

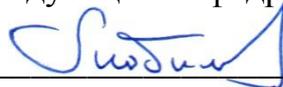
МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Институт *Политехнический*
Кафедра «*Электро- и нанотехнологии*»

Утверждено на заседании кафедры
«Электро- и нанотехнологий»
«19» января 2021 г., протокол №5

Заведующий кафедрой



В.В. Любимов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по проведению практических занятий
по дисциплине
«Технологии и методы обработки концентрированными потоками энергии»

основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы бакалавриата

по направлению подготовки
15.03.01 Машиностроение

с направленностью (профилем)
Машины и технологии высокоэффективных процессов
обработки материалов

Форма обучения: *очная*

Идентификационный номер образовательной программы: 150301-01-21

Тула 2021 год

Разработчик методических указаний

Волгин В.М., профессор, докт.техн.наук, профессор
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)



(подпись)

ОРГАНИЗАЦИЯ И МЕТОДИКА ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

1.1. Цель и задачи практических занятий

Целью практических занятий является закрепление и углубление знаний студентов, полученных на лекциях и лабораторных занятиях при изучении курса «Технология и методы обработки концентрированными потоками энергии», а также приобретение практических навыков проектирования технологических операций с использованием электрофизикохимических методов обработки материалов.

1.2. Объекты проектирования и программное обеспечение

В качестве объектов исследования в ходе занятий используются конкретные процессы обработки материалов (ЭЭО, лазерная обработка, ионная имплантация, вакуумное нанесение покрытий, электролитическое осаждение металлов и сплавов, газотермическое нанесение покрытий). Используя математические модели процессов, в ходе исследований необходимо выявить влияние параметров электрофизикохимических процессов на результаты обработки и дать рекомендации по проведению конкретного процесса обработки.

1.3. Порядок выполнения:

- ознакомиться с теоретическими сведениями к очередному занятию (см. раздел 2);
- ознакомиться с руководством по использованию программного обеспечения для проектирования процесса обработки;
- произвести расчеты для конкретного процесса обработки с исходными данными соответствующего варианта заданий;
- оформить результаты выполнения задания;
- проанализировать полученные результаты и разработать рекомендации по проведению конкретного вида электрофизикохимического процесса обработки

1.4. Отчет о выполнении задания.

Отчет по каждому практическому занятию составляется в произвольной форме и должен содержать:

- указание цели занятия;
- описание рассматриваемой технологической задачи;
- результаты расчетов и проектирования операции обработки концентрированными потоками энергии;
- анализ полученных результатов;
- выводы и рекомендации.

1.5. Литература, рекомендуемая для практических занятий

1. Высокие технологии в машиностроении: учеб. пособие: в 2 ч. / В.В. Любимов [и др.]. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Ч.1. – 2011. – 147 с.
2. Высокие технологии в машиностроении: учеб. пособие: в 2 ч. / В.В. Любимов [и др.]. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Ч.2. – 2011. – 140 с.

УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

2.1. К практическому занятию №1-2 Погрешность копирования при ЭХО цилиндрических поверхностей

При электрохимической обработке (ЭХО) некорректированным электродом-инструментом (ЭИ), рабочая поверхность которого получена эквидистантным смещением поверхности детали на величину расчетного межэлектродного зазора S_0 из-за разных величин межэлектродного зазора (МЭЗ) на различных участках обрабатываемой поверхности возникает погрешность копирования (рис. 1)

$$\Delta_s = \max(S - S_0), \quad (1)$$

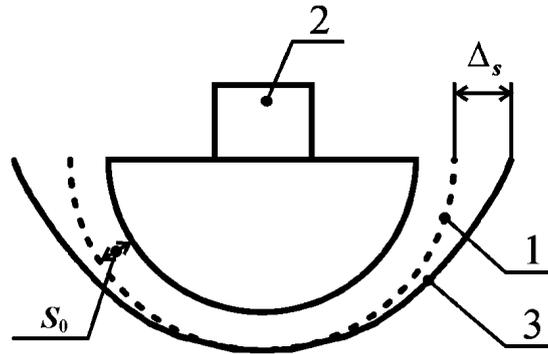


Рис. 1. Погрешность копирования, обусловленная наличием МЭЗ, при ЭХО некорректированным ЭИ: 1 – требуемая поверхность детали; 2 – рабочая поверхность ЭИ; 3 – обработанная поверхность

При использовании приближения “идеального” процесса ЭХО, в котором не учитывается изменение свойств электролита в зоне обработки, значение S_0 и распределение МЭЗ могут быть найдены с помощью следующих соотношений:

$$S_0 = \frac{\eta \varepsilon \chi_0 (U - \Delta U)}{\rho V_c}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{S_0 V_c}{S} - V_c \cos \theta_c - V_c \sin \theta_c \frac{\partial S}{\partial u}, \quad (3)$$

где η - выход по току; ε - электрохимический эквивалент обрабатываемого материала; χ_0 - удельная электропроводность электролита; U - напряжение, приложенное к электродам; ΔU - падение напряжения в приэлектродных слоях; ρ - плотность обрабатываемого материала; V_c - подача ЭИ; $\theta_c(u)$ - угол между направлением подачи ЭИ и нормалью к обрабатываемой поверхности; u - расстояние вдоль поверхности ЭИ.

В стационарном режиме обработки соотношение (4.3) примет вид

$$\frac{S_0}{S} - \cos \theta_c - \sin \theta_c \frac{\partial S}{\partial u} = 0, \quad (4)$$

Для цилиндрического (шарового) ЭИ радиусом R_c положение точки ОД можно определить так (рис. 2)

$$u = R\theta_c \quad (5)$$

где $R = \pm R_c$, причем знак “+” соответствует вогнутому ЭИ, а знак “-“ выпуклому ЭИ.

С учетом (5) из уравнения (4) следует уравнение распределения МЭЗ для цилиндрического ЭИ

$$\frac{\partial S}{\partial \theta_c} = \frac{R}{\sin \theta_c} \left(\frac{S_0}{S} - \cos \theta_c \right) \quad (6)$$

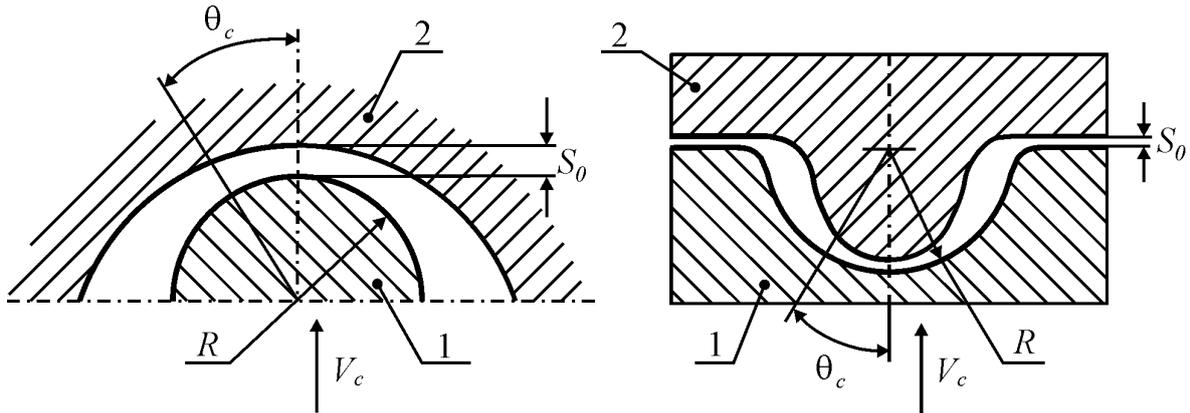


Рис. 2. Схемы ЭХО цилиндрическими ЭИ: а – выпуклым, б – вогнутым, 1 – ЭИ, 2 – заготовка

В результате численного решения уравнения (6) определяются распределения МЭЗ (рис. 3) по которым может быть рассчитана погрешность копирования (1).

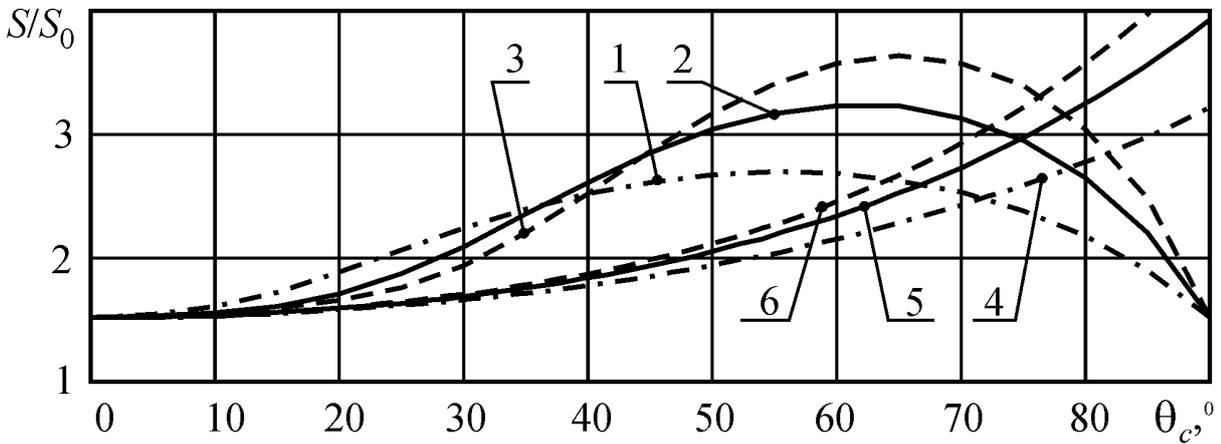


Рис. 3. Распределение величины МЭЗ по поверхности цилиндрического вогнутого (1 - 3) и выпуклого (4 - 6) электрода при $S_0 = 1.5$ мм:

1, 4 – $R_c = 5$ мм; 2, 5 $R_c = 10$ мм; 3, 6 – $R_c = 15$ мм

При проектировании операций ЭХО цилиндрических поверхностей некорректированным ЭИ требуется определить величину расчетного МЭЗ, при которой погрешность копирования не превышает некоторого заданного значения $\Delta_{с\text{доп}}$. Для выбранных в соответствии с рекомендациями, приводимыми в справочной литературе, условиями проведения обработки

с помощью соотношения (4.2) рассчитывается скорость перемещения ЭИ и основное время обработки

$$t_0 = \frac{R + S_n - S_c}{V_c} \quad (6)$$

где S_n - начальное значение МЭЗ, устанавливаемое до начала обработки.

2.2. К практическому занятию № 3-4 Многостадийная ЭХО регулярных рельефов

В многостадийной ЭХО, требуемые геометрические параметры регулярного рельефа (РР), а именно, радиусы R_c и R_L , глубина H_L , и шаг t (рис. 1) обеспечиваются последовательной обработкой каждого элемента РР несколькими рабочими участками ЭИ, имеющими различные размеры (рис. 2). Круговые рабочие участки ЭИ имеют шаг равный шаг РР и формируют несколько секций. В каждой секции размеры рабочих участков (РУ) одинаковы. Обработка производится в несколько циклов. В течении каждого цикла элементы РР обрабатываются рабочими участками одной секции в течении времени T ; затем ЭИ быстро перемещается вдоль своей оси на расстояние $L = t \cdot n$ (где n – число рядов рабочих участков в одной секции). Во время следующего цикла элементы РР обрабатываются рабочими участками другой секции.

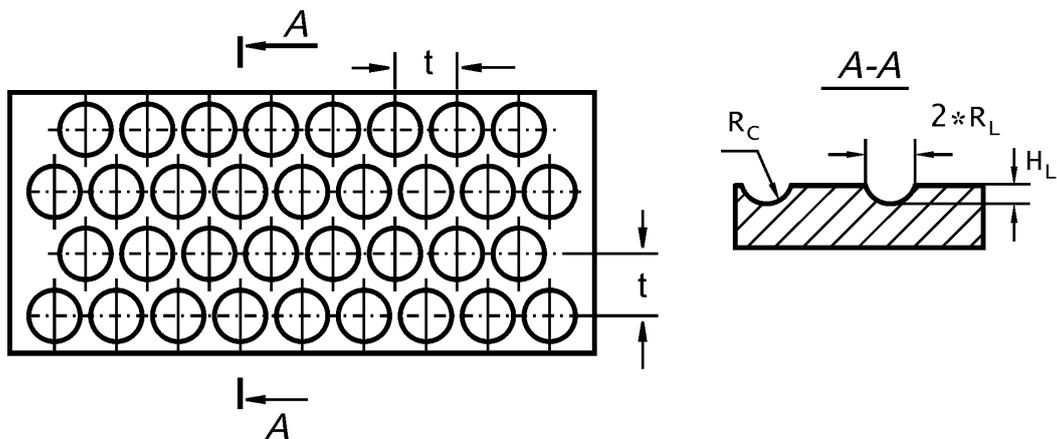


Рис. 5.1. Поверхность с регулярным рельефом

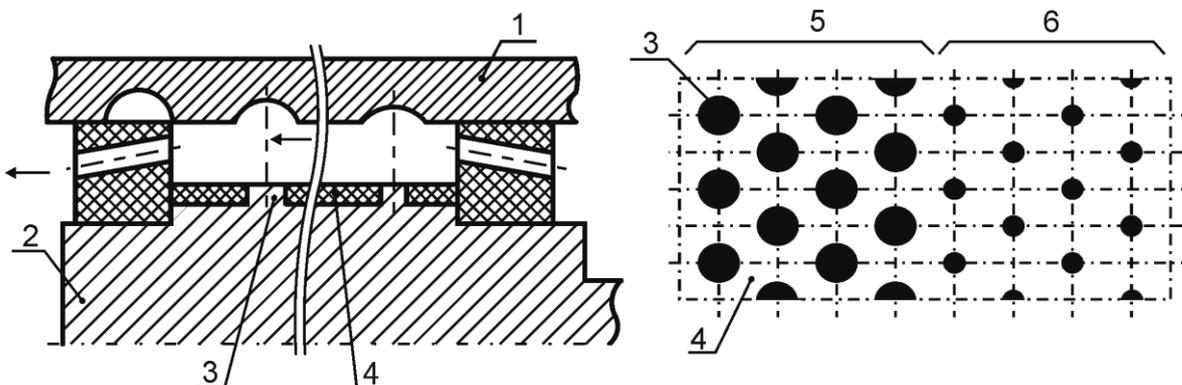


Рис. 2. Электрод-инструмент для многостадийной ЭХО РР:

1 - заготовка, 2 - ЭИ, 3 – рабочий участок ЭИ, 4 - изолятор, 5, 6 – секции ЭИ

При проектировании многостадийной ЕСМ необходимо определить схему обработки, необходимое количество стадий обработки, геометрические параметры рабочих участков ЭИ, количество секций рабочих участков и количество рядов рабочих участков в каждой секции, продолжительность цикла обработки. Кроме того, должен быть выбран состав и температура электролита, назначены режимы обработки.

Для решения этих задач можно использовать модель “идеального” процесса ЭХО, включающую в себя уравнение Лапласа для потенциала электрического поля φ и уравнение эволюции обрабатываемой поверхности $\Phi(x, y, z, t) = 0$:

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\operatorname{grad} \varphi) &= 0 \\ V_{\text{ЭХО}} &= -\frac{\eta \varepsilon \chi_0}{\rho} |\operatorname{grad} \varphi| \\ \frac{\partial \Phi}{\partial t} + V_{\text{ЭХО}} |\operatorname{grad} \Phi| &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где η - выход по току; ε - электрохимический эквивалент обрабатываемого материала; χ_0 - удельная электропроводность электролита; ρ - плотность обрабатываемого материала.

Численное решение уравнений осуществляется с использованием прикладной программы, разработанной в ТулГУ, предусматривающей решение уравнения Лапласа методом граничных элементов и уравнения эволюции поверхности Лапласа используются разработанные методы моделирования эволюции обрабатываемой поверхности – методом “Level Set”.

В качестве переменных величин, оказывающих влияние на форму и размеры элемента рельефа, были использованы радиус рабочего участка катода - R_k и межэлектродный зазор – S . Предварительно проводятся расчеты для одностадийной обработки, с целью определения размеров рабочего участка катода, при которых среднеквадратическое отклонение, полученного в результате обработки профиля РР от требуемого, будет минимальным (рис. 3). В рассматриваемом случае минимальная погрешность имеет место при $R_L = 1.75$ мм. Причем, в средней зоне элемента РР удаляется материала заготовки больше, чем требуется; а на периферии элемента РР материала удаляется недостаточно. В результате этого не обеспечивается сферическая форма поверхности элемента РР. Для получения требуемой формы элемента РР необходимо изменить поле скоростей анодного растворения (уменьшить скорость в средней зоне элемента и увеличить на периферии) за счет реализации многостадийной обработки. В простейшем случае это будет двухстадийная обработка. Если двух стадий оказывается недостаточно, то третья и последующие стадии, вводятся аналогично второй. Поэтому достаточно рассмотреть только двухстадийную обработку (рис. 4).

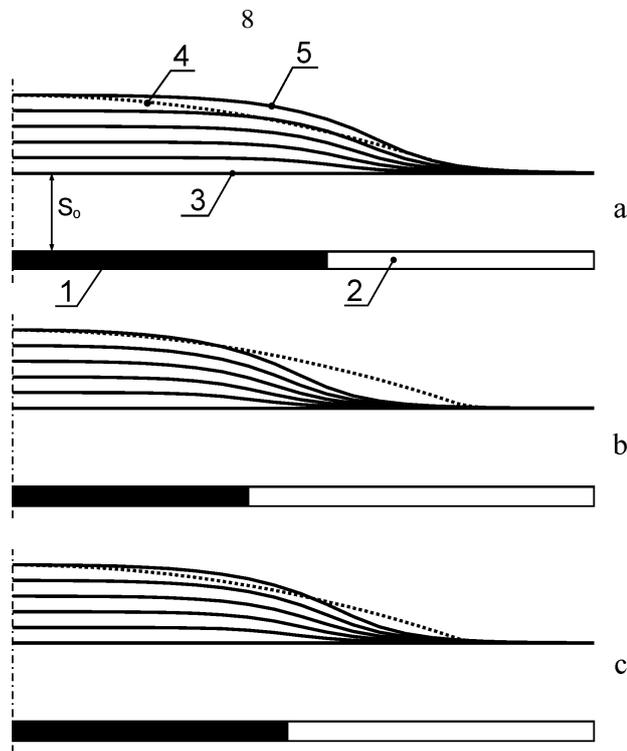


Рис. 3. Эволюция обрабатываемой поверхности при ECM PP ($R_L=3$ мм, $H_L=0.5$ мм) при $S_0=0.5$ мм (1 – рабочий участок катода, 2 – изолятор, 3 – поверхность заготовки до обработки, 4 – требуемая форма элемента регулярного рельефа, 5 – поверхность после обработки): а - $R_K = 2$ мм, б - $R_K = 1.5$ мм, в - $R_K = 1.75$ мм

При двухстадийной обработке необходимо определить размеры (радиусы) РУ для первой и второй стадий, а также величину припуска, снимаемого на одной из стадий (для определенности будем считать, что на первой), на другой стадии величина припуска, однозначно определяется исходя из заданной глубины элемента PP. Радиус РУ ЭИ для одной из стадий должен быть меньше, чем радиус, обеспечивающий наименьшую погрешность при одностадийной обработке, а для другой стадии должен быть больше. Причем наибольшее значение радиуса РУ ТЕ не должно превышать радиуса элемента PP. Исходя из этих ограничений на размеры РУ ТЕ, и последовательно проводя расчеты при различных значениях радиусов и припуска, снимаемого на первой стадии, можно установить при каких значениях радиусов и каком припуске будет обеспечена наибольшая точность. Если погрешность формы элемента PP при этом не будет превышать допустимую, то достаточным будет проведение двухстадийной обработки. Если же нет, то необходимо вводить дополнительные стадии. Из представленных на рис. 4 и рис. 5 результатов расчета видно, что форма обработанной поверхности элемента PP определяется не только размерами РУ и распределением припуска по стадиям, но и последовательностью, в которой производится обработка. То есть обработка сначала РУ большего размера, а потом обработка РУ меньшего размера (рис. 4) не эквивалентна обработке, при которой РУ используются в обратной последовательности (рис. 5).

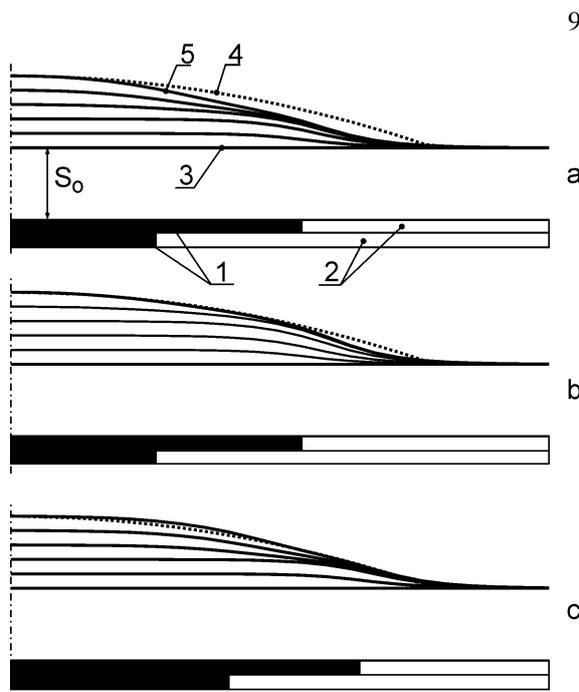


Рис. 4. Эволюция обрабатываемой поверхности при ЭХФ регулярного рельефа ($R_L=3$ мм, $H_L=0.5$ мм) при $S_0=0.5$ мм (1 – рабочий участок катода, 2 – изолятор, 3 – поверхность заготовки до обработки, 4 – требуемая форма элемента РР, 5 – поверхность после обработки): а - $R_K = 2.0 / 1.0$ мм ($z = 0.25/0.25$ мм), б - $R_K = 2.0 / 1.0$ мм ($z = 0.35/0.15$ мм), с - $R_K = 2.4 / 1.5$ мм ($z = 0.20/0.30$ мм)

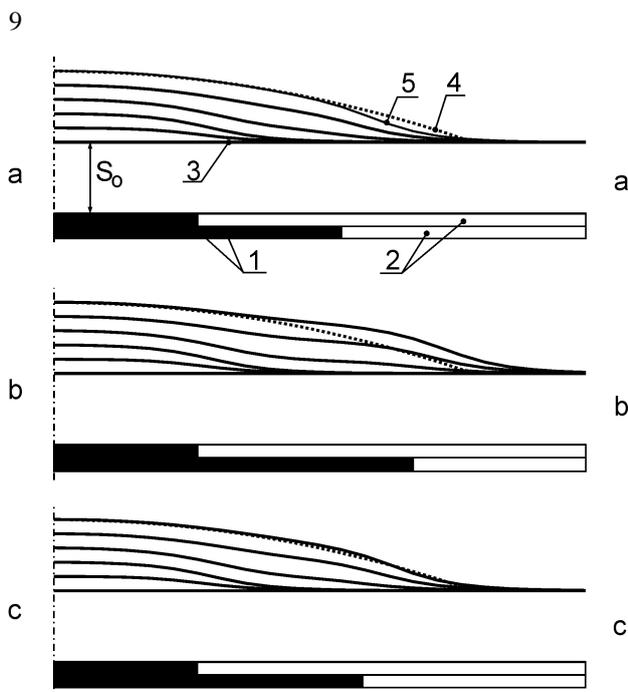


Рис. 5. Эволюция обрабатываемой поверхности при ЭХФ регулярного рельефа ($R_L=3$ мм, $H_L=0.5$ мм) при $S_0=0.5$ мм (1 – рабочий участок катода, 2 – изолятор, 3 – поверхность заготовки до обработки, 4 – требуемая форма элемента РР, 5 – поверхность после обработки): а - $R_K = 1.0 / 2.0$ мм ($z = 0.25/0.25$ мм), б - $R_K = 1.0 / 2.5$ мм ($z = 0.25/0.25$ мм), с - $R_K = 1.0 / 2.15$ мм ($z = 0.25/0.25$ мм)

После определения геометрических параметров РУ и распределения припуска по стадиям, определяется время обработки на каждой стадии. Исходя из соотношения времен обработки элемента РР на отдельных стадиях, определяется количество рядов РУ в секциях с помощью соотношения:

$$\frac{t_m}{t_k} = \frac{N_m}{N_k},$$

где t_m, t_k - продолжительность обработки на m -ой и k -ой стадиях, соответственно; N_m, N_k - количество рядов рабочих участков в m -ой и k -ой секциях ЭИ, соответственно. Если значение отношение t_m/t_k нельзя представить в виде отношения целых чисел, то производится корректировка размеров РУ ЭИ и распределения припуска по стадиям.

Геометрические параметры РР и результаты расчета многостадийной ЭХО и ее экспериментальной проверки представлены в табл. 1, 2.

Геометрические параметры элементов РР при двустадийной ЭХО

Номер эксперимента	Характеристики стадий обработки				Геометрические параметры элемента РР		
	I стадия		II стадия				
	$R_{к1}$, мм	T_1 , мин (H_1 , мм)	$R_{к2}$, мм	T_2 , мин (H_2 , мм)	H_L , мм	R_L , мм	R_C , мм
1	3.5	2	5.5	0.25	1.07	2.27	2.94
2	1.5	2	3.5	0.25	0.91	2.35	3.49
3	3.5	4	5.5	0.5	1.45	3.72	5.50
4	3.5	4	5.5	0.25	1.33	3.43	5.09
5	1.5	4	3.5	0.5	1.30	2.50	3.05

На рис. 6 представлены образцы деталей с регулярным рельефом, полученным при многостадийной электрохимической обработке.

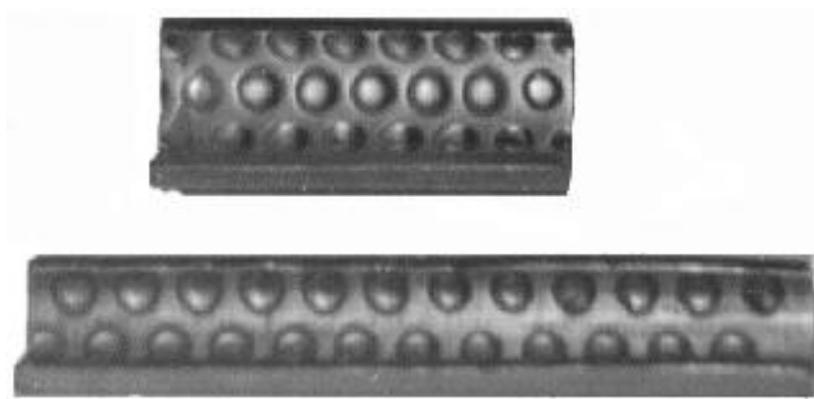
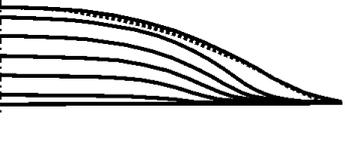
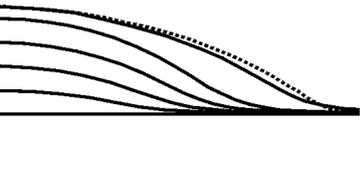
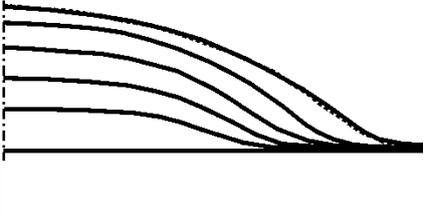
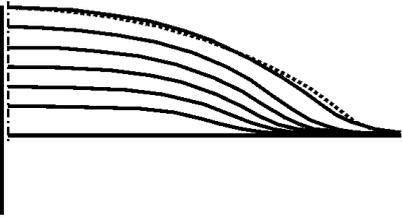
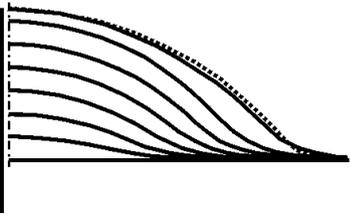


Рис. 6. Образцы труб с регулярным рельефом

Профили элементов РР при двухстадийном ЕСМ

Номер эксперимента	Профиль элемента регулярного рельефа	
	эксперимент	расчет
1		
2		
3		
4		
5		

Как видно из табл. 2 результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными, что свидетельствует о возможности применения рассмотренного подхода для проектирования операций многостадийной электрохимической обработки.

2.3. К практическому занятию № 5-6 Расчет режимов импульсной электрохимической обработки

Одна из важнейших проблем ЭХО заключается в повышении точности обработки. Перспективным направлением решения этой проблемы является уменьшение межэлектродных зазоров (МЭЗ) до сверхмалых величин (менее 0,03мм). Известно, эффективная обработка при сверхмалых МЭЗ возможна в прерывистом режиме и определяется оптимальным дозированием энергии. Изменение физического состояния межэлектродной среды при использовании сверхмалых МЭЗ ограничивает величину

допустимой энергии вводимой в электрохимическую ячейку. Доза энергии с одной стороны должна обеспечивать требуемую скорость анодного растворения материала, с другой стороны ограничивать неустойчивость процесса обработки и исключать переход анодного растворения в другой процесс, например эрозионный.

Количество энергии введенной в электрохимическую систему ограничено процессами газо- и тепловыделения, которые определяют область режимов осуществления процесса. Изменение температуры в межэлектродном промежутке ограничивается в некоторых пределах, определяемых как особенностями анодного растворения металлов, например формированием шероховатости обработанной поверхности в зависимости от температуры электролита, так и условиями устойчивости процесса. Устойчивое проведение процесса ЭХО соответствует условию, когда длительность импульсов напряжения менее или равна времени заполнения минимального МЭЗ газожидкостной смесью или же достижением критической температуры электролита, соответствующей, например, началу кипения электролита. При малых величинах МЭЗ второе ограничение является более сильным и, именно оно, определяет максимально допустимую длительность импульса.

В большинстве известных работ расчет распределения температуры в МЭП осуществляется с использованием приближенных математических моделей, не учитывающих отвод тепла, выделяющегося в зоне обработки, в электроды. Это приводит к завышенным значениям температуры электролита. При этом расчетные длительности импульсов оказываются существенно меньше допустимых, что ведет к снижению производительности электрохимической обработки на сверхмалых МЭЗ.

В одномерном приближении процессы тепломассопереноса в МЭП описываются следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho CT)}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q(x, t) \\ \frac{\partial(\beta s \rho_g)}{\partial t} &= \eta_g \varepsilon_g i \\ \rho &= (1 - \beta)\rho_l + \beta\rho_g \approx \rho_l(1 - \beta) \\ \rho_g &= M_g p / RT \\ i &= \chi_0 [1 + \alpha_T (T - T_0)] (1 - \beta)^n \frac{U(t) - \Delta E(t)}{s} \end{aligned} \quad (1)$$

где x – координата, отсчитываемая по нормали к поверхности электрода; t – время; T – температура электролита; ρ – плотность газожидкостной смеси; ρ_g – плотность газовой фазы в газожидкостной смеси; ρ_l – плотность жидкой фазы в газожидкостной смеси; C – удельная теплоёмкость; λ – удельная теплопроводность; β – относительное объемное газонаполнение; $q(x, t)$ – мощность источника джоулевого тепла; s – межэлектродный зазор; η_g – выход по току для реакции катодного выделения водорода; ε_g – электрохимический эквивалент выделения водорода; M_g – молярная масса газа; p – давление; R – универсальная

газовая постоянная; i - плотность тока; χ_0 - удельная электропроводность чистого электролита при температуре T_0 ; α_T - температурный коэффициент; n - коэффициент, учитывающий влияние газонаполнения на электропроводность электролита; U - напряжение, приложенное к электродам; ΔE - падение потенциала в приэлектродных слоях.

В связи с отсутствием детальных данных о распределении в МЭП фазовой фазы, выделяющейся на катоде, при записи системы уравнений (1) принято ее равномерное распределение.

Для обеспечения возможности учета отвода тепла, выделяющегося в МЭП, в электроды в математическую модель должно быть включено уравнение нестационарного теплопереноса в металлических электродах:

$$\rho_m C_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \lambda_m \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} \quad (2)$$

где индекс m обозначает значения, относящиеся к электроду; ρ_m , C_m - плотность и удельная теплоемкость материала электродов, соответственно; λ_m - коэффициент теплопроводности материала электродов.

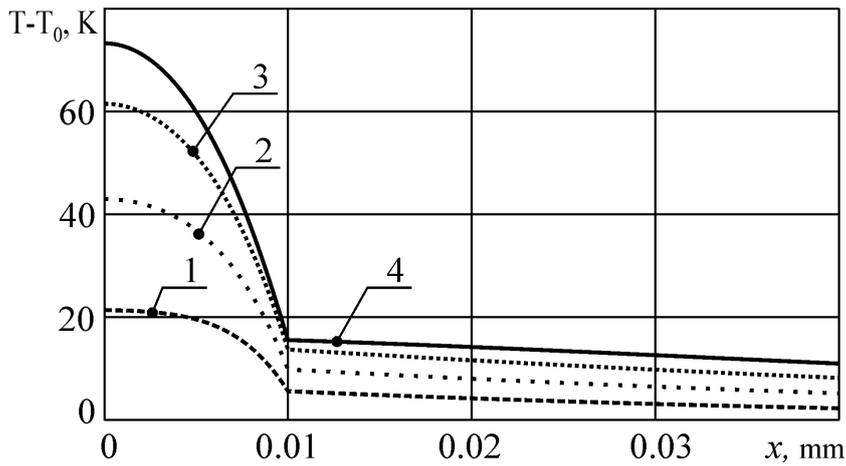
На границе раздела фаз электрод-электролит должны выполняться следующие условия:

$$\begin{aligned} T_m(x_e) &= T(x_e) \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_e} &= \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial x} \Big|_{x_e} + i \cdot \eta \end{aligned} \quad (3)$$

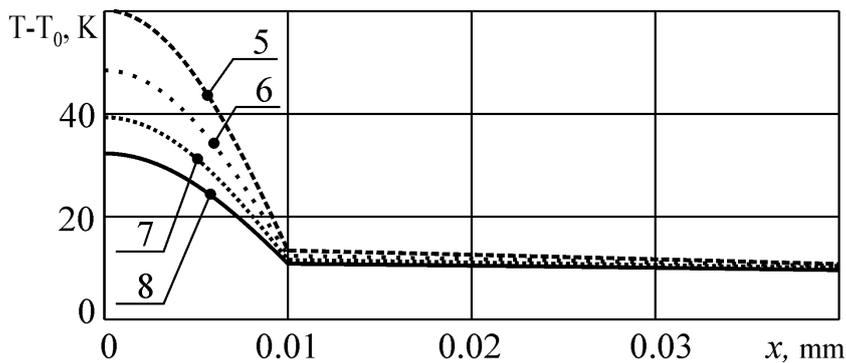
где x_e - координата границы раздела фаз электрод-электролит; η - перенапряжение электрохимической реакции.

Численное решение системы уравнений (1), (2) осуществляется с использованием прикладной программы.

При расчете импульсной ЭХО были приняты следующие значения параметров: $\rho_l = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\rho_m = 7800 \text{ kg/m}^3$, $p = 0.2 \text{ МПа}$, $T_0 = 293 \text{ К}$, $\chi_0 = 5 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$, $\alpha_T = 0.02$, $\lambda = 0.5 \text{ W/(m} \cdot \text{К)}$, $\lambda_m = 50 \text{ W/(m} \cdot \text{К)}$, $C = 4180 \text{ J/(kg} \cdot \text{К)}$, $C_m = 460 \text{ J/(kg} \cdot \text{К)}$. Расчеты проводились для единичного импульса и пакета импульсов при ЭХО на МЭЗ меньших 0.05 мм.



а



б

Рис. 1. Распределения температуры в МЭЗ и электроде во время импульса (а) и во время паузы (б) при t равном: 1 – 0.1 мс, 2 – 0.2 мс, 3 – 0.3 мс, 4 – 0.4 мс, 5 – 0.5 мс, 6 – 0.6 мс, 7 – 0.7 мс, 8 – 0.8 мс

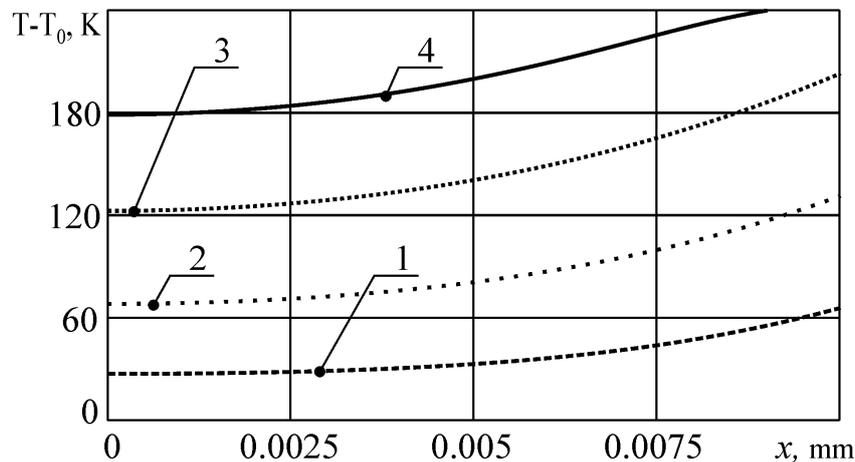


Рис. 2. Распределения температуры в МЭЗ во время импульса без учета отвода тепла в электрод при t равном: 1 – 0.1 мс, 2 – 0.2 мс, 3 – 0.3 мс, 4 – 0.4 мс

Из полученных результатов следует, что в ЭИ отводится значительное количество тепла, генерируемого в МЭЗ при протекании электрического тока. Для рассматриваемых условий обработки максимальное приращение температуры в МЭЗ уменьшается более чем в три раза меньше при учете отвода тепла в ЭИ. При этом изменяется и характер распределения температуры в МЭЗ. В первом случае (рис. 1) максимальное значение температуры достигается в средней части МЭЗ. Во втором же случае (рис. 2) максимальное значение темпе-

ратуры достигается на поверхности ЭИ, что обусловлено поверхностным тепловыделением за счет протекания электрохимической реакции. Не учет отвода тепла в ЭИ приводит к уменьшению расчетной длительности импульса более чем в 4 раза, что ведет к соответствующему снижению производительности обработки. По время паузы температура рабочей жидкости в МЭЗ уменьшается (рис. 1 б), что обеспечивает возможность реализации следующего импульса без нарушения условий устойчивости процесса.

На рис. 3 и 4 представлены результаты моделирования импульсной ЭХО при подаче на электроды пакета импульсов. При расчетах были приняты следующие значения параметров: $U = 10 \text{ V}$, $s = 0.02 \text{ mm}$, $b = 0.3$, $t_p = 0.4 \text{ ms}$, $t_o = 0.4 \text{ ms}$ (рис. 3) и $U = 10 \text{ V}$, $s = 0.02 \text{ mm}$, $b = 0.3$, $t_p = 0.4 \text{ ms}$, $t_o = 0.4 \text{ ms}$ (рис. 4). Максимальное значение плотности тока достигается в первом импульсе, при этом наблюдается и максимальное приращение температуры электролита в МЭЗ. Газовыделение на катоде ведет к уменьшению электропроводности рабочей жидкости, вследствие чего плотность тока от импульса к импульсу уменьшается. Кроме того, уменьшение плотности тока обусловлено и снижением температуры рабочей жидкости во время пауз из-за отвода тепла в ЭИ. Учет теплоотвода в ЭИ позволяет более обоснованно назначать режимы импульсной ЭХО (рис. 5).

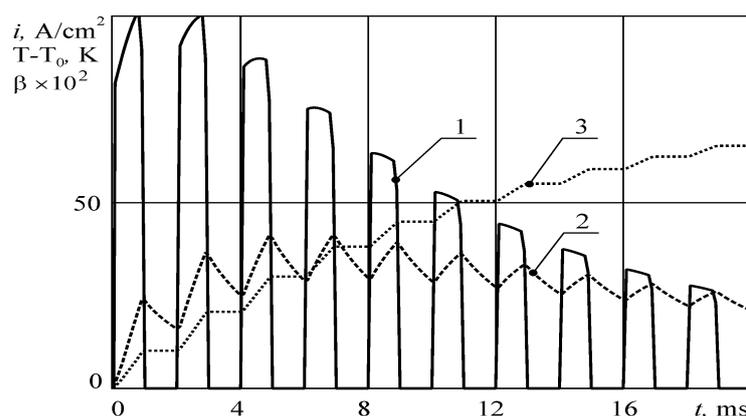


Рис. 3. Распределения плотности тока (1), объемного газонаполнения (2) и средней температуры в МЭЗ (3) при ЭХО пакетом импульсов при $s = 0.05 \text{ mm}$

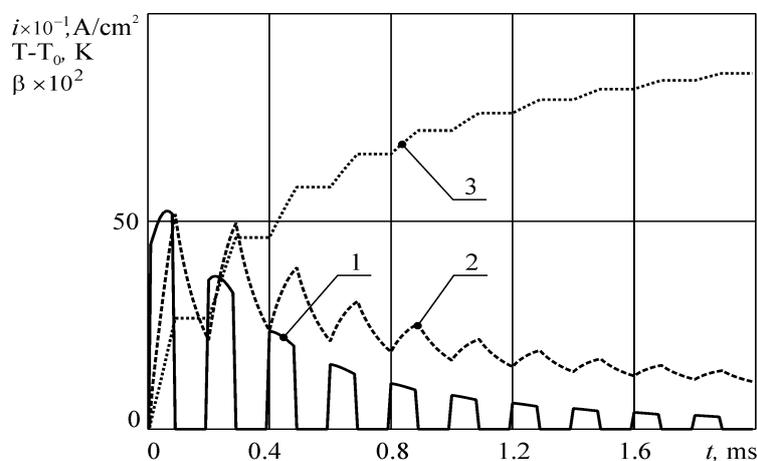


Рис. 4. Распределения плотности тока (1), объемного газонаполнения (2) и средней температуры в МЭЗ (3) при ЭХО пакетом импульсов при $s = 0.01 \text{ mm}$.
(на этом рисунке t и i нужно делить на 5)

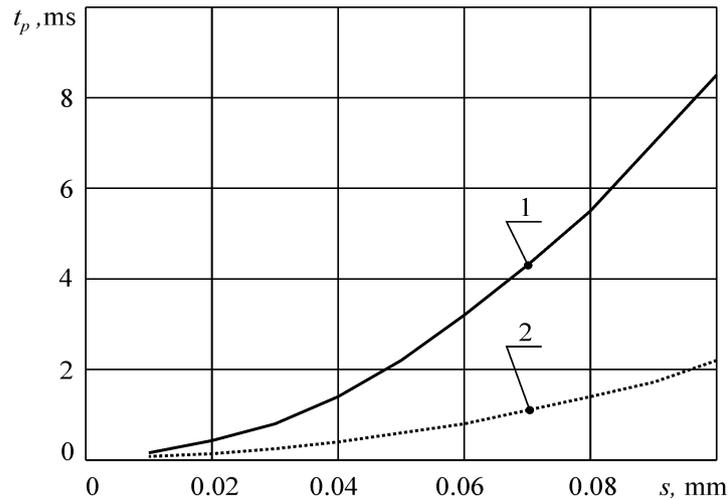


Рис. 5. Зависимость допустимой длительности импульса от величины МЭЗ с учетом (1) и без учета (2) отвода тепла в электроды

2.4. К практическому занятию № 7-9 Проектирование электродов-инструментов для ЭХО поверхностей сложной формы

Типовая схема проектирования и проведения операций электрохимического формообразования включает в себя решение следующих задач:

- выбор схемы обработки;
- выбор состава электролита;
- определение режимов обработки;
- выбор технологического оборудования;
- проектирование электрода-инструмента;
- определение припуска на обработку;
- проектирование необходимой технологической оснастки;
- опытная проверка и корректировка.

В зависимости от особенностей геометрии детали и выбранной схемы обработки состав задач может несколько изменяться.

При проектировании должны быть определены оптимальные режимы обработки, обеспечивающие высокую производительность обработки, заданную точность и качество поверхности.

Ряд задач, таких как выбор схемы обработки, состава электролита, технологического оборудования и оснастки, может быть достаточно просто решен путем использования типовых решений. Наибольшие проблемы при проектировании операций электрохимического формообразования (ЭХФ) связаны с проектированием рабочей поверхности ЭИ и расчетом режимов обработки. Именно от того насколько удачно будут решены эти задачи, в значительной степени зависит объем и трудоемкость доводочных работ, производительность операции ЭХО.

Сложность проектирования операций ЭХО заключается в том, что режимы обработки и форма рабочей поверхности ЭИ не могут быть определены независимо друг от друга. При изменении режима обработки изменяется распределение МЭЗ, и, следовательно, для получе-

ния заданной формы и размеров детали необходимо корректировать (изменять) рабочую поверхность ЭИ.

Существующие методы проектирования операций ЭХО базируются на одномерных геометрических моделях поверхностей ЭИ и заготовки, что не позволяет в полной мере учесть физико-химические процессы, протекающие в МЭП, представляющем собой пространственный канал сложной формы, и приводит к низкому качеству проектных решений.

Основой предлагаемой методики автоматизированного проектирования операций трехмерного ЭХО являются математические модели и методы анализа эволюции произвольных поверхностей в пространстве и физико-химических процессов в объеме МЭП и приэлектродных слоях, описанные во второй и третьей главах работы. Общая схема автоматизированного проектирования операций ЭХО представлена на рис. 1.

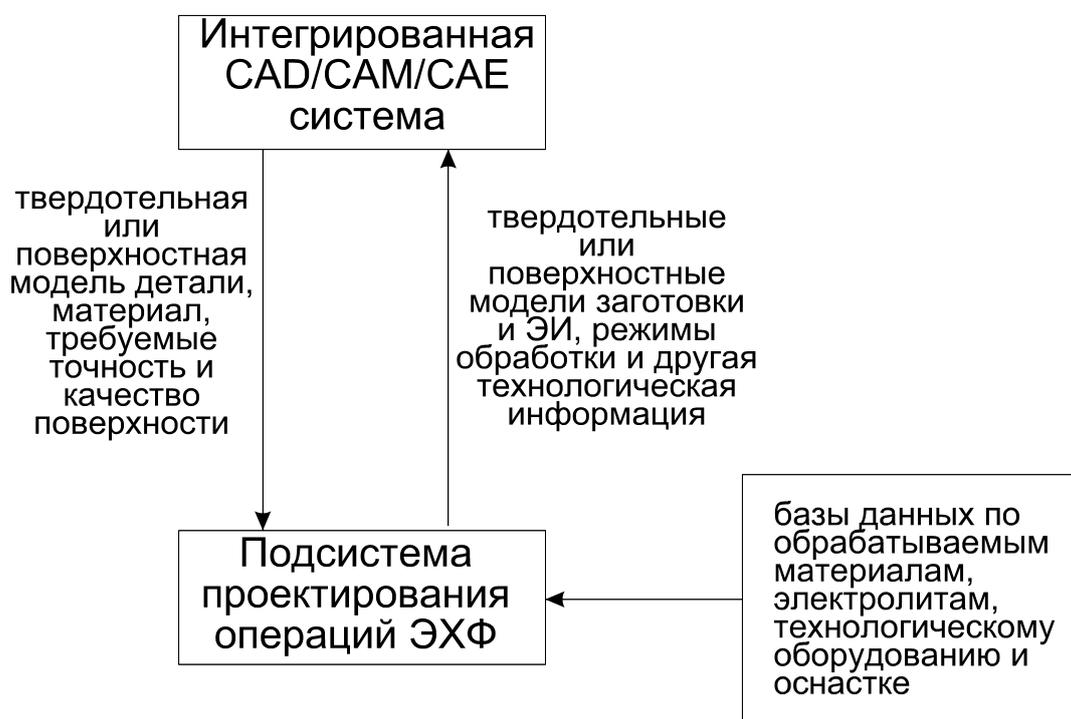


Рис. 1. Общая схема автоматизированного проектирования операций ЭХО

С помощью интегрированной CAD/CAM/CAE системы создается трехмерная твердотельная или поверхностная модель детали, подлежащей электрообработке. Для разработки операции ЭХФ геометрическая модель детали, а также другая, необходимая информация (материал, из которого изготовлена деталь; точность размеров и формы, качество поверхности) передаются из универсальной САПР в подсистему проектирования операций ЭХФ. В зависимости от возможностей используемой САПР экспорт геометрической информации производится в виде твердотельной или поверхностной модели в формате ACIS, кроме того, при наличии в универсальной САПР модуля построения поверхностной сетки из треугольных элементов (такая возможность, например, имеется в системе Pro/Engineer) возможен экспорт детали в виде нерегулярной поверхностной сетки из треугольных элементов.

Формат ACIS, разработанный фирмой Spatial Technology, предназначен для представления каркасных, поверхностных и твердотельных моделей. Поверхности первого и второго порядка представляются аналитически, а сложные поверхности, в том числе и скульптурные

поверхности, представляются с помощью NURBS сплайнов. В отличие от формата STEP, формат ACIS поддерживается в настоящее время большинством известных и наиболее популярных систем автоматизированного проектирования и анализа – AutoCAD, CADdy++, MicroStation Modeler, TurboCAD, Solid Edge, MasterCAM, SmartCAM, Ansys, Nastran и многими другими. При необходимости геометрическая информация о детали из формата ACIS может быть конвертирована в формат STEP с помощью STEP/ACIS транслятора.

В формате ACIS используется граничное представление твердого тела, при этом твердотельная и поверхностная модель фактически совпадают, т.к. твердотельная модель определяется с помощью задания поверхности тела. При этом поверхность тела определяется как совокупность ограниченных участков поверхностей. Для каждого участка поверхности твердого тела в файле содержится аналитическое или приближенное описание поверхности и границы участка. Такой способ представления очень удачно подходит для проектирования операций трехмерного ЭХФ, т.к. при этом, в отличие от процессов механической обработки и пластического деформирования, необходимо строить только поверхностные сетки.

Подсистема автоматизированного проектирования операций ЭХФ в диалоговом режиме обеспечивает решение следующих задач:

- анализ (прямая задача), в которой по заданной поверхности ЭИ определяется форма и размеры обрабатываемой поверхности;
- синтез (обратная задача), в которой определяется рабочая поверхность ЭИ для получения заданной обработанной поверхности.

Использование диалогового режима при проектировании операций ЭХФ обусловлено сложностью математических описаний процесса и используемых численных методов, большим количеством параметров, от которых зависит решение задачи. Реализация диалогового режима проектирования, фактически означает замену обработки пробных деталей при проведении доводочных работ, “обработкой” геометрических моделей пробных деталей при проведении вычислительных экспериментов.

Хотя первая задача (анализ) имеет важное значение для анализа точности ЭХФ, для практики наибольший интерес представляет решение второй задачи. Однако, точное решение этой задачи связано с большими сложностями, т.к. требует решения задачи в области с неизвестной границей. Исходя из этого, при автоматизации проектирования операций ЭХФ был использован подход, в соответствии с которым, обратная задача ЭХФ сводится к решению цепочки прямых задач. По результатам решения этих задач производится корректировка рабочей поверхности ЭИ и режима обработки.

Выходной информацией подсистемы автоматизированного проектирования операций ЭХФ, являются геометрические модели заготовки и ЭИ, режимы обработки и другая необходимая технологическая информация. Эта информация передается в интегрированную CAD/CAM/CAE систему для формирования технологической документации, разработки технологии изготовления оснастки и ЭИ и, в частности, разработки программ для станков с ЧПУ для получения формообразующих поверхностей ЭИ.

Основой автоматизированного проектирования операций ЭХФ является решение задачи определения формы и размеров обработанной поверхности (задачи анализа) при ее обработке заданным ЭИ. Исходными данными для решения этой задачи являются: геометрия рабочей поверхности ЭИ и заготовки, схема обработки, состав электролита, схема и кинети-

ческие параметры электродных реакций, схема подачи электролита, режим обработки - подача ЭИ, технологическое напряжение или ток, давление электролита, длительность и частота импульсов и т.д.

Пусть поверхность ЭИ задана параметрически, вектор-функцией

$$\mathbf{r}^c = \mathbf{r}^c(u, v), \quad \mathbf{r}^c = (x^c, y^c, z^c), \quad (1)$$

где u, v - параметры поверхности.

Поверхность заготовки $\mathbf{r}^a = \mathbf{r}^a(u, v), \mathbf{r}^a = (x^a, y^a, z^a)$ отстоит от поверхности ЭИ на величину МЭЗ - $S(u, v)$ в направлении нормали \mathbf{n}^c , т.е.

$$\mathbf{r}^a = \mathbf{r}^c + S\mathbf{n}^c. \quad (2)$$

Таким образом, для определения обрабатываемой поверхности достаточно найти распределение МЭЗ в зоне обработки. Уравнение для распределения МЭЗ, представляющее собой дифференциальную форму закона сохранения объема МЭЗ имеет вид:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = V_{\text{ЭХФ}} \sqrt{1 + \Delta_1 S|_a} - \mathbf{V}_c \cdot \mathbf{n}^c + \text{div}(S\mathbf{V}_c)|_a. \quad (3)$$

где $V_{\text{ЭХФ}} = \frac{\eta \varepsilon}{\rho} i(u, v, t)$ - модуль скорости анодного растворения, η - выход по току, ε - массовый электрохимический эквивалент материала заготовки, ρ - плотность материала заготовки, i - плотность тока, \mathbf{V}_c - скорость перемещения ЭИ, $\Delta_1 S|_a$ - первый дифференциальный параметр Бельтрами МЭЗ на обрабатываемой поверхности, являющийся инвариантом потенциального векторного поля и, следовательно, не зависящий от выбора системы координат.

В правую часть уравнения (7.3) входит три члена учитывающие изменение МЭЗ за счет:

- процесса анодного растворения (катодного осаждения) металла;
- нормальной к поверхности ЭИ составляющей скорости относительного механического перемещения электродов;
- касательной к поверхности ЭИ составляющей скорости относительного механического перемещения электродов.

Учет изменения величины МЭЗ вследствие трансляции поверхности заготовки вдоль поверхности ЭИ является наиболее важным отличием рассматриваемой модели от известных. Учет взаимного “проскальзывания” поверхностей позволяет с помощью соотношения (7.3) определять изменение величины МЭЗ для любых схем ЭХФ.

Математическая модель для расчета распределения МЭЗ при трехмерном эквидистантном ЭХФ представляет собой закон сохранения объема МЭП и учитывает метрику и кривизну поверхностей электродов. Для практического использования этой модели для анализа ЭХФ поверхностей сложной формы необходимы численные методы, реализованные на нерегулярной сетке, построенной на поверхности ЭИ. Моделирование трехмерного эквидистантного ЭХФ осуществляется в следующей последовательности:

- построение твердотельной модели ЭИ;
- преобразование твердотельной модели в поверхностную;

- экспорт поверхностной модели в формате ACIS;
- разбиение поверхности ЭИ на треугольные элементы. В процессе построения сетки определялись главные кривизны и главные направления для каждого конечного элемента;
- расчет распределения МЭЗ.

Примеры применения описанной методики проектирования операций ЭХО поверхностей сложной формы представлены на рис. 2 – 4.

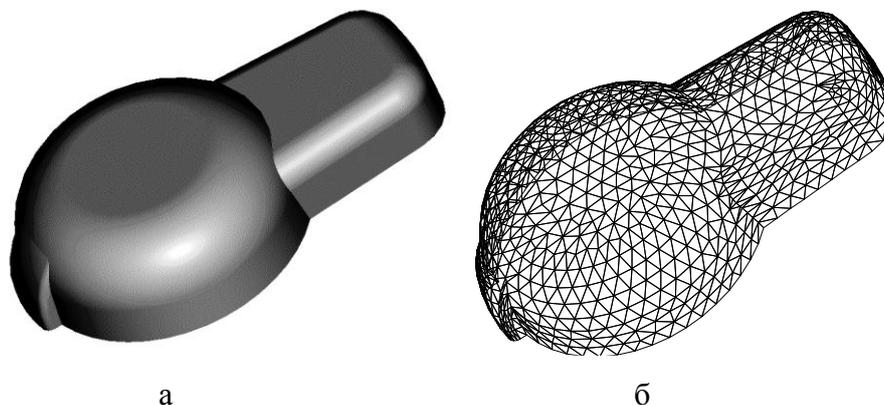


Рис. 2. Рабочая поверхность электрода-инструмента:

а - твердотельная модель, б – поверхностная модель из треугольных элементов

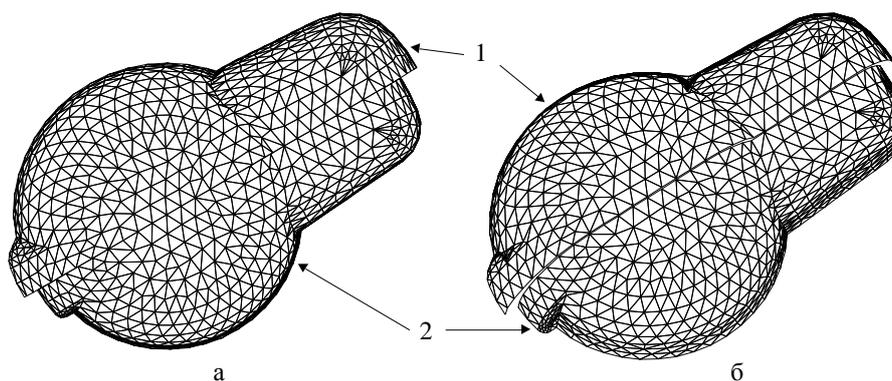


Рис. 3. Результаты моделирования электрохимического формообразования:

1 - обработанная поверхность, 2 - поверхность электрода-инструмента,
а - вид сверху, б - вид сбоку.

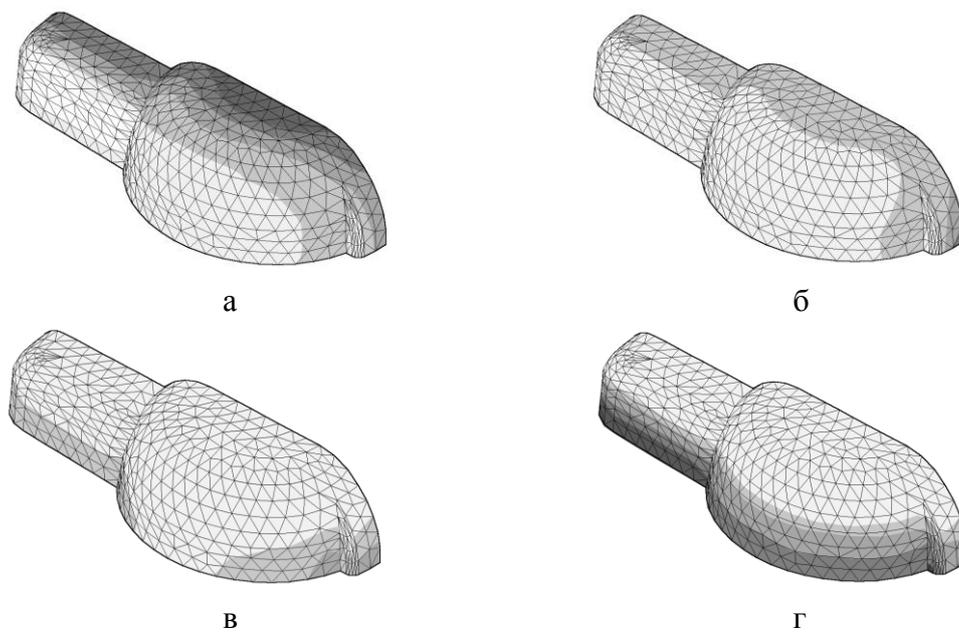


Рис. 4. Влияние направления перемещения ЭИ на распределение МЭЗ:

а - $V_c=(0,2,0)$, б - $V_c=(0,2,1)$, в - $V_c=(0,1,2)$, г - $V_c=(0,0,2)$