно прийти к выводу о том, что точкой 10 электрода-инструмента в направлении 10-12 "удален" максимальный припуск, а точкой 17 - припуск, равный нулю. Припуск, удаляемый любой точкой, расположенной на рассматриваемой поверхности электрода-инструмента, в общем виде с учетом выражения 14 может быть определен из равенства

$$Z_{\alpha x} = H_x * \sin \alpha + l_T + (l_{\alpha x} - l_T) \quad (18a)$$

или

$$Z_{\alpha x} = H_x * \sin \alpha + l_{\alpha x} \quad (18б)$$

Однако уравнение 18б использовать практически невозможно в связи со сложностью определения $l_{\alpha x}$. В связи с этим член равенства 18а $l_{\alpha x} - l_T$ по аналогии с выражением 17 можно записать в более удобном виде:

$$Z_{\alpha x} = H_x * \sin \alpha + l_T + \frac{H_x}{H_9} (l_{\alpha} - l_T) \quad (19a)$$

или после преобразования

$$Z_{\alpha x} = H_x \left(\frac{l_{\alpha} - l_T}{H_y} + \sin \alpha \right) + l_T \quad (196)$$

При определении размеров электродов-инструментов может встретиться несколько случаев в зависимости от той или иной схемы обработки, от используемой конструкции электрода-инструмента ж количества его установок при обработке одного отверстия или

полости. При этом, учитывая, что в определенных условиях износ электрода-инструмента практически равен нулю, целесообразно провести расчеты размеров электрода-инструмента без учета и с учетом его износа. Дополнительные разряды между боковыми поверхностями электрода-инструмента и заготовки также сильно осложняют расчет. Вместе с тем в ряде случаев можно исключить их вредное влияние. В частности, это возможно выполнить путем отсоса продуктов эрозии из зоны обработки, не допуская их прохождения между боковыми поверхностями, а также путем нанесения на боковые поверхности электрода-инструмента слоя из токонепроводящего материала. Поэтому расчеты целесообразно проводить как с учетом, так и без учета дополнительных разрядов между боковыми поверхностями электрода-инструмента и обрабатываемой заготовки.

В приведенных ниже расчетах принято, что суммарная погрешность при ЭЭО по $\Delta_{\Sigma H}$ вертикальным и горизонтальным $\Delta_{\Sigma L}$ размерам меньше допусков на соответствующие размеры полости $\Delta_{ПН}$ и $\Delta_{ПЛ}$. Так как в рассматриваемых случаях полости обрабатываются только ЭЭО, допуск на вертикальные размеры электрода-инструмента не должен превышать $\Delta_{ИН} = \Delta_{ПН} - \Delta_{\Sigma H}$, а на горизонтальные $-\Delta_{ИЛ} = \Delta_{ПЛ} - \Delta_{\Sigma L}$.

3. РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ЭЛЕКТРОДОВ-ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ

3.1. Обработка отверстий методом прямого копирования

На рис. 9 представлена одна из возможных схем обработки отверстия ступенчатым электродом-инструментом.

Длина рабочей части электрода-инструмента H_{pz} , предназначенного для изготовления отверстий методом прямого копирования, определяется глубиной изготавливаемого отверстия H_o , величиной дополнительного продвижения электрода-инструмента после вскрытия изготавливаемого отверстия H_k и величиной износа $H_{и}$. Таким образом, длина электрода-инструмента, имеющего малый диаметр (см. рис. 9), будет равна

$$H_{pz}=H_1=H_o+H_k+H_{и} \quad (20)$$

Различная длина продвижения электрода-инструмента после вскрытия отверстия дает резко отличающиеся размеры изготовленных отверстий. Эксперименты показали, что величина дополнительного продвижения электрода-инструмента после вскрытия отверстия, обеспечивающая повышение точности, зависит от степени его относительного износа $\Delta\gamma$, и колеблется в пределах 1,2 - 1,5 H_o . При этом меньшее дополнительное продвижение электрода-инструмента соответствует меньшему его износу.

Отсюда следует, что

$$H_{pz}=H_{1э}=[(2,2\div 2,5)+\Delta\gamma_{эл}]*H_o \quad (21)$$

Так при высоте твердосплавной пластины в 15-20 мм длина рабочей части медного электрода-инструмента будет составлять 68-90 мм, латунного -60-80мм., чугунного- 53-70 мм и коксографитового-38-60 мм. Общая длина электрода-инструмента, предназначенного для обработки отверстия одного диаметра, будет равна

$$H_3 = H_{pz} + H_{кр} + H_{эт} \quad (22)$$

где: $H_{кр}$ - длина участка электрода-инструмента, необходимая для крепления в электрододержателе;

$H_{эт}$ - величина зазора между электрододержателем и торцем обработанной поверхности в момент окончания процесса обработки.

Размер по длине рабочей части ступени электрода-инструмента, имеющей больший диаметр (рис. 9), можно определить с учетом торцового зазора l_T и допуска на размер обрабатываемого отверстия по высоте $\Delta_{\text{пн}}$ из следующего выражения :

$$H_{2э} = \left(H_{2о} + \frac{\Delta_{\text{пн}}}{2} \right) (1 + \Delta\gamma_{э}) - l_T \quad (23)$$

При определении диаметральных размеров электрода-инструмента $D_э$ необходимо иметь в виду, что основной объем металла обрабатываемой заготовки удаляется при использовании только одного перемещения электрода-инструмента в направлении к обрабатываемой заготовке за счет электрических разрядов, протекающих между торцевыми поверхностями электрода-инструмента и заготовки, а также поверхностью, получаемой в результате износа торца электрода-инструмента и заготовкой. На этих участках зазор между электродом-

-инструментом и обрабатываемой заготовкой можно принять равным l_T (см. рис. 8). В итоге за счет электрических разрядов между боковыми поверхностями электрода-инструмента и обрабатываемого отверстия удаляется припуск, величина которого может быть определена из выражения 17. В связи с этим износ боковых поверхностей электрода-инструмента будет равен

$$\gamma_{\text{эбл}} = \Delta\gamma_{\text{эл}} * Z_{\text{бх}} = \Delta\gamma_{\text{эл}} \frac{H_x}{H_y} (l_{\text{б}} - l_T) \quad (24)$$

Таким образом, наибольший диаметральный размер большей ступени электрода-инструмента представленного на рис. 9, будет равен (см. рис. 8)

при

$$\begin{aligned} D_y &= D_o + \frac{\Delta_{\text{пл}}}{2} - 2l_{\text{б}} + 2\gamma_{\text{эб}} = D_o + \frac{\Delta_{\text{пл}}}{2} - 2l_T - 2(l_{\text{б}} - l_T) + 2\Delta\gamma_{\text{эл}}(l_{\text{б}} - l_T) = \\ &= D_o + \frac{\Delta_{\text{пл}}}{2} - 2(1 - \Delta\gamma_{\text{эл}})(l_{\text{б}} - l_T) - 2l_T \end{aligned} \quad (25)$$

где: D_o - номинальный диаметр отверстия;

$D_{\text{пл}}$ - допуск на диаметральный размер отверстия.

3.2. Обработка конических отверстий методом обратного конуса

Изготовление фасонных конических отверстий может осуществляться двумя различными методами ЭЭО, использующими принцип копирования электрода-инструмента в обрабатываемой заготовке. В первом случае обработка конусной поверхности и цилиндрической части осуществляется различными электродами-инструментами, при этом рабочий конус изготавливается с использованием двух-трех электродов-инструментов. При использовании второго процесса, предложенного Намитоковым К.К., рабочий конус и цилиндрическая часть изготавливаются одним электродом-инструментом, имеющим форму зеркального отображения рабочей части конического отверстия (рис. 10)

Определение размеров электрода-инструмента в этом случае основано на определенной зависимости между количеством удаленного металла в величине износа электро-

да-инструмента. С определенной степенью достоверности эта зависимость постоянна для данной пары электродов при выбранном режиме обработки и условий ведения процесса.

Значения D_3 и d_3 определяются по общему правилу расчета диаметров электродов-инструментов, используемых при обра-ботке на том или ином режиме (рис. 10). Высота электрода равна $h_3 = \Delta\gamma_{эл} * h_3$. Угол β электрода-инструмента определяется из следующих со-ображений. Так как

$$\frac{D_3 - d_3}{2} = h_3 \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = h_3 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \text{ то}$$

$$\beta = 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{\Delta\lambda_{эл}} \right) \quad (26)$$

4. РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ЭЛЕКТРОДОВ-ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПРО-СТЫХ ПОЛОСТЕЙ

4.1. Обработка полости на одном режиме

Полость с вертикальными боковыми поверхностями (рис. 11) не имеет острых углов. Она будет обрабатываться одним электрода-инструмента на одном режиме с интен-сивной прокачкой рабочей жидкости через зону обработки.

а. Расчет размеров электрода-инструмента без учета его износа

Вертикальные размеры рабочей части электрода-инструмента равны

$$H_3^o = Z_n - l_t = H_n + \frac{\Delta_{пн}}{2} - l_t \quad (27)$$

Горизонтальные размеры электрода-инструмента равны (рис. 12)

$$L_3^o = L_n + \frac{\Delta_{пл}}{2} - 2l_b \quad (28)$$

б. Расчет размеров электрода-инструмента с учетом его износа.

Вертикальные размеры (рис.11)

$$\begin{aligned} H_{\text{э}} &= H_{\text{э}}^0 + \Delta \gamma_{\text{эл}} * Z_{\text{н}} = Z_{\text{н}} - l_{\text{т}} + \Delta \gamma_{\text{эл}} * Z_{\text{н}} = \\ &= (1 + \Delta \gamma_{\text{эл}}) * Z_{\text{н}} - l_{\text{т}} = (1 + \Delta \gamma_{\text{эл}}) * \left(H_{\text{п}} + \frac{\Delta_{\text{пл}}}{2} \right) - l_{\text{т}} \end{aligned} \quad (29)$$

Горизонтальные размеры электрода-инструмента в этом случае могут быть определены так же как и диаметральные размеры (см. рис. 8, 12 и выражение 25), т.е.

$$L_{\text{э}} = L_{\text{п}} + \frac{\Delta_{\text{пл}}}{2} - 2 * (1 - \Delta \gamma_{\text{эл}}) * (l_{\text{б}} - l_{\text{т}}) - 2 * l_{\text{т}} \quad (30)$$

На рис, 11, 12 и в формулах 17-20 использованы следующие условные обозначения: $H_{\text{п}}$ -вертикальный размер обрабатываемой по-

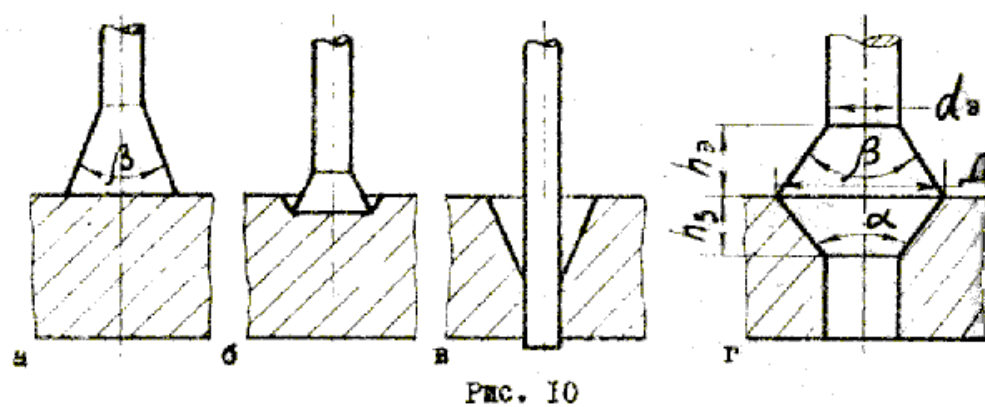


Рис. 10

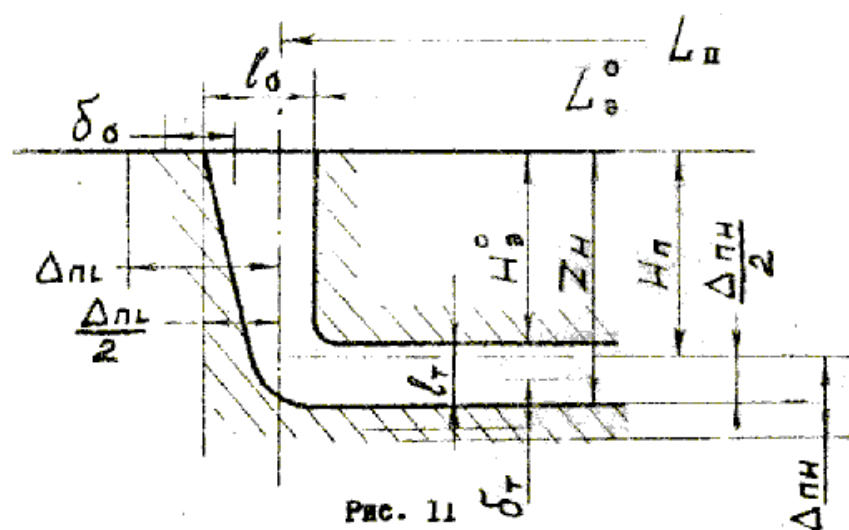


Рис. 11

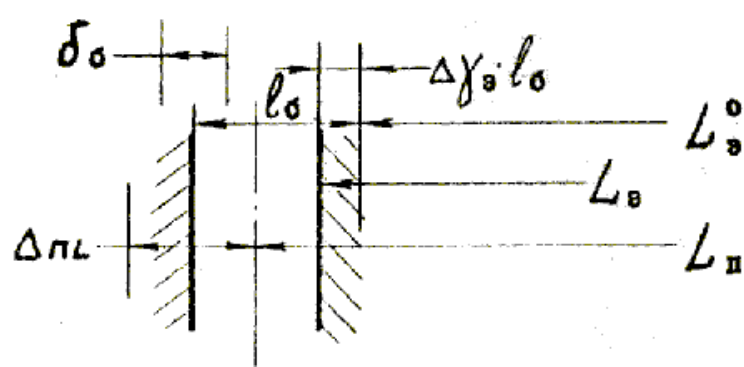


Рис. 12

лости; $L_{\text{п}}$ - горизонтальный размер обрабатываемой полости, $Z_{\text{н}}$ - припуск, снимаемый с горизонтальной поверхности полости. $H_{\text{э}}$, $H_{\text{э}}^0$ - размеры инструмента с учетом и без учета его износа.

4.2. Обработка полости на трех режимах

Обрабатываемая полость (рис. 13) с вертикальными боковыми, поверхностями не имеет острых углов», размеры радиусов округления углов не лимитированы. Полость будет обрабатываться методом прямого копирования тремя электродами-инструментами 1, 2, 3 на трех разных режимах. С использованием каждого электрода-инструмента обработка будет вестись на одном режиме. Полости 4, 5, 6 после их ЭЭО соответственно электродами-инструментами 1, 2, 3 другими способами не обрабатывается.

а. Расчет размеров электрода-инструмента без учета его износа.

Вертикальные размеры

$$H_{\text{эчерн}}^0 = Z_{\text{нчерн}} - l_{\text{тчерн}} \quad (31, \text{а})$$

$$H_{\text{эср}}^0 = Z_{\text{нчерн}} + Z_{\text{нср}} - l_{\text{тср}} \quad (31, \text{б})$$

$$H_{\text{эчист}}^0 = Z_{\text{нчерн}} + Z_{\text{нср}} + Z_{\text{нчист}} - l_{\text{тчист}} = H_{\text{п}} + \Delta_{\text{ПЛ}}/2 - l_{\text{тчист}} \quad (31, \text{в})$$

Горизонтальные размеры

$$L_{\text{черн}}^0 = L_{\text{п}} + \Delta_{\text{ПЛ}}/2 - 2Z_{\text{бчист}} - 2Z_{\text{бср}} - 2l_{\text{бчерн}} \quad (32, \text{а})$$

$$L_{\text{ср}}^0 = L_{\text{п}} + \Delta_{\text{ПЛ}}/2 - 2Z_{\text{бчист}} - 2l_{\text{бср}} \quad (32, \text{б})$$

$$L_{\text{чист}}^0 = L_{\text{п}} + \Delta_{\text{ПЛ}}/2 - 2l_{\text{бчист}} \quad (32, \text{в})$$

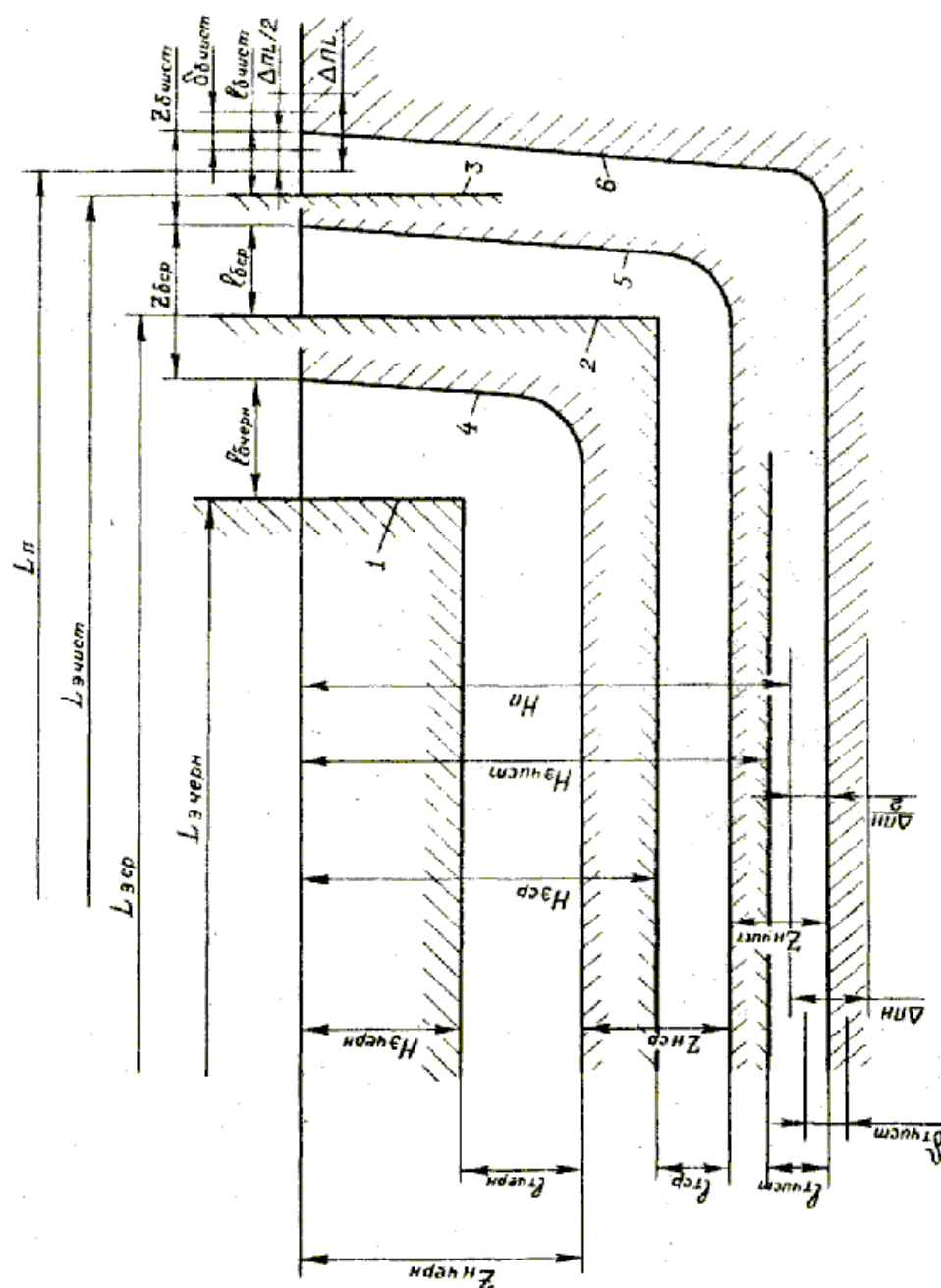


Рис.13.

б. Расчет размеров электрода-инструмента с учетом его износа.

На черновом режиме относительный износ электрода-инструмента равен $\Delta\gamma$, черн., на среднем ср. - $\Delta\gamma$, на чистовом - $\Delta\gamma$, чист.

Вертикальные размеры электрода-инструмента в данном случае будут увеличены на величину износа электрода-инструмента. Так как величина износа электрода-инструмента про-

порциональна снимаемому припуску, то вначале необходимо определить толщину припуска, удаляемого на чистовом, среднем и черновом режимах обработки.

Если полость обрабатывается ЭЭС в сплошной заготовке, то на черновом режиме удаляется припуск, равный

$$Z_{\text{нчерн}} = H_{\text{эчерн}}^0 + l_{\text{тчерн}} \quad (33)$$

Отсюда электрод-инструмент при обработке на черновом режиме изнашивается на величину $\Delta\gamma_{\text{эчерил}} * Z_{\text{нчерн}}$. Следовательно, размер электрода-инструмента для черновой обработки будет равен:

$$H = H_{\text{эчерн}}^0 + \Delta\gamma_{\text{эчерил}} * Z_{\text{нчерн}} = Z_{\text{нчерн}} - l_{\text{тчерн}} + \Delta\gamma_{\text{эчерил}} * Z_{\text{нчерн}} = Z_{\text{нчерн}}(1 + \Delta\gamma_{\text{эчерил}}) - l_{\text{тчерн}} \quad (34, a)$$

При обработке на среднем режиме с торцевой части полости будет удален припуск $Z_{\text{нср}}$. Следовательно, электрод-инструмент при обработке на среднем режиме изнашивается на величину $Z_{\text{нср}} * \Delta\gamma_{\text{эсрл}}$. Отсюда размер электрода-инструмента для обработки на среднем режиме будет равен:

$$H_{\text{эср}} = H_{\text{эср}}^0 + \Delta\gamma_{\text{эсрл}} * Z_{\text{нср}} = Z_{\text{нчерн}} + Z_{\text{нср}} - l_{\text{тср}} + \Delta\gamma_{\text{эср}} * Z_{\text{нср}} = Z_{\text{нчерн}}(1 + \Delta\gamma_{\text{эсрл}}) * Z_{\text{нср}} - l_{\text{тср}} \quad (34,б)$$

Аналогично определяется размер электрода-инструмента для обработки полости на чистовом режиме

$$\begin{aligned} H_{\text{эчист}} &= H_{\text{эчист}}^0 + \Delta\gamma_{\text{эчистл}} * Z_{\text{нчист}} = Z_{\text{нчерн}} + Z_{\text{нср}} - l_{\text{тчист}} + Z_{\text{нчист}} + \Delta\gamma_{\text{эчистл}} * Z_{\text{нчист}} = \\ &= Z_{\text{нчерн}} + Z_{\text{нср}} + (1 + \Delta\gamma_{\text{эчистл}}) * Z_{\text{нчист}} - l_{\text{тчист}} \end{aligned} \quad (34,в)$$

Следует отметить, что с боковой поверхности слои металла $Z_{\text{бср}}$, $Z_{\text{бчист}}$ удаляются при перемещении электрода-инструмента в вертикальном направлении (рис. 13). При этом электроды-инструменты проходят соответственно путь $H_{\text{эср}}$ и $H_{\text{эчист}}$. В результате у электрода-инструмента будут интенсивно изнашиваться углы, будет увеличиваться радиус округления перехода торцевой поверхности к боковой. В рассматриваемом примере с точки зрения получена полости с заданной точностью размеров процесс округления упомянутых углов не имеет значения, т.к. размеры радиусов в данном случае не лимитированы.

Так как за счет разрядов между боковыми поверхностями электрода-инструмента и обрабатываемой полости на черновом, среднем и чистовом режимах удаляются соответственно слои металла $l_{\text{бчерн}} - l_{\text{тчерн}}$, $l_{\text{бср}} - l_{\text{тср}}$, $l_{\text{бчист}} - l_{\text{тчист}}$, то горизонтальные размеры электрода-инструмента будут равны

$$L_{\text{эчерн}} = L_{\text{эчерн}}^0 + 2\Delta\gamma_{\text{эчерн}}(l_{\text{бчерн}} - l_{\text{тчерн}}) \quad (35,а)$$

$$L_{\text{эср}} = L_{\text{эср}}^0 + 2\Delta\gamma_{\text{эср}}(l_{\text{бср}} - l_{\text{тср}}) \quad (35,б)$$

$$L_{\text{эчист}} = L_{\text{эчист}}^0 + 2\Delta\gamma_{\text{эчист}}(l_{\text{бчист}} - l_{\text{тчист}}) \quad (35,в)$$

где: - горизонтальные размеры электрода-инструмента с учетом и без учета его износа соответственно.

4.3. Обработка полости с орбитальным движением электрода-инструмента

Полость с вертикальными боковыми поверхностями не имеет острых углов, размеры радиусов округления углов заданы. Полость после ЭЭО другими способами не обрабатывается.

Обработка отверстий методом прямого копирования с одним вертикальным перемещением электрода-инструмента вызывает сложности при получении сравнительно точных радиусов округления перехода торцевой поверхности к боковой, что требует нескольких электродов-инструментов для обеспечения заданной точности размеров. Поэтому це-

лесообразно обрабатывать заданную полость методом прямого копирования одним электродом-инструментом с его орбитальным движением в горизонтальной плоскости на трех последовательно изменяющихся режимах. (Об орбитальном движении см. стр.93)

Схема обработки и расположение электрода-инструмента 1 черн. 1 ср., 1 чист. относительно полости 2 черн., 2 ср., 2 чист., обработанной соответственно на черновом, среднем и чистовом режимах, показаны на рис. 14.

а. Расчет размеров электрода-инструмента без учета его износа

Вертикальный размер электрода-инструмента равен по аналогии с выражением 27

$$H_3^0 = H_{\Pi} + \Delta_{\Pi\text{Л}}/2 - l_{\text{тчист}} \quad (36)$$

Горизонтальный размер электрода-инструмента можно определить из следующего выражения (см. рис. 14)

$$\begin{aligned} L_{03} &= L_{\text{пчерн}} + \Delta_{\Pi\text{Лчерн}}/2 - 2Z_{\text{бчерн}} = L_{\Pi} + \Delta_{\Pi\text{Л}}/2 - 2Z_{\text{бчист}} - 2Z_{\text{бср}} - 2Z_{\text{бчерн}} = \\ &= L_{\Pi} + \Delta_{\Pi\text{Л}}/2 - 2(Z_{\text{бчист}} + Z_{\text{бср}} + Z_{\text{бчерн}}) \end{aligned} \quad (37)$$

Для обеспечения возможности обработки полости на чистовом режиме должно быть соблюдено условие

$$\begin{aligned} e_{\text{чист}} &\geq Z_{\text{бчист}} - l_{\text{бчист}} + Z_{\text{бср}} + l_{\text{бчерн}} + e_{\text{черн}} = \\ &= Z_{\text{бчист}} + Z_{\text{бср}} + Z_{\text{бчерн}} - l_{\text{бчист}} \end{aligned} \quad (38)$$

где: $Z_{\text{бчерн}}$ - припуск на боковой поверхности, снимаемый на черновом режиме, $e_{\text{черн}}$ и $e_{\text{чист}}$ - величина эксцентриситета электрода-инструмента при орбитальном перемещении при обработке на черновом и чистовом режимах соответственно.

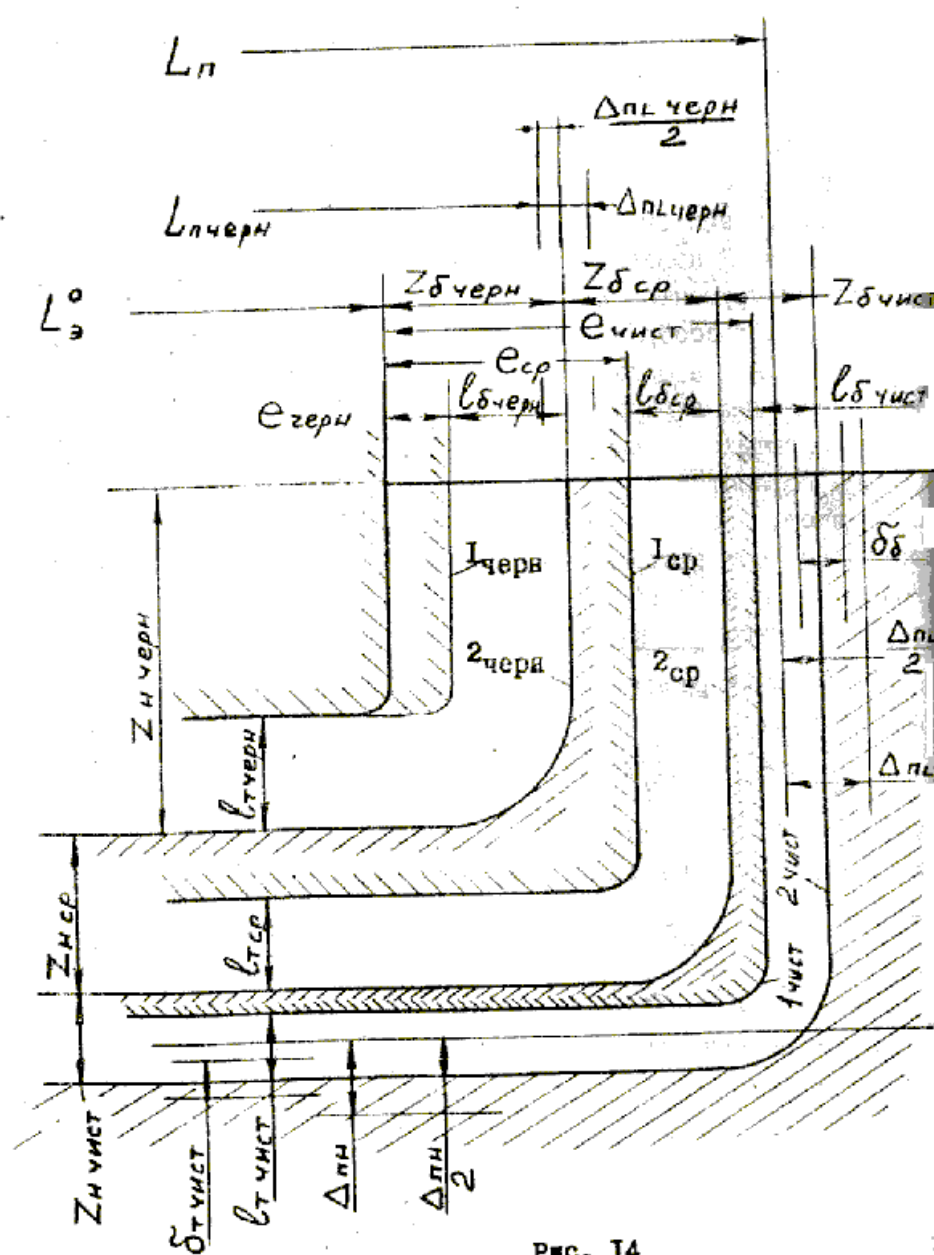


Рис. 14

б. Расчет размеров электрода-инструмента с учетом его износа.

Вертикальные размеры электрода-инструмента равны:

$$H_3 = (1 + \Delta\gamma_{\text{эчерил}}) * Z_{\text{нчерн}} + (1 + \Delta\gamma_{\text{эсрл}}) * Z_{\text{нср}} + (1 + \Delta\gamma_{\text{эчистл}}) * Z_{\text{нчист}} - l_{\text{тчист}} \quad (39)$$

Горизонтальные размеры электрода-инструмента могут быть определены из следующих соображений. Припуск с боковой поверхностей полости будет удален в результате возникновения электрических разрядов между боковыми поверхностями электрода-инструмента и полости. Отсюда с учетом выражения 25 следует, что

$$\begin{aligned} L_3 &= L_{\text{п}} + \Delta_{\text{пл}} / 2 - 2(1 - \Delta\gamma_{\text{эчистл}}) * Z_{\text{бчист}} - 2(1 - \Delta\gamma_{\text{эсрл}}) * Z_{\text{бср}} - 2(1 - \Delta\gamma_{\text{эчерил}}) * Z_{\text{бчерн}} = \\ &= L_{\text{п}} + \Delta_{\text{пл}} / 2 - 2[(1 - \Delta\gamma_{\text{эчистл}}) * Z_{\text{бчист}} + (1 - \Delta\gamma_{\text{эсрл}}) * Z_{\text{бср}} + (1 - \Delta\gamma_{\text{эчерил}}) * Z_{\text{бчерн}}] \end{aligned} \quad (40, a)$$

Или так как $Z_{\text{бчерн}} = e_{\text{черн}} + l_{\text{бчерн}}$ и $e_{\text{чист}} = Z_{\text{бчист}} + Z_{\text{бср}} + Z_{\text{бчерн}} - l_{\text{бчист}}$, то

$$\begin{aligned} L_3 &= L_{\text{п}} + \Delta_{\text{пл}} / 2 - 2Z_{\text{бчист}} + 2\Delta\gamma_{\text{эл}} * Z_{\text{бчист}} - 2Z_{\text{бср}} + 2\Delta\gamma_{\text{эсрл}} * Z_{\text{бср}} - 2Z_{\text{бчерн}} + 2Z_{\text{бчерн}}\Delta\gamma_{\text{бчерил}} = L_{\text{п}} + \Delta_{\text{пл}} / 2 - \\ &- 2(Z_{\text{бср}} + Z_{\text{бчист}} + Z_{\text{бчерн}}) + 2(\Delta\gamma_{\text{эсрл}} * Z_{\text{бср}} + \Delta\gamma_{\text{эчистл}} * Z_{\text{бчист}} + \Delta\gamma_{\text{эчерил}} * Z_{\text{бчерн}}) = L_{\text{п}} + \Delta_{\text{пл}} / 2 - \\ &- 2(e_{\text{чист}} + l_{\text{бчист}} - \Delta\gamma_{\text{эчистл}} * Z_{\text{бчист}} - \Delta\gamma_{\text{эсрл}} * Z_{\text{бср}} - \Delta\gamma_{\text{эчерил}} * Z_{\text{бчерн}}) \end{aligned} \quad (40, б)$$

5. РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ЭЛЕКТРОДОВ-ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ФА- СОННЫХ ПОЛОСТЕЙ С БОКОВЫМИ НАКЛОННЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

5.1. Обработка полостей на одном режиме

Фасонная полость с боковыми наклонными поверхностями не имеет острых углов. Полость будет обрабатываться на одном режиме одним электродом-инструментом с интенсивной прокачкой рабочей жидкости через зону обработки.

а. Расчет разметов электрода-инструмента без учета его износа

Рассмотрим два случая расчета: при отсутствии и при над дополнительных электрических разрядов между боковыми поверхностями электродов.

При отсутствии дополнительных разрядов между боковыми поверхностями обрабатываемой полости и электрода-инструмента при $\alpha_n > \beta_n$ будет иметь место $\alpha_z^0 = \alpha_n$;

$$\beta_z^0 = \beta_n; l_{\text{бн}\beta}^0 = l_{\text{бн}\alpha}^0 = l_T; l_{\text{б}\alpha}^0 > l_{\text{б}\beta}^0$$

Вертикальные размеры рабочей части электрода-инструмента могут быть определены по формуле 27, а горизонтальные размер по нижеследующей:

$$L_z^0 = L_n + \frac{\Delta_{\text{ПЛ}}}{2} - l_{\text{б}\beta}^0 - l_{\text{б}\alpha}^0 = L_n + \frac{\Delta_{\text{ПЛ}}}{2} - l_T * \left(\frac{\cos \alpha + \cos \beta}{\cos \beta * \cos \alpha} \right) \quad (41)$$

$$\text{т.к. } l_{\text{б}\alpha}^0 = l_T / \cos \alpha; l_{\text{б}\beta}^0 = l_T / \cos \beta$$

При наличии дополнительных разрядов между боковыми плоскостями электрода-инструмента и обрабатываемой полости и при $\alpha_n > \beta_n$ будет иметь место $\alpha_z < \alpha_n$;

$$\beta_z < \beta_n; l_{\text{бн}\beta} \neq l_{\text{бн}\alpha} \neq l_T; l_{\text{б}\alpha} > l_{\text{б}\beta}$$

Вертикальные размеры рабочей части электрода-инструмента можно определить из выражения 27, а горизонтальные из выражения

$$L_{\text{зА}}^0 = L_n + \Delta_{\text{ПЛ}} / 2 - l_{\text{б}\alpha} - l_{\text{б}\beta} \quad (42)$$

б. Расчет размеров электрода-инструмента с учетом его износа.

Рассмотрим два случая расчета: с наличием и без наличия дополнительных электрических разрядов между электродами. Ври наличии между боковыми поверхностями электрода-инструмента и обрабатываемой полости дополнительных разрядов вертикальные размеры рабочей части электрода-инструмента могут быть определены по формуле 29.

Вертикальные размеры на наклонной поверхности рабочей части электрода-инструмента. Каждая точка на рабочем участке боковой поверхности электрода-инструмента начинает подвергаться эрозии при приближении к обрабатываемой полости на расстояние АК, при котором в направлении ОА может быть пробит межэлектронный промежуток с перемещающимися в нем продуктами эрозии (рис.16). Расстояние ОА является наикратчайшим между боковой поверхностью обрабатываемой полости и точкой А на наклонной поверхности электрода-инструмента, выступающей в процесс обработки. Указанная точка А находится от горизонтальной плоскости ОВ обрабатываемой заготовки на расстоянии $AK = l_{6\alpha} * \cos\alpha_3 * \sin\alpha_3$ и $A'K' = l_{6\beta} * \cos\beta_3 * \cos\beta_3$

Горизонтальные размеры (размер АА') рабочей части электрода-инструмента в сечении, проходящим через точку А, равны

$$L = L_{\pi} + \Delta_{\Pi\Pi}/2 - OK - O'K' = L_{\pi} + \Delta_{\Pi\Pi}/2 - l_{6\alpha} * \cos^2\alpha_3 - l_{6\beta} * \cos\beta_3^2, \quad (43,a)$$

При $\alpha = \beta$

$$L = L_{\pi} + \Delta_{\Pi\Pi}/2 - 2l_{6\alpha} * \cos^2\alpha_3 \quad (43,б)$$

Размер BB^1 в сечении, проходящем через точку В, будет равен

$$L_{эв} = L_3^0 + \Delta\gamma_{эл} * Z_{6\alpha} + \Delta\gamma_{эл} * Z_{6\beta}$$

Где $Z_{6\alpha} = l_{6\alpha} * \cos\alpha_{\pi}$; $Z_{6\beta} = l_{6\beta} * \cos\beta_{\pi}$

$$L_{эв} = L_3^0 + \Delta\gamma_{эл} * l_{6\alpha} * \cos\alpha_{\pi} + \Delta\gamma_{эл} * l_{6\beta} * \cos\beta_{\pi} = L_{\pi} + \Delta_{\Pi\Pi}/2 - l_{6\alpha}(1 - \Delta\gamma_{эл} * \cos\alpha_{\pi}) - l_{6\beta}(1 - \Delta\gamma_{эл} * \cos\beta_{\pi})$$

5.2. Обработка полости на одном режиме с орбитальным движением электрода-инструмента

Фасонная полость с боковыми наклонными поверхностями не имеет острых углов. Полость будет обрабатываться одним электрода-инструмента с орбитальным движением в горизонтальной плоскости на одном режиме (рис.17). При выбранной схеме обработки полости продукты эрозии легко удаляются из зоны обработки, не вызывая за счет дополнительных боковых разрядов значительного искажения профиля обрабатываемой полости и электрода-инструмента.

Исходя из условий, в данном случае $\alpha > \beta$, $l_{\alpha} > l_{\beta}$, $e = e_{\alpha} = e_{\beta}$

а. Расчет размеров электрода-инструмента без учета его износа.

Вертикальные размеры рабочей части электрода-инструмента можно определить по формуле 27, а горизонтальные размеры- из следующего выражения:

$$L_{\gamma}^o = L_{\pi} + \frac{\Delta_{\pi\pi}}{2} - \frac{z_{\alpha}}{\cos \alpha_{\pi}} - \frac{z_{\beta}}{\cos \beta_{\pi}} = L_{\pi} + \frac{\Delta_{\pi\pi}}{2} - 2e - l_{\alpha} - l_{\beta} \quad (45)$$

б. Расчет размеров рабочей части электрода-инструмента с учетом его износа.

$$\begin{aligned} L_{\gamma} &= L_{\pi} + \frac{\Delta_{\pi\pi}}{2} + \frac{\Delta\gamma_{эл} * z_{\alpha}}{\cos \alpha_{\pi}} + \frac{\Delta\gamma_{эл} z_{\beta}}{\cos \beta_{\pi}} - \frac{z_{\alpha}}{\cos \alpha_{\pi}} - \\ &- \frac{z_{\beta}}{\cos \beta_{\pi}} = L_{\pi} + \frac{\Delta_{\pi\pi}}{2} - (1 - \Delta\gamma_{эл}) * \left(\frac{z_{\alpha}}{\cos \alpha_{\pi}} + \frac{z_{\beta}}{\cos \beta_{\pi}} \right) = \\ &= L_{\pi} + \frac{\Delta_{\pi\pi}}{2} - (1 - \Delta\gamma_{эл}) * (2e + l_{\alpha} + l_{\beta}) \end{aligned} \quad (46)$$

Вертикальные размеры рабочей части электрода-инструмента можно определить по формуле 29, а горизонтальные размеры - из следующего выражения:

5.3. Обработка полости на трех режимах с орбитальным движением электрода-инструмента

Фасонная полость с боковыми наклонными поверхностями не имеет острых углов. Полость будет обрабатываться одним электродом-инструментом с орбитальным движением в горизонтальной плоскости на трех последовательно изменяющихся режимах. Схема обработки и расположение электрода-инструмента 1 черн., 1 ср., 1

чист. относительно полости 2 черн.. 2 ср.. 2 чист. обработанной соответственно на черновом, среднем и чистовом режимах, показаны на рис.18.

а. Расчет размеров рабочей части электрода-инструмента без учета его износа. В данном случае:

$$\alpha_{\Pi} = \alpha_3 = \alpha, \beta_{\Pi} = \beta_3 = \beta, \alpha > \beta, l_{\beta\alpha} > l_{\beta\beta},$$

Т.К. $Z_{\beta\alpha\text{черн}} \neq Z_{\beta\beta\text{черн}}$, ТО:

$$Z_{\beta\beta\text{черн}} / \cos \beta = Z'_{\beta\beta\text{черн}} = e_{\text{черн}} + l_{\beta\beta\text{черн}}$$

$$Z_{\beta\alpha\text{черн}} / \cos \alpha = Z'_{\beta\alpha\text{черн}} = e_{\text{черн}} + l_{\beta\alpha\text{черн}}, \text{ и т.д.}$$

Вертикальные размеры рабочей части электрода-инструмента можно рассчитать по формуле 36.

Горизонтальные размеры рабочей части электрода-инструмента будут равны

$$\begin{aligned} L_{\alpha}^{\circ} &= L_{\Pi} + \frac{\Delta_{\Pi L}}{2} - Z'_{\beta\alpha\text{черн}} - Z'_{\beta\beta\text{черн}} - Z'_{\beta\alpha\text{ср}} - Z'_{\beta\beta\text{ср}} - Z'_{\beta\alpha\text{чист}} - Z'_{\beta\beta\text{чист}} = \\ &= L_{\Pi} + \frac{\Delta_{\Pi L}}{2} - 2e_{\text{черн}} - l_{\beta\alpha\text{черн}} - l_{\beta\beta\text{черн}} - \frac{Z_{\beta\beta\text{ср}}}{\cos \alpha} - \frac{Z_{\beta\beta\text{ср}}}{\cos \beta} - \frac{Z_{\beta\alpha\text{чист}}}{\cos \alpha} - \frac{Z_{\beta\beta\text{чист}}}{\cos \beta} = \\ &= L_{\Pi} + \frac{\Delta_{\Pi L}}{2} - 2e_{\text{черн}} - l_{\beta\alpha\text{черн}} - l_{\beta\beta\text{черн}} - Z_{\beta\text{ср}} \left(\frac{\cos \alpha + \cos \beta}{\cos \alpha * \cos \beta} \right) - \\ &- Z_{\beta\text{чист}} * \left(\frac{\cos \alpha + \cos \beta}{\cos \alpha * \cos \beta} \right) = L_{\Pi} + \frac{\Delta_{\Pi L}}{2} - 2e_{\text{черн}} - l_{\beta\alpha\text{черн}} - l_{\beta\beta\text{черн}} - \\ &- (Z_{\beta\text{ср}} + Z_{\beta\text{чист}}) * \left(\frac{\cos \alpha + \cos \beta}{\cos \alpha * \cos \beta} \right) \end{aligned} \quad (47)$$

б. Расчет размеров электрода-инструмента с учетом его износа.

В данном случае при обработке на черновом, среднем и чистовом режимах будет

$$\alpha_{\text{эчерн}} \neq \alpha_{\text{эср}} \neq \alpha_{\text{эчист}} = \alpha_{\text{э}} = \alpha_{\text{п}}, \beta_{\text{эчерн}} \neq \beta_{\text{эср}} \neq \beta_{\text{эчист}} = \beta_{\text{э}} = \beta_{\text{п}}$$

$$\alpha_{\text{пчерн}} \neq \alpha_{\text{пср}} \neq \alpha_{\text{пчист}} = \alpha_{\text{э}} = \alpha_{\text{п}}, \beta_{\text{пчерн}} \neq \beta_{\text{пср}} \neq \beta_{\text{пчист}} = \beta_{\text{э}} = \beta_{\text{п}}$$

Вертикальные размеры рабочей части электрода-инструмента

$$H_{\text{э}} = (1 + \Delta\gamma_{\text{эчерил}}) * Z_{\text{нчерн}} + (1 + \Delta\gamma_{\text{эсрл}}) * Z_{\text{нср}} + (1 + \Delta\gamma_{\text{эчистл}}) * Z_{\text{нчист}} - l_{\text{тчист}} \quad (48)$$

Горизонтальные размеры рабочей части электрода-инструмента

$$\begin{aligned} L_{\text{э}} = L_{\text{п}} + \frac{\Delta_{\text{пл}}}{2} - \frac{Z_{\text{бэчист}} * (1 - \Delta\gamma_{\text{эчистл}})}{\cos \alpha_{\text{п}}} - \frac{Z_{\text{бэср}} (1 - \Delta\gamma_{\text{эсрл}})}{\cos \alpha_{\text{ср}}} - \\ - \frac{Z_{\text{бэчерн}} * (1 - \Delta\gamma_{\text{эчерил}})}{\cos \alpha_{\text{черн}}} - \frac{Z_{\text{бэчист}} (1 - \Delta\gamma_{\text{эсистл}})}{\cos \beta_{\text{п}}} - \frac{Z_{\text{бэср}} (1 - \Delta\gamma_{\text{эсрл}})}{\cos \beta_{\text{ср}}} - \\ - \frac{Z_{\text{бэчерн}} * (1 - \Delta\gamma_{\text{эчерил}})}{\cos \beta_{\text{черн}}} = L_{\text{п}} + \frac{\Delta_{\text{пл}}}{2} - (1 - \Delta\gamma_{\text{эсистл}}) * Z_{\text{бчист}} * \left(\frac{1}{\cos \alpha_{\text{ср}}} + \frac{1}{\cos \beta_{\text{ср}}} \right) - \\ - (1 - \Delta\gamma_{\text{эчерил}}) * (e_{\text{черн}} + l_{\text{бэчерн}}) - (1 - \Delta\gamma_{\text{эчерил}}) * (e_{\text{черн}} + l_{\text{бэчерн}}) \end{aligned}$$

6. РАСЧЕТ УГЛА НАКЛОНА БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА

ЭЭС обрабатывается большое разнообразие фасонных конических отверстий и полостей с различными углами наклона боковых поверхностей к направлению перемещения электрода-инструмента к обрабатываемой заготовке. Точных методов расчета угла наклона боковых поверхностей электродов-инструментов, применяемых для ЭЭО полостей методом прямого копирования, не существует в связи с большим количеством факторов, влияющих на протекание процесса удаления металла с заготовки и на износ электрода-инструмента. В связи с этим, принимая многие факторы постоянным, мы ниже дадим методы расчета наклона боковых поверхностей электрода-инструмента для ряда реальных случаев ЭЭО[6].

При выполнении расчета принято, что боковые поверхности электрода-инструмента охватываются соответствующими поверхностями обрабатываемого отверстия, а рассчитываемые углы находятся между вертикалью и боковыми поверхностями отверстия α_n с одной стороны и электрода-инструмента α_3 с другой. Износ электрода-инструмента прямо пропорционален снимаемому припуску при обработке на данном режиме. Определим угол α_3 в зависимости от угла α_n для ряда конкретных частных случаев.

6.1. Расчет угла без учета износа электрода-инструмента и дополнительных разрядов между боковыми поверхностями

При определенных режимах ЭЭО электроды-инструменты не изнашиваются, а интенсивный отсос продуктов эрозии из зоны обработки практически устраняет дополнительные электрические разряды между боковыми поверхностями электрода-инструмента и заготовки.

Вполне очевидно в этом случае $\alpha_3 = \alpha_n$

6.2. Расчет угла без учета износа электрода-инструмента при наличии дополнительных разрядов между боковыми поверхностями

Однако в процессе обработки, как правило, имеют место дополнительные разряды между боковыми поверхностями обрабатываемого отверстия и электрода-инструмента.

Допустим, что электрод-инструмент в процессе обработки не изнашивается. Для данного случая расчетная схема, на которой показано расположение электрода-инструмента 1 и обрабатываемой заготовки 2 после окончания процесса обработки, представлена на рис.19. В процессе обработки с заготовки удаляется припуск Z_H . Между торцовыми поверхностями обрабатываемой заготовки и электрода-инструмента имеется зазор l_T , а между боковыми поверхностями в сечении АО зазор l_6 . Проведем линию КГ, параллельную ЕО, при этом $ОВ=l_T$. Из построений следует, что

$$KM=Z_H-l_T, \quad OG=MЖ=l_T/\sin\alpha_n, \quad DO=l_6/\operatorname{tg}\alpha_{\partial 1}$$

$$ЗД=(Z_H-l_T+l_6/\operatorname{tg}\alpha_{\partial 1}) * \operatorname{tg}\alpha_{\partial 1}, \quad ЖГ=(Z_H-l_T+l_T/\sin\alpha_n) * \operatorname{tg}\alpha_n \quad (50)$$

Так как $ЖГ=ЗД$, то

$$\operatorname{tg}\alpha_{\partial 1} = \frac{\left[Z_H - l_T \left(1 - \frac{1}{\sin\alpha_n} \right) \right] * \operatorname{tg}\alpha_n - l_6}{Z_H - l_T}$$

Учитывая, что по мере углубления электрода-инструмента в обрабатываемую заготовку величина l_6 стабилизируется, то при некотором значении припуска Z_H можно допустить $(l_6/l_T)=K_e=\text{const}$.

С учетом изложенного, а также приняв, что $(Z_H/l_T)=K_z$, и выполнив ряд преобразований, формулу 50 можно записать в виде

$$\operatorname{tg}\alpha_{\partial 1} = \frac{(K_z - 1) * \sin\alpha_n + 1 - K_l * \cos\alpha_n}{(K_z - 1) * \cos\alpha_n} \quad (51)$$

6.3. Расчет угла с учетом износа электрода-инструмента и без учета дополнительных рядов между боковыми поверхностями

Расчетная схема для данного случая обработки представлена рис. 20.

Если одинаковые отверстия обрабатывать электродами-инструментами, имеющими различную величину износа, то при правильном расчете электродов-инструментов они независимо от величины износа в конце обработки будут занимать по отношению к обрабатываемому отверстию одно и то же положение, т.е. боковые поверхности электрода-инструмента будут проходить через линию K^1B^1 . При этом т. B^1 является границей раздела, ниже которой (по линии K^1B^1) боковая поверхность электрода-инструмента участвовала в процессе обработки, выше - не участвовала. Таким образом, через точку Б должны проходить боковые поверхности изнашиваемых 1 (линия ЖБ) и не изнашиваемых 2 (линия КБ) электродов-инструментов. При этом линия КБ параллельна K^1B^1 . Отрезок КЖ показывает величину износа электрода-инструмента 1, который пропорционален толщине снимаемого слоя металла Z_n , т.е. $KЖ = \Delta\gamma * Z_n$. Так как $KГ = Z_n - l_T$ и $МГ = B^1Д^1 = l_6 * \cos\alpha_n * \sin\alpha_n$, определим из треугольников ЖБ и ШБ величину

$$МБ = [(1 + \Delta\gamma_{эл}) * Z_n - l_T + l_6 * \cos\alpha_n * \sin\alpha_n] * \operatorname{tg}\alpha_n = (Z_n - l_T + l_6 * \cos\alpha_n * \sin\alpha_n) * \operatorname{tg}\alpha_n$$

Отсюда

$$\operatorname{tg}\alpha_{эл} = \frac{(Z_n - l_T + l_6 * \sin\alpha_n * \cos\alpha_n) * \operatorname{tg}\alpha_n}{(1 + \Delta\gamma_{эл}) * Z_n - l_T + l_6 * \sin\alpha_n * \cos\alpha_n}$$

Учтя $K = l_6 / l_T$ и $K = Z_n / l_T$, можно записать

$$\operatorname{tg}\alpha_{эл} = \frac{(K_Z - 1 + K_l * \sin\alpha_n * \cos\alpha_n) * \operatorname{tg}\alpha_n}{(1 + \Delta\gamma_{эл}) * K_Z + K_l * \sin\alpha_n * \cos\alpha_n}$$

6.4. Расчет угла с учетом износа электрода-инструмента и дополнительных разрядов между боковыми поверхностями

В данном случае при получении полости заданного размера рабочие участки боковых поверхностей электродов-инструментов, имеющих различную величину износа, должны занимать в конце обработки одно и тоже положение относительно обрабатываемых поверхностей заготовки и проходить, в частности, по линии K^1B^1 (рис. 21). Точка B^1 является границей раздела боковой поверхности электрода-инструмента на участвующую (ниже точки B^1 по линии K^1B^1) и не участвующую (выше точки B^1 по линии K^1B^1) в процессе обработки, т.к. OB^1 является наименьшим расстоянием от точки O , которая обрабатывается в последний момент времени. Таким образом, через т. B^1 должны проходить боковые поверхности как изнашиваемых 1 (линия БЖ), так и не изнашиваемых 2 (линия КБ) электродов-инструментов (линия КБ параллельная K^1B^1).

Определим угол α_3 . т.к. $ЖК = \Delta\gamma_{эл} * Z_n$, $ГМ = БД = B^1D^1$ и $КГ = КМ + МГ = Z_n - l_T + l_6 * \cos\alpha_{31} * \sin\alpha_{31}$, определим $ГБ$ из треугольников $КГБ$ и $ЖГБ$.

$$ГБ = (Z_n - l_T + l_6 * \cos\alpha_{31} * \sin\alpha_{31}) * \operatorname{tg}\alpha_{31} = [(1 + \Delta\gamma_{эл}) * Z_n - l_T + l_6 * \cos\alpha_{31} * \sin\alpha_{31}] * \operatorname{tg}\alpha_3$$

Отсюда можно записать

$$\operatorname{tg}\alpha_3 = \frac{(Z_n - l_T + l_6 * \sin\alpha_{31} * \cos\alpha_{31}) \operatorname{tg}\alpha_{31}}{(1 + \Delta\gamma_{эл}) * Z_n - l_T + l_6 * \sin\alpha_{31} * \cos\alpha_{31}} \quad (53,а)$$

Учитывая, что , имеем

$$\operatorname{tg}\alpha_3 = \frac{(K_z - 1 + K_l * \sin\alpha_{31} * \cos\alpha_{31}) \operatorname{tg}\alpha_{31}}{(1 + \Delta\gamma_{эл}) * K_z - 1 + K_l * \sin\alpha_{31} * \cos\alpha_{31}} \quad (53,б)$$

При этом угол α_{31} определяется из выражения 50.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований является операционный эскиз заготовки, выдаваемый преподавателем.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

1. Спроектировать конструкцию электрода - инструмента для предложенного эскиза детали.
2. Рассчитать размеры Э-И для режимов работы:
 - 2.1 Методом прямого копирования

2.2 Методом копирования с учетом износа Э-И и с орбитальным движением

2.3 Для обработки фасонных полостей с боковыми поверхностями -

3. Оформить конструкторский чертеж Э-И по размерам одного из режимов по указанию преподавателя.