Энгельсский технологический институт (филиал) федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Методические указания к практическим работам по дисциплине «Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов» для студентов направлений

15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»

Энгельс 2024

ВВЕДЕНИЕ

Учебная дисциплина «Электрофизические и электрохимические методы обработки» является составной и неотъемлемой частью дисциплины «Технология машиностроения» и базируется на ее теоретических положениях.

Решение задачи развития и совершенствования машиностроительного производства неразрывно связано с необходимостью совершенствования технологии и техники обработки заготовок.

Анализ тенденций развития машиностроения в последнее время свидетельствует о возрастающей роли электрофизических и электрохимических методов обработки (ЭФХМО) как высокоточных, эффективных и экономичных, а нередко и как единственно возможных при обработке сложнопрофильных заготовок из высокопрочных и труднообрабатываемых материалов.

Основная цель дисциплины «Электрофизические и электрохимические методы обработки» – вооружить студентов знаниями о теоретических основах, технологических возможностях, принципах реализации ЭФХМО в соответствии с информацией о современных научных и технических достижениях отечественного и зарубежного машиностроения в этой области.

Контрольная работа выполняется в виде пояснительной записки в соответствии с требованиями, изложенными в разделе 3 настоящих методических указаний. Содержание заданий к контрольной работе представлено в приложении 1.

«ЭЛЕКРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ»

Общие положения

Выполнение практической работы имеет цель – оказать содействие бакалавру любой формы обучения в освоении необходимых объ-емов знаний из теоретической части курса и приобретении практиче-ских навыков технологической подготовки операций электрофизиче-ской и электрохимической размерной обработки заготовок (например, расчета режима обработки, нормирования процесса обработки, выбо-ра технологического оборудования). Эти навыки будут необходимы в практической инженерной деятельности, а также при выполнении со-ответствующих разделов курсового проекта по технологии машино-строения и выпускной квалификационной работы (например, при раз-работке технологических эскизов размерной обработки заготовок).

В практическую работу входит решение четырех задач по расчету технологических параметров размерной электроэрозионной обработки (ЭЭО) (задачи №1 и №2), электрохимической обработки (ЭХО) (задача №3) и магнитно-абразивной обработки (МАО) (задача №4) в соответствии с заданием на практическую работу (приложение 1).

Практическую работу оформляют в виде пояснительной записки (ПЗ), которая должна включать в себя титульный лист (приложение 2), задание на контрольную работу (приложение 3), содержание, введение, основную часть (решение поставленных задач с приведением необхо-димых пояснений, математических зависимостей, результатов проме-жуточных и окончательных расчетов с указанием единиц измерения физических величин), заключение, список использованной литературы,

оформленной в соответствии с ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Общие требования и правила составления.

Текст ПЗ должен быть написан аккуратно, одним цветом и размещен на обеих сторонах листа белой бумаги формата А4 (210 × 297 мм). Поля оставляют со всех четырех сторон листа: левое – 30 мм, правое – 10 мм, верхнее и нижнее – 20 мм. ПЗ оформляют в соответст-вии с ГОСТ 7.32-2001. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

Методика расчета электрических показателей электроэрозионной обработки заготовок

К электрическим показателям ЭЭО относятся: энергия импульсов $A_и$, частота следования импульсов f, емкость зарядного конденсатора C, сила тока короткого замыкания $I_к$, среднее значение силы тока $I_{ср}$, длительность импульсов $\tau_и$, период повторения импульсов $\tau_{пр}$, скважность импульсов q, напряжение холостого хода $U_{х.х}$ и среднее напряжение пробоя $U_{пр}$.

Для всех способов ЭЭО, в том числе и для ЭЭО проволочным электродом-инструментом (ЭИ) (рис. 1), нашедшей наиболее широкое применение, элементарные профили, получаемые на поверхности обрабатываемой заготовки, и их размеры определяются формой и размерами единичных лунок, а также величиной их перекрытия. При этом диаметр $D_л$ и глубина $h_л$ лунки зависят от электрического режима обработки [1, 4]. Установив функциональную связь электрических показателей обработки с параметрами шероховатости, можно подобрать такой режим ЭЭО, при котором будут обеспечены заданные по рабочему чертежу детали значения высотных параметров шероховатости (R_a, R_z, R_{max}), а также может быть определена толщина дефектного слоя H после ЭЭО.

Согласно [2, 6], высоту микронеровностей по параметру R_a (мкм) можно определить по формуле

$$R_a = \frac{\beta_1^{\ 2}}{20} \cdot \kappa_н \cdot \sqrt[3]{A_и}\ , \qquad (1)$$

где β_1 – коэффициент перекрытия лунок; $\kappa_н$ – экспериментальный коэффициент, учитывающий материал обрабатываемых заготовок, м/Дж ^{0,333}; $A_и$ – энергия импульсов, Дж.

Тогда, решая обратную задачу, получим зависимость для расчета энергии импульсов $A_и$:

$$A_и = \left(\frac{20 \cdot R_a}{\beta_1^{\ 2} \cdot \kappa_н} \right)^3 , \qquad (2)$$

где R_a – нормированное значение параметра шероховатости, заданное по рабочему чертежу детали, мкм.

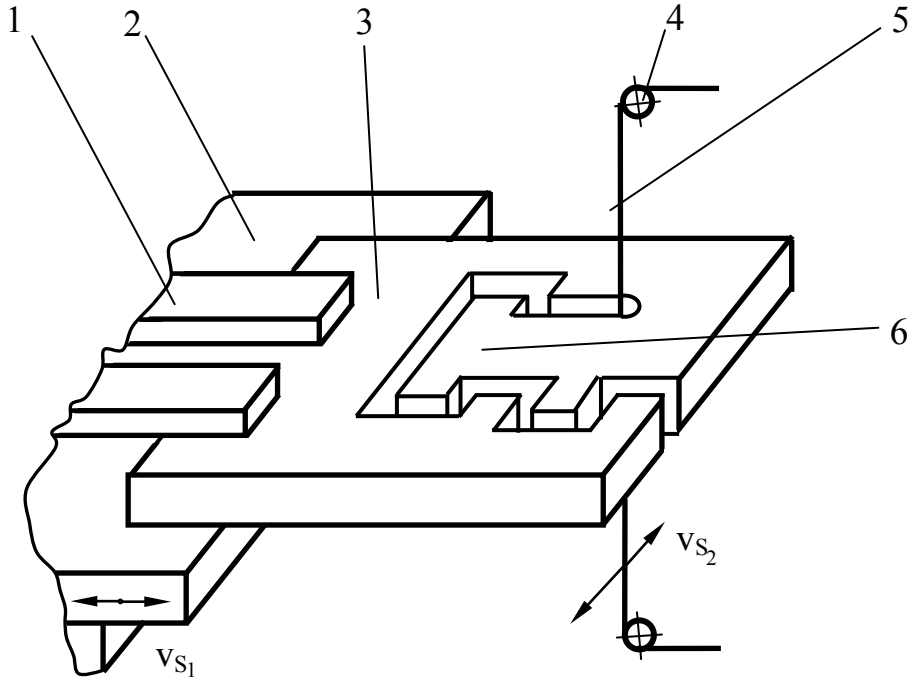


Рис. 1. Кинематическая схема ЭЭО проволочным ЭИ: 1 – прихват; 2 – стол электроэрозионного станка; 3 – заготовка (матрица); 4 – направляющий ролик проволочного ЭИ; 5 – проволочный ЭИ; 6 – заготовка (пуансон); v_{s_1} – движение подачи стола; v_{s_2} – движение подачи проволочного ЭИ; ванна с диэлектрической рабочей жидкостью условно не показана

С учетом того, что большинство вырезных станков оснащено релаксационными генераторами импульсов (ГИ), параметры которых зависят от физического состояния межэлектродного промежутка (МЭП), остальные электрические показатели процесса ЭЭО проволочным ЭИ следует определять через емкость C (Ф) зарядного конденсатора [2]:

$$C = \frac{2 \cdot A_и}{U_{пр}^{\ 2}}\ , \tag{3}$$

где $U_{пр}$ – среднее напряжение пробоя, В: $U_{пр} \approx (0{,}50 - 0{,}75) \cdot U_{х.х}$, где $U_{х.х}$ – напряжение холостого хода, В.

Силу тока короткого замыкания $I_к$ (А) через емкость C (мкФ) определяют по формуле [2]:

$$I_к = 0{,}2 + 0{,}8 \cdot C\ . \tag{4}$$

Согласно [2], среднее значение силы тока

$$I_{ср} \approx (0{,}50 - 0{,}75) \cdot I_к\ . \tag{5}$$

Частоту следования импульсов f (Гц) рассчитывают по зависимости [2]

$$f = \frac{U_{х.х} \cdot I_{ср}}{A_и}\ . \tag{6}$$

Далее рассчитывают период повторения $\tau_{пр}$ (с) и длительность импульсов $\tau_и$ (с):

$$\tau_{пр} = \frac{1}{f}; \tag{7}$$

$$\tau_и = \frac{\tau_{пр}}{q}, \tag{8}$$

где q – скважность импульсов.

Значение энергии импульсов $A_и$ (Дж), удовлетворяющее условию обеспечения нормированного значения R_a, используют для определения толщины дефектного слоя H (мкм) [2]:

$$H \approx \frac{3 \cdot \beta_1^{\ 2}}{4} \cdot \kappa_н \cdot \sqrt[3]{A_и}\,. \qquad (9)$$

Величина H характеризует вероятность возникновения микротрещин на отработанной поверхности заготовки. Если $H \geq 100$ мкм, то, независимо от материала обрабатываемой заготовки, появление микротрещин неизбежно, что в свою очередь может повлиять на прочность и другие эксплуатационные свойства изготовленной с помощью ЭЭО детали.

Таким образом, вышеизложенная методика расчета позволяет определить необходимые для обеспечения заданного качества обработанной поверхности заготовки показатели электрического режима размерной ЭЭО, который необходимо задать на ГИ вырезного станка.

Методика расчета технико-экономических показателей электроэрозионной обработки заготовок

К основным технико-экономическим показателям ЭЭО проволочным ЭИ относятся производительность Q, основное технологическое время обработки $T_о$, суммарные энергозатраты $A_э$, расход проволочного ЭИ по массе $M_и$.

Производительность Q (мм^3/мин) ЭЭО проволочным ЭИ [3, 8]

$$Q = \kappa_2 \cdot \kappa_3 \cdot I_к \cdot U_{пр} \cdot \left(d_и + 2 \cdot \delta_{МЭЗ}\right) \cdot 60 \cdot 10^6, \qquad (10)$$

где κ_2 – экспериментальный безразмерный коэффициент, учитывающий диаметр $d_и$ проволочного ЭИ, толщину заготовки, свойства материалов ЭИ и заготовки; κ_3 – экспериментальный коэффициент, характеризующий свойства различных обрабатываемых материалов, м^2/(с · В · А); $\delta_{МЭЗ}$ – боковой межэлектродный зазор (МЭЗ), мм:

$$\delta_{МЭЗ} \approx 0{,}0745 \cdot \left(\frac{I_{ср}}{f} \right)^{0{,}31}, \qquad (11)$$

где f в кГц.

Основное технологическое время T_0 (мин) ЭЭО проволочным ЭИ рассчитывают по следующим зависимостям:

– при обработке по сплошному металлу (несформированной поверхности) или сформированной поверхности, когда $z_{min} > d_и$:

$$T_0 = \frac{L \cdot \left(d_и + 2 \cdot \delta_{МЭЗ} \right) \cdot b}{Q}; \qquad (12)$$

– при обработке по сформированной поверхности, когда $z_{min} \le d_и$:

$$T_0 = \frac{L \cdot \left(z_{min} + \delta_{МЭЗ} \right) \cdot b}{Q}, \qquad (13)$$

где z_{min} – минимальный припуск на обработку по сформированной поверхности, мм: $z_{min} = R_{max} + H$, где R_{max} – наибольшая высота неровностей профиля, сформированных на предыдущей технологической операции размерной обработки, мм; b – толщина заготовки, мм; L – длина траектории проволочного ЭИ, мм (для упрощения может быть принята равной длине контура формируемой поверхности $L_к$).

Суммарные энергозатраты $A_э$ (кВт · ч) рассчитывают по зависимости

$$A_э = \frac{A_и \cdot N_{имп}}{3600 \cdot 10^3}, \qquad (14)$$

где $N_{имп}$ – число импульсов, задействованных в электроэрозионном разрушении металла на обрабатываемой поверхности:

$$N_{имп} \approx \frac{T_0 \cdot 60}{\tau_{пр}},$$

где T_0 в мин; $\tau_{пр}$ в с.

Расход $M_и$ (г) проволочного ЭИ при ЭЭО определяют по формуле

$$M_и = \pi \cdot r_и^2 \cdot v_{пр} \cdot T_0 \cdot \rho \cdot 60 \cdot 10^{-6}, \qquad (15)$$

где $r_и$ – радиус ЭИ, мм; $v_{пр}$ – скорость перемотки ЭИ, мм/с; T_0 в мин; ρ – плотность материала проволочного ЭИ, кг/м^3.

Параметры $A_и$, $U_{пр}$, $I_к$, $I_{ср}$, f, $\tau_{пр}$, Н определяют по методике, изложенной в п. 3.2 настоящих методических указаний в соответствии с заданием, указанным в табл. П. 1.1. Следовательно, решение задачи № 1 должно предшествовать решению задачи № 2.

Следует отметить, что показатели T_0, $A_э$, $M_и$ являются теми факторами влияния, от которых будет зависеть в итоге технологическая себестоимость операции ЭЭО и изделия в целом.

Методика расчета основных параметров электрохимической обработки

К основным параметрам ЭХО относятся скорость электрохимического анодного растворения металла с поверхности обрабатываемой заготовки $v_р$, время обработки (электролиза) $t_э$, фактическая масса $M_ф$ и объем растворенного металла V_0.

Скорость электрохимического растворения металла с поверхности обрабатываемой электрода-заготовки (ЭЗ) $v_р$ (см/мин) с учетом параметров установленного электрического режима, например, на наиболее распространенных операциях размерного электрохимического калибрования (ЭХК), удаления заусенцев (ЭХУЗ), маркирования (ЭХМ), полирования (ЭХП) и объемного копирования (ЭХОК) (рис. 2), можно определить по формуле [7]:

$$v_р = K_{v\,спл} \cdot i_a \cdot \eta_а , \qquad (16)$$

где $K_{v\,спл}$ – объемный электрохимический эквивалент материала ЭЗ, см^3 / (А · мин); i_a – плотность тока, А/см^2; $\eta_а$ – коэффициент выхода металла по току.

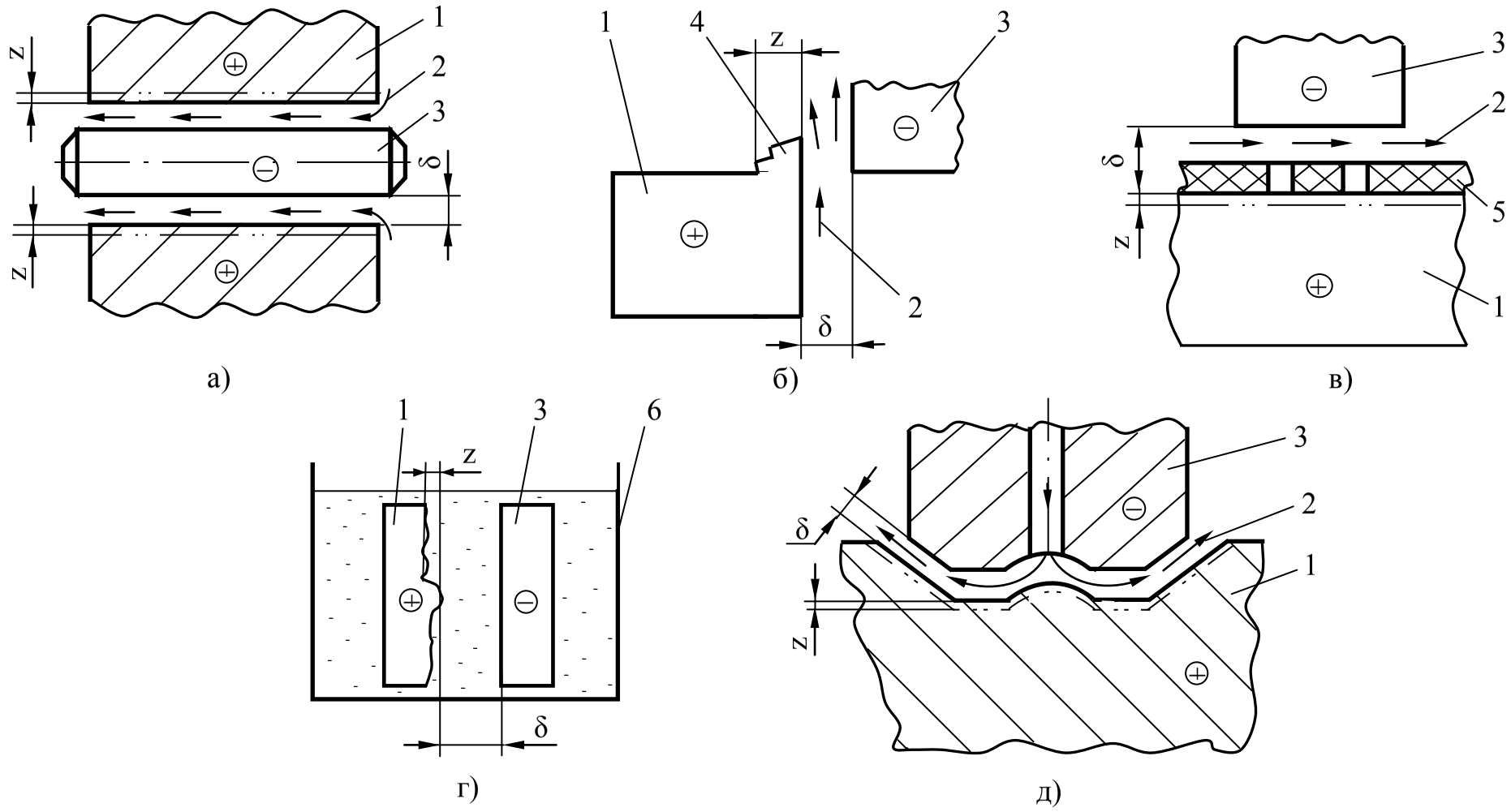


Рис. 2. Кинематические схемы разновидностей ЭХО: а, б, в, г, д – соответственно электрохимическое калибрование, удаление заусенцев, маркирование, полирование, объемное копирование; 1 – ЭЗ; 2 – направление движения электролита; 3 – ЭИ; 4 – заусенец на поверхности ЭЗ; 5 – трафарет из диэлектрического материала; 6 – ванна с электролитом; δ – МЭЗ; z – снимаемый припуск

Время ЭХО $t_э$ (мин) рассчитывают по зависимости [7]

$$t_э = \frac{z}{v_p}, \tag{17}$$

где z – величина удаляемого припуска, см.

Фактическая масса растворенного металла $M_ф$ (г) [7]:

$$M_ф = \kappa_{спл} \cdot I \cdot t_э \cdot \eta_a, \tag{18}$$

где $\kappa_{спл}$ – электрохимический эквивалент материала ЭЗ, г/(А· мин); I – сила тока источника питания электрохимического станка, А.

Объем растворенного металла V_0 (см^3) [7]:

$$V_0 = \kappa_{Vсп} \cdot I \cdot t_{спл} \cdot \eta_a. \tag{19}$$

Таким образом, параметры v_p, $t_э$, $M_ф$ и V_0 являются параметрами оценки технико-экономической эффективности, от которых будет зависеть технологическая себестоимость операции размерной ЭХО.

Методика расчета основных параметров магнитно-абразивной обработки

Одной из наиболее распространенных операций МАО является полирование предварительно обработанных поверхностей заготовок (рис. 3).

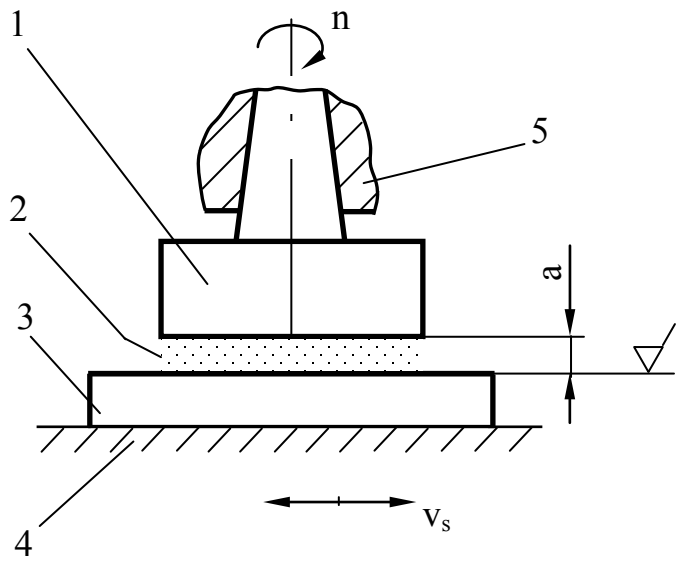


Рис. 3. Кинематическая схема магнитно-абразивного полирования: 1 – магнитный индуктор; 2 – магнитно-абразивный порошок; 3 – заготовка; 4 – стол станка; 5 – шпиндель станка; n – главное движение (вращение магнитного индуктора с заданной частотой); v_s – движение подачи стола станка; а – рабочий зазор между исполнительной поверхностью магнитного индуктора и обрабатываемой поверхностью заготовки

Операция магнитно-абразивного полирования может быть реализована на станках моделей ЭУ – 3, ЭУ – 5, АС – 10.008.

К основным параметрам МАО относятся производительность Q, начальная производительность Q_1, производительность на i-м рабочем ходе Q_i, длительность обработки t, период стойкости порции магнитного порошка T.

Производительность Q (мг/см^2) определяют по формуле [7]:

$$Q = Q_1 \cdot t^m \,, \tag{20}$$

где Q_1 – начальная производительность, мг/(см^2 · мин); t – длительность обработки, мин; m – показатель степени, характеризующий затухание процесса МАО.

Стойкость порции магнитно-абразивного порошка Т (мин) рассчитывают по зависимости [7]:

$$T = \sqrt[1-m]{\frac{m \cdot Q_1 \cdot t}{Q_{min}}}\,, \tag{21}$$

где Q_{min} – минимально допустимая производительность МАО, мг/(см^2 · мин).

При неоднократной замене порции магнитно-абразивного порошка за время t, формула (21) принимает вид

$$T = \frac{L}{v_s}\,, \tag{22}$$

где L – длина поверхности, обработанной за один рабочий ход, на протяжении которой шероховатость не выходит за пределы R_a^{max}, мкм; v_s – скорость подачи заготовки, мм/мин.

Если МАО осуществляется за несколько рабочих ходов с увеличенной скоростью подачи v_s , то

$$T = \frac{L_{p.x}}{v_s} \cdot \left(\frac{m}{\xi}\right)^{\frac{1}{m-1}}\,, \tag{23}$$

где $L_{p.x}$ – длина рабочего хода, мм; ξ – коэффициент допустимого снижения производительности: $\xi = Q_i \,/\, Q_1$, где Q_i – производительность на i-м рабочем ходе, мг/(см^2 · мин).

Таким образом, параметры Q, Q_1, Q_i, t, T – параметры оценки технико-экономической эффективности операции МАО, предопределяющие ее технологическую себестоимость.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица П. 1.1

Варианты заданий к практической работе

Задача № 1: Определить необходимые для обеспечения заданного качества обработанной поверхности заготовки показатели электрического режима ЭЭО: энергию импульсов $A_и$, емкость зарядного конденсатора C ГИ, среднее напряжение пробоя $U_{пр}$, силу тока короткого замыкания $I_к$, среднее значение силы тока $I_{ср}$, частоту следования импульсов ГИ f, период повторения импульсов $\tau_{пр}$, длительность импульсов $\tau_и$; определить ожидаемую толщину дефектного слоя H и дать заключение о вероятности возникновения микротрещин на обработанной поверхности заготовки после ЭЭО

Номер варианта	R_a, мкм	β_1	$к_н$, м/Дж^{0,333}	q	$U_{х.х}$, В	Вид обработки	Материал заготовки	Модель станка	Модель ГИ
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*
1	6,3	1,5	55	14	110	предварительная	45	СВЭИ-2	ГКИ-300-200А
2	6,3	1,5	55	20	120	предварительная	45	СВЭИ-2	ГКИ-300-200А
3	3,2	1,4	50	10	25	предварительная	20Х	4532Ф3	ГКИ-250
4	3,2	1,4	50	15	40	предварительная	20Х	4531Ф3	ГКИ-250
5	3,2	1,4	70	20	50	предварительная	ХН77ТЮР	МА4738Ф3	ГКИ-250
6	6,3	1,5	20	20	140	предварительная	ВК6	СВЭИ-7	ГКИ-300-200А
7	6,3	1,5	20	22	60	предварительная	ВК6	4531П	ГКИ-250
8	6,3	1,5	30	25	150	предварительная	ВК15	4735Ф3	ГКИ-300-200А
9	3,2	1,4	30	30	130	предварительная	ВК15	4732Ф3М	ГКИ-300-200А
10	6,3	1,5	130	17	110	предварительная	АЛ6	СВЭИ-7	ГКИ-300-200А
11	3,2	1,4	130	20	125	предварительная	АЛ6	СВЭИ-2	ГКИ-300-200А
12	6,3	1,5	110	15	55	предварительная	Д1	4531Ф3	ГКИ-250
13	12,5	1,5	110	40	160	предварительная	Д1	СВЭИ-7	ГКИ-300-200А
14	3,2	1,4	70	22	60	предварительная	М1	4532Ф3	ГКИ-250

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ 1

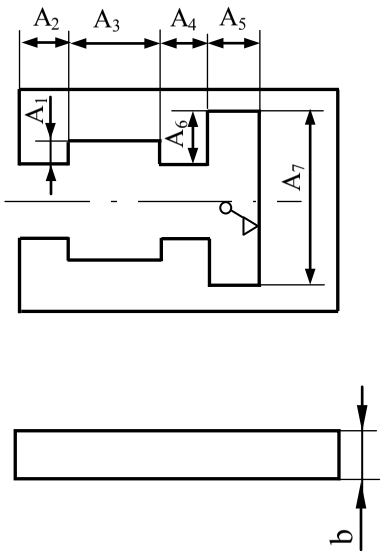
Окончание табл. П. 1.1

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*
15	6,3	1,5	65	12	35	предварительная	М2	СВЭИ-2	ГКИ-300-200А
16	1,6	1,3	55	5	175	окончательная	45	СВЭИ-2	ГКИ-300-200А
17	1,6	1,3	55	6	180	окончательная	45	СВЭИ-2	ГКИ-300-200А
18	1,6	1,3	55	7	185	окончательная	45	СВЭИ-2	ГКИ-300-200А
19	1,6	1,3	50	8	190	окончательная	20Х	СВЭИ-7	ГКИ-300-200А
20	1,6	1,3	50	9	195	окончательная	20Х	СВЭИ-7	ГКИ-300-200А
1	0,8	1,2	50	4	200	окончательная	20Х	СВЭИ-7	ГКИ-300-200А
22	0,8	1,2	20	3	175	окончательная	ВК6	4732Ф3	ГКИ-300-200А
23	0,8	1,2	20	4	180	окончательная	ВК6	4732Ф3	ГКИ-300-200А
24	0,8	1,2	20	5	185	окончательная	ВК6	4732Ф3	ГКИ-300-200А
25	0,8	1,2	30	6	190	окончательная	ВК15	4735Ф3	ГКИ-300-200А
26	0,4	1,1	30	7	195	окончательная	ВК15	4735Ф3	ГКИ-300-200А
27	0,4	1,1	30	8	200	окончательная	ВК15	4735Ф3	ГКИ-300-200А
28	0,4	1,1	110	9	180	окончательная	Д1	СВЭИ-2	ГКИ-300-200А
29	0,4	1,1	70	6	185	окончательная	М1	СВЭИ-2	ГКИ-300-200А
30	0,4	1,1	130	8	200	окончательная	АЛ6	СВЭИ-2	ГКИ-300-200А

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ 1

Таблица П. 1.2

Задача № 2: Определить технико-экономические показатели ЭЭО заготовок: производительность Q, основное технологическое время T_0, суммарные энергозатраты $A_э$, расход ЭИ по массе $M_и$

№ варианта	$к_2$	$к_3 \times 10^{-10}$, м²/(с·В·А)	$d_и$, мм	R_{max}, мм	Вид обработки	$r_и$, мм	$v_{пр}$, мм/с	ρ, кг/м³	Эскиз вырезаемой заготовки (контур внутренний)	Размеры, мм							
										A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	b
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	*14*	*15*	*16*	*17*	*18*
1	1,02	5,87	0,25	–	предварительная по сплошному металлу	0,125	25	8440 (Л63)		4	8	12	9	10	7	25	3
2	1,05	5,87	0,30	–	предварительная по сплошному металлу	0,15	30	8440 (Л63)		6	10	14	11	12	9	27	5
3	1,02	6,00	0,25	–	предварительная по сплошному металлу	0,125	15	8600 (Л68)		8	12	16	13	14	11	29	7
4	1,05	6,00	0,30	–	предварительная по сплошному металлу	0,15	20	8600 (Л68)		10	14	18	15	16	13	31	9
5	1,02	5,28	0,25	–	предварительная по сплошному металлу	0,125	15	8440 (Л63)		12	16	20	17	18	15	33	11

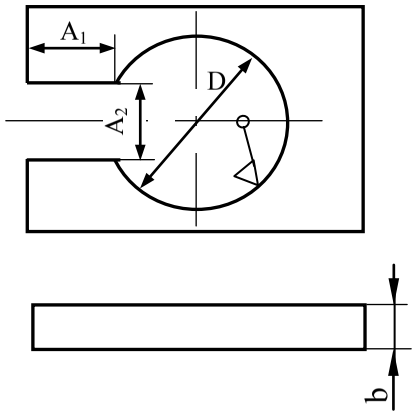
ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ 1

Продолжение табл. П. 1.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
6	1,05	5,00	0,30	0,07	предварительная по сформированной поверхности	0,15	30	8600 (Л68)		5	10	30	25	7	15	12	20
7	1,03	5,00	0,25	0,07	предварительная по сформированной поверхности	0,125	10	8600 (Л68)		7	12	32	27	9	17	14	25
8	1,01	5,23	0,30	0,07	предварительная по сформированной поверхности	0,15	12	8440 (Л63)		9	14	34	29	11	19	16	30
9	1,00	5,23	0,25	0,04	предварительная по сформированной поверхности	0,125	15	8440 (Л63)		11	16	36	31	13	21	18	35
10	0,95	4,00	0,30	0,07	предварительная по сформированной поверхности	0,15	28	8600 (Л68)		13	18	38	33	15	23	20	40

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ 1

Продолжение табл. П. 1.2

№ варианта	κ_2	$\kappa_3 \times 10^{-10}$, м^2/(с·В·А)	d_u, мм	R_{max}, мм	Вид обработки	r_u, мм	$v_{пр}$, мм/с	ρ, кг/м^3	Эскиз вырезаемой заготовки (контур внутренний)	Размеры, мм			
										A_1	A_2	D	b
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	*14*
11	1,00	4,00	0,30	–	предварительная по сплошному металлу	0,15	30	8440 (Л63)		5	10	30	5
12	1,00	4,00	0,30	–	предварительная по сплошному металлу	0,15	20	8440 (Л63)		7	12	32	7
13	1,00	4,00	0,30	–	предварительная по сплошному металлу	0,15	25	8440 (Л63)		9	14	34	9
14	1,00	4,00	0,25	–	предварительная по сплошному металлу	0,125	25	8600 (Л68)		11	16	36	11
15	1,00	4,00	0,25	–	предварительная по сплошному металлу	0,125	28	8600 (Л68)		13	18	38	13

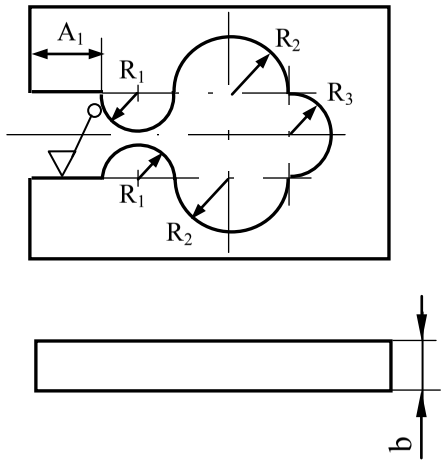
ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ 1

Продолжение табл. П. 1.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
16	0,91	5,87	0,1	0,02	окончательная по сформированной поверхности	0,05	10	19300 (ВА-1-Т)		30	12	30	20
17	0,94	5,87	0,15	0,02	окончательная по сформированной поверхности	0,075	10	8440 (Л63)		35	17	35	25
18	0,92	5,87	0,20	0,02	окончательная по сформированной поверхности	0,10	15	8600 (Л68)		40	22	40	30
19	0,85	6,00	0,05	0,02	окончательная по сформированной поверхности	0,025	15	10200 (МЧ-1-Г)		25	7	25	35
20	0,87	6,00	0,10	0,02	окончательная по сформированной поверхности	0,05	20	19300 (ВА-1-Т)		20	5	20	35

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ 1

Продолжение табл. П. 1.2

№ варианта	κ_2	$\kappa_3 \times 10^{-10}$, м^2/(с·В·А)	d_u, мм	R_{max}, мм	Вид обработки	r_u, мм	$v_{пр}$, мм/с	ρ, кг/м^3	Эскиз вырезаемой заготовки (контур внутренний)	Размеры, мм				
										A_1	R_1	R_2	R_3	b
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	*14*	*15*
21	0,91	6,00	0,10	–	окончательная по сплошному металлу	0,05	8	8440 (Л63)		3	4	7	5	20
22	0,96	5,00	0,15	–	окончательная по сплошному металлу	0,075	9	8600 (Л68)		6	5	8	6	25
23	0,98	5,00	0,20	–	окончательная по сплошному металлу	0,10	10	8600 (Л68)		9	6	9	7	30
24	0,91	5,00	0,05	–	окончательная по сплошному металлу	0,025	11	19300 (ВА-1-Т)		12	7	10	8	35
25	0,95	5,23	0,10	–	окончательная по сплошному металлу	0,05	12	19300 (ВА-1-Т)		5	9	12	10	10

Окончание табл. П. 1.2

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	*14*	*15*
26	0,93	5,23	0,05	0,005	окончательная по сформированной поверхности	0,025	14	10200 (МЧ-1-Г)		8	11	14	12	15
27	0,95	5,23	0,10	0,005	окончательная по сформированной поверхности	0,05	15	10200 (МЧ-1-Г)		11	13	16	14	20
28	0,97	4,00	0,15	0,005	окончательная по сформированной поверхности	0,075	5	8600 (Л68)		14	15	18	16	25
29	0,96	4,00	0,15	0,005	окончательная по сформированной поверхности	0,075	10	8440 (Л63)		6	10	12	11	30
30	0,91	4,00	0,05	0,005	окончательная по сформированной поверхности	0,025	15	19300 (ВА-1-Т)		9	14	17	15	35

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ 1

Таблица П. 1.3

Варианты заданий к практической работе

Задача № 3: Определить основные параметры размерной ЭХО: скорость электролитического растворителя $v_л$, время обработки $t_э$, фактическую массу $M_ф$ и объем растворенного металла V_0.

№ варианта	Материал ЭЗ (марка стали или сплава)	Электролит	$\kappa_{спл} \times 10^{-3}$, г / (А·мин)	$\kappa_{Vспл} \times 10^{-3}$, см^3 / (А·мин)	$\eta_а$	i_a, А / см^2	I, А	z, см	Вид ЭХО	Модель станка
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*
1	45	NaCl 25 %-й	13,19	1,72	0,775	7	1000	0,01	ЭХУЗ	4406
2	У10 (зак.)	$NaNO_3$ 30 %-й	14,87	1,91	0,377	8	2000	0,02	ЭХУЗ	4407
3	12Х18Н9Т	NaCl 25 %-й	16,28	2,16	0,610	9	1600	0,03	ЭХУЗ	Арарат-2
4	30Х10Г10	Na_2SO_4 15 %-й	16,33	2,00	0,147	10	320	0,02	ЭХОК	4420ФЦ
5	ШХ15 (зак.)	$NaNO_3$ 30 %-й	15,86	2,03	0,320	11	3000	0,005	ЭХП	ЛЭ – 166
6	5ХНВ (зак.)	NaCl 25 %-й	17,28	2,20	0,980	12	3000	0,002	ЭХП	ЛЭ – 166
7	35ХГС (зак.)	$NaNO_3$ 30 %-й	17,27	2,20	0,870	13	3000	0,001	ЭХП	ЛЭ – 166
8	ЭИ958 (зак.)	Na_2SO_4 15 %-й	15,84	1,80	0,095	14	3000	0,003	ЭХП	ЛЭ – 166
9	БрОЦС-6-6-3	NaCl 25 %-й	33,68	3,92	0,850	15	100	0,03	ЭХМ	СЭХО–901
10	Л62	Na_2SO_4 15 %-й	26,33	3,19	0,645	7	200	0,04	ЭХМ	СЭХО–901
11	ВД17	NaCl 25 %-й	8,70	3,16	1,660	8	300	0,05	ЭХМ	СЭХО–901
12	ВТ8	$NaNO_3$ 30 %-й	9,48	2,10	0,780	9	400	0,06	ЭХМ	СЭХО–901
13	ВТЗ-1	Na_2SO_4 15 %-й	9,72	2,10	0,001	10	500	0,009	ЭХМ	СЭХО–901
14	У10 (незак.)	NaCl 25 %-й	14,87	1,91	0,775	11	600	0,008	ЭХМ	СЭХО–901
15	ШХ15 (зак.)	Na_2SO_4 15 %-й	15,86	2,03	0,086	12	10	0,001	ЭХМ	МЭ329

Окончание табл. П. 1.3

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*
16	5ХНВ (незак.)	$NaNO_3$ 30 %-й	17,28	2,20	0,650	13	10	0,0015	ЭХМ	МЭ329
17	35ХГС (незак.)	Na_2SO_4 15 %-й	17,27	2,20	0,111	14	10	0,002	ЭХМ	МЭ329
18	ЭИ958(незак.)	NaCl 25 %-й	15,84	1,80	0,973	15	10	0,003	ЭХМ	МЭ329
19	45	Na_2SO_4 15 %-й	13,19	1,72	0,086	14	1000	0,03	ЭХУЗ	4406
20	У10 (зак.)	NaCl 25 %-й	14,87	1,91	0,860	13	2000	0,04	ЭХУЗ	4407
21	45	$NaNO_3$ 30 %-й	13,19	1,72	0,600	12	1600	0,05	ЭХОК	4421
22	30Х10Г10	$NaNO_3$ 30 %-й	16,33	2,00	0,480	11	200	0,06	ЭХУЗ	ЛЭ-142А
23	ШХ15(зак.)	NaCl 25 %-й	15,86	2,03	0,920	10	10	0,1	ЭХМ	ЭХОК-1
24	Л62	NaCl 25 %-й	26,33	3,19	0,835	9	8	0,09	ЭХМ	ЭХОК-1
25	ВД17	$NaNO_3$ 30 %-й	8,70	3,16	0,136	8	9	0,08	ЭХМ	ЭХОК-1
26	ВТ8	Na_2SO_4 15 %-й	9,48	2,10	0,002	10	3200	0,045	ЭХОК	4А423ФЦ
27	ВТ3-1	NaCl 25 %-й	9,72	2,10	0,780	12	3000	0,006	ЭХП	ЛЭ-166
28	Л62	$NaNO_3$ 30 %-й	26,33	3,19	0,630	13	3000	0,005	ЭХП	ЛЭ-166
29	ВД17	Na_2SO_4 15 %-й	8,70	3,16	0,029	10	2000	0,0009	ЭХП	ЛЭ-166
30	У10 (зак.)	Na_2SO_4 15 %-й	14,87	1,91	0,056	8	2500	0,007	ЭХП	ЛЭ-166

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ 1

Таблица П. 1.4

Варианты заданий к практической работе

Задача №4: Определить длительность процесса магнитно-абразивного полирования *t*.

Номер варианта	*T*, мин	Q_1, мг / (см^2 · мин)	Q_{min}, мг / (см^2 · мин)	*m*
1	10	100	20	0,5
2	5	46	18	0,3
3	20	175	44	0,6
4	3	28	7	0,4
5	14	83	31	0,7
6	10	90	10	0,4

Таблица П.1.5

Варианты заданий к практической работе

Задача №4: Определить период стойкости порции магнитно-абразивного порошка *T* при числе *i* рабочих ходов.

Номер варианта	$L_{p.x}$, мм	v_s, мм/мин	*Q*, мг / (см^2 · мин)	Q_i, мг / (см^2 · мин)	*m*	*t*, мин
7	200	100	40	10	0,4	10
8	100	150	30	8	0,3	5
9	50	80	76	23	0,5	14
10	400	50	20	5	0,6	20
11	320	200	90	70	0,7	8
12	100	100	30	8	0,3	7
13	300	150	76	23	0,5	20

ОКОНЧАНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ 1

Таблица П. 1.6

Варианты заданий к практической работе

Задача №4: Определить производительность процесса МАО на *i*-м рабочем ходе Q_i .

Номер варианта	Q_{min}, мг / (см^2 · мин)	m	Q_1, мг / (см^2 · мин)	v_s, мм/мин	$L_{p.x}$, мм	t, мин
14	32	0,7	28	200	420	8
15	17	0,3	49	150	120	5
16	21	0,5	105	80	60	14
17	45	0,6	43	50	480	20
18	8	0,4	8	100	210	10
19	31	0,6	27	150	400	10
20	20	0,4	100	90	70	15
21	7	0,5	7	150	300	5

Таблица П. 1.7

Варианты заданий к практической работе

Задача №4: Определить начальную производительность процесса МАО Q_1 при неоднократной замене порции магнитно-абразивного порошка за время t.

Номер варианта	m	Q_{min}, мг / (см^2 · мин)	t, мин	L, мм	v_s, мм/мин
22	0,3	25	7	1000	100
23	0,4	6	16	610	120
24	0,5	20	13	820	75
25	0,6	48	22	1200	40
26	0,7	9	11	450	220
27	0,8	10	15	400	150
28	0,9	15	10	300	200
29	0,3	25	12	100	100
30	0,4	6	10	200	40

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Машиностроение: в 40 т.: Разд. 3: Технология производства машин / Суслов А. Г.; Ред.-сост. А. Г. Суслов; отв. ред. П. Н. Белянин. – М. : Машиностроение, 2002. – Т. 3-3: Технология изготовления деталей машин. – 840 с.

2. Нерубай, М. С. Физико - технологические методы обработки и сборки: учеб. пособие / М. С. Нерубай, В. В. Калашников, Б. Л. Штриков, С. И. Яресько. – М. : Машиностроение – 1, 2005. – 396 с.

3. Свифт, К. Г. Выбор процесса от разработки до производства / К. Г. Свифт, Дж. Д. Букер. – М. : Издательский дом «Технологии», 2006. – 400 с.

4. Схиртладзе, А. Г. Технологические процессы в машиностроении: учебник для машиностроит. спец. вузов / А. Г. Схиртладзе. – М. : Высшая школа, 2007. – 927 с.

5. Технологические процессы в машиностроении : учебник / С. И. Богодухов, А. Г. Схиртладзе, Р. М. Сулейманов, А. Д. Проскурин; под общ. ред. проф., д-ра техн. наук С. И. Богодухова. – Старый Оскол : ТНТ, 2011. – 624 с.

6. Технологические процессы в машиностроении : учебник / А. Г. Схиртладзе, С. Г. Ярушин. – Старый Оскол : ООО «ТНТ», 2007. – 524 с.

7. Григорьев, С.Н. Технология обработки концентрированными потоками энергии: учеб. пособие / С. Н. Григорьев, Е. В. Смоленцов, М. А. Волосова. – Старый Оскол : ТНТ, 2009. – 280 с.

8. Крупенников, О. Г. Лабораторный практикум по электрофизическим и электрохимическим методам размерной обработки : учеб. пособие / О. Г. Крупенников, Д. В. Кравченко ; под ред. Л. В. Худобина. – Ульяновск : УлГТУ, 2012. – 83 с.