

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Емец Валерий Сергеевич
Должность: Директор филиала
Дата подписания: 18.05.2026 10:09:45
Уникальный программный ключ:
f2b8a1573c931f1098cfe699d1debd94fcff35d7

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Рязанский институт (филиал)
Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования
«Московский политехнический университет»

Кафедра «Энергетические системы и точное машиностроение»

Н.В. Аверин, А.С. Асаев

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Практикум

Рязань
2024

УДК 621.9.04

ББК 34.5

А 19

Аверин, Н.В.

- А19** Инновационные технологии и обработка материалов концентрированными потоками энергии: Практикум / Н.В. Аверин, А.С. Асаев. – Рязань : Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета, 2024. – 48 с.

В практикуме рассмотрен порядок решения задач по электрофизическим методам обработки конструкционных материалов, которые изучаются дисциплиной «Инновационные технологии и обработка материалов концентрированными потоками энергии».

Практикум предназначен для студентов направления подготовки 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств всех форм обучения.

Печатается по решению методической комиссии Рязанского института (филиала) Московского политехнического университета.

УДК 621.9
ББК 34.63-5

© Аверин Н.В., Асаев А.С., 2024
© Рязанский институт (филиал)
Московского политехнического
университета, 2024

Содержание

Введение	4
1 Практическая задача № 1. Изучение влияния параметров электроэрозионной обработки на расход жидкости	5
2 Практическая задача № 2. Электроэрозионная обработка полости литейной матрицы	13
3 Практическая задача № 3. Расчёт размеров электрода-инструмента и качества обработанной поверхности для пары электродов «Медь-Сталь45»	25
4 Практическая задача № 4. Расчёт и проектирование электронно-лучевых технологических систем	31
5 Практическая задача № 5. Расчёт режимов лазерной обработки	34
6 Практическая задача № 6. Проектирование точечного волновода	37
7 Практическая задача № 7. Расчёт прогнозируемого упрочнения железа после лазерного легирования алюминием	41
Библиографический список	47

Введение

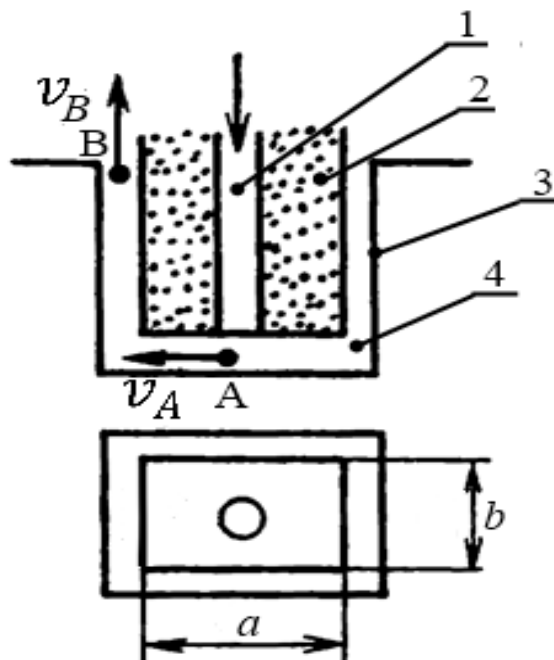
Традиционным способом обработки металлов в машиностроении является лезвийная обработка резанием. Однако, традиционные технологические процессы достигли настолько высокого уровня развития, что последующие работы в этом направлении дают локальные и незначительные улучшения технологических характеристик качества продукции. В связи с этим, в машиностроении находят все большее применение высокие наукоёмкие технологии. В основе таких методов лежат различные электрофизические и электрохимические явления.

В современном машиностроении всё чаще встают задачи изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов, таких как твёрдые сплавы, жаропрочные стали и т. д.; деталей сложной пространственной геометрии; тонкостенных деталей.

Применение электрофизических и электрохимических методов для изготовления вышеописанных деталей, хоть и, зачастую, более энергоёмко, чем лезвийная обработка, однако, является более выгодным, производительным и качественным, так как для данных методов не является критически важной твёрдость инструмента (при лезвийной обработке инструмент должен быть твёрже детали). При использовании электрохимических и электрофизических методов обработки (ЭХО и ЭФО соответственно) практически отсутствует силовое воздействие на обрабатываемую заготовку, что особенно важно при обработке тонкостенных деталей. Кроме того, вышеописанные методы позволяют обрабатывать труднодоступные или практически недоступные для лезвийной обработки поверхности изделия.

1 Практическая задача № 1. Изучение влияния параметров электроэрозионной обработки на расход жидкости

Цель: определить оптимальную величину расхода циркулирующей диэлектрической жидкости, влияющей на межэлектродный зазор (МЭЗ), износ электрода-инструмента (ЭИ) и производительность при электроэрозионной обработке прямоугольной призматической полости (рисунок 1.1).



1 – полость электрода-инструмента, предназначенная для прокачки диэлектрической жидкости; 2 – электрод-инструмент; 3 – обрабатываемая полость; 4 – межэлектродный зазор (МЭЗ); А – точка входа диэлектрической жидкости в МЭЗ; В – точка выхода диэлектрической жидкости из МЭЗ; a – длина электрода-инструмента; b – ширина электрода-инструмента; v_A – скорость потока диэлектрической жидкости на входе в МЭЗ в точке А; v_B – скорость потока диэлектрической жидкости на выходе из МЭЗ в точке В

Рисунок 1.1 – Обработка прямоугольной призматической полости

Задание: по вариантам (таблица 1.1) рассчитать расход жидкости, сравнить полученные при разных условиях значения и сделать вывод о параметрах, оказывающих наиболее сильное влияние на расход жидкости, а так же возможности применения данного ряда параметров в работе.

Таблица 1.1 – Исходные задания

№ варианта	№ зад.	a , мм	b , мм	d_i , мм	v_B , м/с	S , мм
Вариант 1	1	40	30	4	0,050	0,100
	2	10	30	4	0,050	0,100
	3	40	30	1	0,050	0,100
	4	40	30	4	0,013	0,100
	5	40	30	4	0,050	0,400

Продолжение таблицы 1.1

№ варианта	№ зад.	a , мм	b , мм	d_i , мм	v_B , м/с	S , мм
Вариант 2	1	20	30	4	0,050	0,100
	2	5	30	4	0,050	0,100
	3	20	30	1	0,050	0,100
	4	20	30	4	0,013	0,100
	5	20	30	4	0,050	0,400
Вариант 3	1	30	30	4	0,050	0,100
	2	7,5	30	4	0,050	0,100
	3	30	30	1	0,050	0,100
	4	30	30	4	0,013	0,100
	5	30	30	4	0,050	0,400
Вариант 4	1	10	30	4	0,050	0,100
	2	2,5	30	4	0,050	0,100
	3	10	30	1	0,050	0,100
	4	10	30	4	0,013	0,100
	5	10	30	4	0,050	0,400
Вариант 5	1	50	30	4	0,050	0,100
	2	12,5	30	4	0,050	0,100
	3	50	30	1	0,050	0,100
	4	50	30	4	0,013	0,100
	5	50	30	4	0,050	0,400
Вариант 6	1	70	30	4	0,050	0,100
	2	17,5	30	4	0,050	0,100
	3	70	30	1	0,050	0,100
	4	70	30	4	0,013	0,100
	5	70	30	4	0,050	0,400
Вариант 7	1	40	25	4	0,050	0,100
	2	10	25	4	0,050	0,100
	3	40	25	1	0,050	0,100
	4	40	25	4	0,013	0,100
	5	40	25	4	0,050	0,400
Вариант 8	1	40	15	4	0,050	0,100
	2	10	15	4	0,050	0,100
	3	40	15	1	0,050	0,100
	4	40	15	4	0,013	0,100
	5	40	15	4	0,050	0,400
Вариант 9	1	40	35	4	0,050	0,100
	2	10	35	4	0,050	0,100
	3	40	35	1	0,050	0,100
	4	40	35	4	0,013	0,100
	5	40	35	4	0,050	0,400
Вариант 10	1	40	5	4	0,050	0,100
	2	10	5	4	0,050	0,100
	3	40	5	1	0,050	0,100
	4	40	5	4	0,013	0,100
	5	40	5	4	0,050	0,400

Продолжение таблицы 1.1

№ варианта	№ зад.	a , мм	b , мм	d_i , мм	v_B , м/с	S , мм
Вариант 11	1	40	27	4	0,050	0,100
	2	10	27	4	0,050	0,100
	3	40	27	1	0,050	0,100
	4	40	27	4	0,013	0,100
	5	40	27	4	0,050	0,400
Вариант 12	1	40	11	4	0,050	0,100
	2	10	11	4	0,050	0,100
	3	40	11	1	0,050	0,100
	4	40	11	4	0,013	0,100
	5	40	11	4	0,050	0,400
Вариант 13	1	40	30	2	0,050	0,100
	2	10	30	2	0,050	0,100
	3	40	30	0,5	0,050	0,100
	4	40	30	2	0,013	0,100
	5	40	30	2	0,050	0,400
Вариант 14	1	40	30	3	0,050	0,100
	2	10	30	3	0,050	0,100
	3	40	30	0,75	0,050	0,100
	4	40	30	3	0,013	0,100
	5	40	30	3	0,050	0,400
Вариант 15	1	40	30	5	0,050	0,100
	2	10	30	5	0,050	0,100
	3	40	30	1,25	0,050	0,100
	4	40	30	5	0,013	0,100
	5	40	30	5	0,050	0,400
Вариант 16	1	40	30	3,5	0,050	0,100
	2	10	30	3,5	0,050	0,100
	3	40	30	0,875	0,050	0,100
	4	40	30	3,5	0,013	0,100
	5	40	30	3,5	0,050	0,400
Вариант 17	1	40	30	4,5	0,050	0,100
	2	10	30	4,5	0,050	0,100
	3	40	30	1,125	0,050	0,100
	4	40	30	4,5	0,013	0,100
	5	40	30	4,5	0,050	0,400
Вариант 18	1	40	30	5,5	0,050	0,100
	2	10	30	5,5	0,050	0,100
	3	40	30	1,375	0,050	0,100
	4	40	30	5,5	0,013	0,100
	5	40	30	5,5	0,050	0,400
Вариант 19	1	40	30	4	0,010	0,100
	2	10	30	4	0,010	0,100
	3	40	30	1	0,010	0,100
	4	40	30	4	0,003	0,100
	5	40	30	4	0,010	0,400

Продолжение таблицы 1.1

№ варианта	№ зад.	a , мм	b , мм	d_i , мм	v_B , м/с	S , мм
Вариант 20	1	40	30	4	0,020	0,100
	2	10	30	4	0,020	0,100
	3	40	30	1	0,020	0,100
	4	40	30	4	0,005	0,100
	5	40	30	4	0,020	0,400
Вариант 21	1	40	30	4	0,030	0,100
	2	10	30	4	0,030	0,100
	3	40	30	1	0,030	0,100
	4	40	30	4	0,008	0,100
	5	40	30	4	0,030	0,400
Вариант 22	1	40	30	4	0,060	0,100
	2	10	30	4	0,060	0,100
	3	40	30	1	0,060	0,100
	4	40	30	4	0,015	0,100
	5	40	30	4	0,060	0,400
Вариант 23	1	40	30	4	0,075	0,100
	2	10	30	4	0,075	0,100
	3	40	30	1	0,075	0,100
	4	40	30	4	0,019	0,100
	5	40	30	4	0,075	0,400
Вариант 24	1	40	30	4	0,100	0,100
	2	10	30	4	0,100	0,100
	3	40	30	1	0,100	0,100
	4	40	30	4	0,025	0,100
	5	40	30	4	0,100	0,400
Вариант 25	1	40	30	4	0,050	0,070
	2	10	30	4	0,050	0,070
	3	40	30	1	0,050	0,070
	4	40	30	4	0,013	0,070
	5	40	30	4	0,050	0,280
Вариант 26	1	40	30	4	0,050	0,080
	2	10	30	4	0,050	0,080
	3	40	30	1	0,050	0,080
	4	40	30	4	0,013	0,080
	5	40	30	4	0,050	0,320
Вариант 27	1	40	30	4	0,050	0,110
	2	10	30	4	0,050	0,110
	3	40	30	1	0,050	0,110
	4	40	30	4	0,013	0,110
	5	40	30	4	0,050	0,440
Вариант 28	1	40	30	4	0,050	0,120
	2	10	30	4	0,050	0,120
	3	40	30	1	0,050	0,120
	4	40	30	4	0,013	0,120
	5	40	30	4	0,050	0,480

Продолжение таблицы 1.1

№ варианта	№ зад.	a , мм	b , мм	d_i , мм	v_B , м/с	S , мм
Вариант 29	1	40	30	4	0,050	0,050
	2	10	30	4	0,050	0,050
	3	40	30	1	0,050	0,050
	4	40	30	4	0,013	0,050
	5	40	30	4	0,050	0,200
Вариант 30	1	40	30	4	0,050	0,200
	2	10	30	4	0,050	0,200
	3	40	30	1	0,050	0,200
	4	40	30	4	0,013	0,200
	5	40	30	4	0,050	0,800
Вариант 31	1	92	17	4	0,050	0,200
	2	23	17	4	0,050	0,200
	3	92	17	1	0,050	0,200
	4	92	17	4	0,013	0,200
	5	92	17	4	0,050	0,800
Вариант 32	1	40	30	6	0,048	0,200
	2	10	30	6	0,048	0,200
	3	40	30	1,5	0,048	0,200
	4	40	30	6	0,012	0,200
	5	40	30	6	0,048	0,800
Вариант 33	1	40	35	4	0,050	0,220
	2	10	35	4	0,050	0,220
	3	40	35	1	0,050	0,220
	4	40	35	4	0,013	0,220
	5	40	35	4	0,050	0,880
Вариант 34	1	64	22	4	0,068	0,230
	2	16	22	4	0,068	0,230
	3	64	22	1	0,068	0,230
	4	64	22	4	0,017	0,230
	5	64	22	4	0,068	0,920
Вариант 35	1	68	30	4	0,050	0,200
	2	17	30	4	0,050	0,200
	3	68	30	1	0,050	0,200
	4	68	30	4	0,013	0,200
	5	68	30	4	0,050	0,800
Вариант 36	1	72	30	4	0,060	0,190
	2	18	30	4	0,060	0,190
	3	72	30	1	0,060	0,190
	4	72	30	4	0,015	0,190
	5	72	30	4	0,060	0,760
Вариант 37	1	76	30	4	0,070	0,180
	2	19	30	4	0,070	0,180
	3	76	30	1	0,070	0,180
	4	76	30	4	0,018	0,180
	5	76	30	4	0,070	0,720

Продолжение таблицы 1.1

№ варианта	№ зад.	a , мм	b , мм	d_i , мм	v_B , м/с	S , мм
Вариант 38	1	80	30	4	0,080	0,170
	2	20	30	4	0,080	0,170
	3	80	30	1	0,080	0,170
	4	80	30	4	0,020	0,170
	5	80	30	4	0,080	0,680
Вариант 39	1	84	30	4	0,090	0,160
	2	21	30	4	0,090	0,160
	3	84	30	1	0,090	0,160
	4	84	30	4	0,023	0,160
	5	84	30	4	0,090	0,640
Вариант 40	1	88	30	4	0,100	0,150
	2	22	30	4	0,100	0,150
	3	88	30	1	0,100	0,150
	4	88	30	4	0,025	0,150
	5	88	30	4	0,100	0,600
Вариант 41	1	40	30	6	0,050	0,200
	2	10	30	6	0,050	0,200
	3	40	30	1,5	0,050	0,200
	4	40	30	6	0,013	0,200
	5	40	30	6	0,050	0,800
Вариант 42	1	48	32	6	0,050	0,200
	2	12	32	6	0,050	0,200
	3	48	32	1,5	0,050	0,200
	4	48	32	6	0,013	0,200
	5	48	32	6	0,050	0,800
Вариант 43	1	56	34	6	0,050	0,200
	2	14	34	6	0,050	0,200
	3	56	34	1,5	0,050	0,200
	4	56	34	6	0,013	0,200
	5	56	34	6	0,050	0,800
Вариант 44	1	64	36	6	0,050	0,200
	2	16	36	6	0,050	0,200
	3	64	36	1,5	0,050	0,200
	4	64	36	6	0,013	0,200
	5	64	36	6	0,050	0,800
Вариант 45	1	72	38	6	0,050	0,200
	2	18	38	6	0,050	0,200
	3	72	38	1,5	0,050	0,200
	4	72	38	6	0,013	0,200
	5	72	38	6	0,050	0,800
Вариант 46	1	80	40	6	0,050	0,200
	2	20	40	6	0,050	0,200
	3	80	40	1,5	0,050	0,200
	4	80	40	6	0,013	0,200
	5	80	40	6	0,050	0,800

Продолжение таблицы 1.1

№ варианта	№ зад.	a , мм	b , мм	di , мм	v_B , м/с	S , мм
Вариант 47	1	88	42	6	0,050	0,200
	2	22	42	6	0,050	0,200
	3	88	42	1,5	0,050	0,200
	4	88	42	6	0,013	0,200
	5	88	42	6	0,050	0,800
Вариант 48	1	40	30	4	0,030	0,150
	2	10	30	4	0,030	0,150
	3	40	30	1	0,030	0,150
	4	40	30	4	0,008	0,150
	5	40	30	4	0,030	0,600
Вариант 49	1	40	17	2	0,050	0,200
	2	10	17	2	0,050	0,200
	3	40	17	0,5	0,050	0,200
	4	40	17	2	0,013	0,200
	5	40	17	2	0,050	0,800
Вариант 50	1	40	28	4	0,050	0,300
	2	10	28	4	0,050	0,300
	3	40	28	1	0,050	0,300
	4	40	28	4	0,013	0,300
	5	40	28	4	0,050	1,200

Примечание: a – длина электрода, мм;

b – ширина электрода, мм;

di – диаметр отверстия для прокачки жидкости, мм;

v_B – скорость потока на выходе из бокового зазора в точке В, м/с;

S – ориентировочная величина бокового зазора для используемого режима, взятая из руководства по станку, мм.

Краткие теоретические сведения

Все физические процессы, сопутствующие электроэрозионной обработке (ЭЭО), протекают в межэлектродном пространстве, заполненном рабочей средой. Последняя, находясь в рабочей зоне, оказывает на электроэрозионный процесс, электроды и продукты эрозии физическое, химическое, моющее и механическое воздействие. Это влияние оказывается на всех стадиях электроэрозионного процесса.

Чтобы поддержать работоспособность рабочей среды более длительное время и обеспечить стабильность технологических параметров ЭЭО без частой замены рабочей среды, используют различные средства очистки её в процессе работы. Для предварительной очистки рабочей среды применяются фильтрогрязеёмники, установленные на станке и выполненные в виде матов из различных пористых материалов (стекловаты, поролон и т. д.), а также применяются отстойники, в которых тяжёлые и крупные частицы выпадают в осадок на дно бака. Могут использоваться для предварительной очистки магнитные фильтры, сепараторы, центрифуги и другие устройства.

Методика расчёта

1. Проверка положения отверстия для прокачки жидкости в зависимости от формы и размеров электрода с учётом l_{max} и l_{min} – максимальной и минимальной длин трассы эвакуации продуктов электроэрозии.

Максимальный торцовый пробег жидкости

$$l_{max} = \frac{\sqrt{a^2 + b^2} - d_i}{2}, \quad (1.1)$$

где a – длина электрода-инструмента, мм;

b – ширина электрода-инструмента, мм;

d_i – диаметр отверстия для прокачки жидкости, мм.

Минимальный торцовый пробег жидкости

$$l_{min} = \frac{b - d_i}{2}. \quad (1.2)$$

2. С увеличением длины пробега жидкости в межэлектродном промежутке (МЭП) увеличивается количество частиц. При определённом уровне концентрации частиц появляется нестабильность процесса. Согласно экспериментальным данным, стабильность может быть достигнута тогда, когда отношение длины пробега жидкости в МЭП к средней величине МЭЗ по всей длине не превышает 500

$$\frac{l_{max}}{S} \leq 500, \quad (1.3)$$

где S – ориентировочная величина бокового зазора, указанная в руководстве по эксплуатации электроэрозионного станка, мм.

3. При обработке относительно небольших поверхностей следует выдерживать определённое соотношение максимальной и минимальной длин трассы эвакуации диэлектрической жидкости. Если соотношение длин слишком велико, жидкость будет протекать в основном по одному направлению, где трасса эвакуации наикратчайшая. Это приводит к неравномерности МЭЗ на входе в прошиваемую полость и к нарушению стабильности процесса. Экспериментально установлено, что если соотношение меньше 2, то распределение потока по поверхности электродов практически равномерно

$$\frac{l_{max}}{l_{min}} \leq 2. \quad (1.4)$$

4. На основании экспериментальных данных для диапазона получистовых и чистовых режимов предельные величины скоростей потока v_{min} и v_{max} , между

которыми обработка практически оптимальная, для графитовых электродов имеют значения: $v_{min} = 0,03$ м/с и $v_{max} = 0,8$ м/с.

Сечение потока на выходе g_B вычисляется по формуле

$$g_B = [(a + 2S)(b + 2S)] - ab. \quad (1.5)$$

Расход жидкости Q вычисляется по формуле

$$Q = v_B g_B. \quad (1.6)$$

5. Сечение потока на входе в МЭП g_A вычисляется по формуле

$$g_A = \pi d_i S. \quad (1.7)$$

Скорость потока на входе

$$v_A = \frac{Q}{g_A}. \quad (1.8)$$

Вычисленная скорость v_A должна удовлетворять условию $v_A \leq v_{max}$. При $v_A > v_{max}$ обработка будет нестабильной. В этом случае уменьшают первоначально выбранную величину v_B или увеличивают входной периметр, повышая диаметр и число входных отверстий для циркуляции.

Каждый вариант содержит 5 предлагаемых к решению наборов исходных данных. Результаты расчёта необходимо представить согласно примеру в виде таблицы 1.2. Результаты вычислений необходимо проверить на оптимальность выбранного режима обработки – скорость потока на входе v_A должна находиться в пределах $0,03 < v_A < 0,8$ м/с.

Таблица 1.2 – Пример оформления результатов расчёта

№ варианта	51				
	1	2	3	4	5
№ задания					
Расход жидкости Q , $1 \cdot 10^{-8}$, м ³ /с	0,602	0,202	0,762	0,176	2,232
Скорость потока на входе v_A , м/с	0,549	0,325	3,235	0,143	0,263
Проверка $0,03 < v_A < 0,8$ м/с	+	+	-	+	+

2 Практическая задача № 2. Электроэрозионная обработка полости литейной матрицы

Цели:

1) определить минимальное количество отверстий для прокачки жидкости в электроде-инструменте;

2) определить расход жидкости через контуры электрода, как показано на рисунке 2.1;

3) выявить зависимость количества отверстий для прокачки и шероховатости получаемой поверхности от режимов электроэрозионной обработки.

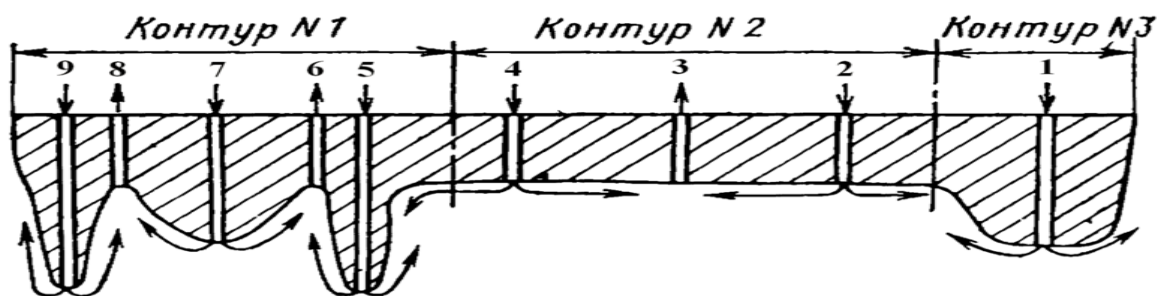


Рисунок 2.1 – Пример контура электрода со схемой циркуляции жидкости

Задание: рассчитать количество отверстий для прокачки жидкости и расход жидкости через каждый из контуров электрода; рассчитать шероховатость получаемой поверхности; сделать вывод о зависимости количества отверстий для прокачки жидкости от режимов обработки.

Краткие теоретические сведения

Для получения размерной обработки энергия в зону обработки вводится отдельными порциями в виде электрических импульсов достаточно малой длительности. В паузах между импульсами рабочая жидкость восстанавливает свои диэлектрические свойства (деионизируется). Если осуществлять непрерывный подвод энергии, то будут разогреваться и плавиться большие объемы материала, и размерная обработка становится невозможной.

В результате воздействия единичного импульсного разряда на поверхности металла образуется единичная лунка, радиус и глубина которой определяются эрозионной стойкостью материала и энергией импульса. При стабильном протекании процесса лунки имеют примерно одинаковые размеры по диаметру и глубине.

По технологическому назначению станки для электроэрозионной (ЭЭ) обработки делятся на два основных типа:

- копировально-прошивные;
- проволочно-вырезные.

Копировально-прошивные станки позволяют обрабатывать фасонные отверстия и полости, внутренние и наружные поверхности тел вращения, производить шлифование, разрезание. Возможно получение винтовых и эвольвентных поверхностей, а также различных внутренних фасонных отверстий и полостей с прямым, обратным и переменным конусом. В копировально-прошивных станках электрод-инструмент фасонный, его форма является обратной копией той полости, которую предстоит обрабатывать.

Благодаря увеличению скорости обработки, размеров и сложности форм обрабатываемых деталей, повышению достигаемой точности, упрощению

работы на станках, возможности работы без участия оператора, обучению пользователей, поддержке потребителей и доступности, электроэрозионная обработка упрочила своё положение в инструментальном производстве и всё больше используется в основном производстве.

Сегодня ни одно предприятие не может не учитывать возможности электроэрозии, которые позволяют решить многие проблемы производства.

Методика расчёта

Минимальное количество отверстий для прокачки вычисляется по формуле

$$n = \frac{P_B v_{min}}{\pi d_i v_{max}}, \quad (2.1)$$

где P_B – периметр обрабатываемой полости, м;

d_i – диаметр отверстия для прокачки жидкости, м;

v_{min} – минимальная скорость потока жидкости, м/с;

v_{max} – максимальная скорость потока жидкости, м/с.

Отверстия для прокачки располагают в выступах электрода, отверстия для дегазации – во впадинах. Всего необходимо сделать N отверстий, из которых n для прокачки, а остальные – для дегазации.

При проектировании электрода необходимо учесть то, что длина трассы эвакуации продуктов электроэрозии не должна превышать $500 \cdot S$. То есть необходимо проверить условие $l < 500 \cdot S$ на черновом и чистовом режимах. Это условие позволяет проверить расположение отверстий относительно края полости и относительно друг друга.

Для расчёта расхода жидкости на черновом режиме принимаем скорость потока на входе в МЭП v_A , тогда расход жидкости

$$Q = v_A \cdot \pi \cdot d_i \cdot N \cdot S \cdot 10^{-6}. \quad (2.2)$$

Определяется скорость v_B потока на выходе МЭП

$$v_B = \frac{Q}{g_B} = \frac{Q}{P_B S}, \quad (2.3)$$

где g_B – сечение потока диэлектрической жидкости на выходе, мм^2 .

Чистовой режим рассчитывается аналогично.

Организация циркуляции жидкости. При подаче жидкости следует учесть, что электроды имеют различную высоту. По заданию, электрод разделяется на три контура в зависимости от момента их вступления в работу: m_1 , m_2 , и m_3 с соответствующим заданию числу отверстий.

Чтобы избежать преимущественного протекания жидкости в контурах, где обработка ещё не началась, следует подавать жидкость в каждый контур отдельно по мере углубления электрода. Расход жидкости измеряется в каждом контуре. Контур снабжается жидкостью в соответствии с количеством отверстий.

Расход жидкости на каждый контур

$$Q_n = \frac{Q m_k}{N}, \quad (2.4)$$

где k – номер контура.

Для нахождения высоты микронеровностей поверхности детали после электроэрозионной обработки, сначала необходимо найти энергию импульса

$$W = I_{cp} U t_i, \quad (2.5)$$

где I – сила тока, А;

U – напряжение, В;

t – длительность импульса, с.

Связь между высотой микронеровностей Rz и энергией импульсов W имеет вид

$$Rz \approx C_R W^m, \quad (2.6)$$

где C_R и m – безразмерные коэффициенты, значения которых приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения коэффициентов C_R и m

Обрабатываемый материал	C_R , мкм/Дж	m
Углеродистые стали	95	0,35
Жаропрочные сплавы на никелевой основе	100	0,39
Твёрдые сплавы	32	0,38

Ответ на задание необходимо представить в виде таблицы 2.2.

Таблица 2.2 – Пример ответа

№ варианта			Ответы на вариант 1					
№ задания			1	2	3	4	5	
n	Минимальное количество отверстий для проочки	шт.	4	6	4	4	4	
Черновая	Q_1	Расход жидкости в контуре 1	$\cdot 10^{-6}$ м ³ /с	1,78	1,42	1,28	1,28	0,18
	Q_2	Расход жидкости в контуре 2	$\cdot 10^{-6}$ м ³ /с	0,85	0,97	0,85	0,85	0,12
	Q_3	Расход жидкости в контуре 3	$\cdot 10^{-6}$ м ³ /с	0,43	0,57	0,93	0,43	0,06

Продолжение таблицы 2.2

№ варианта				Ответы на вариант 1					
№ задания				1	2	3	4	5	
Чистовая	Q_1	Расход жидкости в контуре 1		$\cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$	0,25	0,49	0,45	0,25	0,06
	Q_2	Расход жидкости в контуре 2		$\cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$	0,30	0,40	0,30	0,30	0,54
	Q_3	Расход жидкости в контуре 3		$\cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$	0,15	0,20	0,75	0,15	0,02
Rz	Шероховатость после черновой обработки		мкм	76	76	76	4	76	
Rz	Шероховатость после чистовой обработки		мкм	25	25	22	8	5	

В общей таблице задания приведены значения, общие для всех вариантов и номеров заданий (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Общая таблица задания

Параметр	Значение
Длительность импульса при черновой обработке $t_{и}$, мкс	150
Величина бокового зазора при черновой обработке S , мм	0,129
Длительность импульса при чистовой обработке $t_{и}$, мкс	20
Величина бокового зазора при чистовой обработке S , мм	0,045
Напряжение U , В	50
Периметр обрабатываемой полости P_B , мм	500
Минимальная скорость потока жидкости v_{min} , м/с	0,03
Максимальная скорость потока жидкости v_{max} , м/с	0,8

В таблице 2.4 приняты следующие условные сокращения:
 УС – углеродистые стали; ЖС – жаропрочные сплавы на никелевой основе;
 ТС – твёрдые сплавы.

Таблица 2.4 – Таблица задания

№ варианта	№ задания	Среднее значение тока при черновой обработке $I_{ср}$, А	Среднее значение тока при чистовой обработке $I_{ср}$, А	Длительность импульса $t_{и}$, мкс	Величина бокового зазора S , мм	Диаметр отверстия для прокачки жидкости d_i , мм	Скорость потока на входе в МЭП v_A , м/с	Число отверстий в 1 контуре m_1 , шт.	Число отверстий в 2 контуре m_2 , шт.	Число отверстий в 3 контуре m_3 , шт.	Принятое число отверстий для прокачки и дегазации N , шт.	Материал
Вариант 1	1	70	20	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	2	70	20	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	УС
	3	70	15	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	4	70	20	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	5	70	20	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	УС

Продолжение таблицы 2.4

№ варианта	№ задания	Среднее значение тока при черновой обработке I_{cp} , А	Среднее значение тока при чистовой обработке I_{cp} , А	Длительность импульса $t_{и}$, мкс	Величина бокового зазора S , мм	Диаметр отверстия для прокачки жидкости d_i , мм	Скорость потока на входе в МЭП v_A , м/с	Число отверстий в 1 контуре m_1 , шт.	Число отверстий в 2 контуре m_2 , шт.	Число отверстий в 3 контуре m_3 , шт.	Принятое число отверстий для прокачки и дегазации N , шт.	Материал
Вариант 2	1	45	15	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	2	45	15	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	УС
	3	45	10	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	4	45	15	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	5	45	15	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	УС
Вариант 3	1	40	10	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	2	40	10	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	УС
	3	40	6	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	4	40	10	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	5	40	10	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	УС
Вариант 4	1	35	6	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	2	35	6	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	УС
	3	35	3	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	4	35	6	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	5	35	6	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	УС
Вариант 5	1	30	3	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	2	30	3	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	УС
	3	30	6	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	4	30	3	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	5	30	3	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	УС
Вариант 6	1	70	20	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	2	70	20	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	УС
	3	70	15	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	4	70	20	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	5	70	20	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	УС
Вариант 7	1	45	15	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	2	45	15	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	УС
	3	45	10	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	4	45	15	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	5	45	15	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	УС
Вариант 8	1	40	10	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	2	40	10	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	УС
	3	40	6	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	4	40	10	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	5	40	10	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	УС

Продолжение таблицы 2.4

№ варианта	№ задания	Среднее значение тока при черновой обработке I_{cp} , А	Среднее значение тока при чистовой обработке I_{cp} , А	Длительность импульса $t_{им}$, мкс	Величина бокового зазора S , мм	Диаметр отверстия для прокатки жидкости d_i , мм	Скорость потока на входе в МЭП v_A , м/с	Число отверстий в 1 контуре m_1 , шт.	Число отверстий в 2 контуре m_2 , шт.	Число отверстий в 3 контуре m_3 , шт.	Принятое число отверстий для прокатки и дегазации N , шт.	Материал
Вариант 9	1	35	6	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	2	35	6	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	УС
	3	35	3	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	4	35	6	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	5	35	6	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	УС
Вариант 10	1	30	3	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	2	30	3	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	УС
	3	30	6	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	4	30	3	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	5	30	3	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	УС
Вариант 11	1	70	20	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	2	70	20	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ЖС
	3	70	15	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	4	70	20	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	5	70	20	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ЖС
Вариант 12	1	45	15	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	2	45	15	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ЖС
	3	45	10	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	4	45	15	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	5	45	15	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ЖС
Вариант 13	1	40	10	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	2	40	10	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ЖС
	3	40	6	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	4	40	10	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	5	40	10	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ЖС
Вариант 14	1	35	6	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	2	35	6	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ЖС
	3	35	3	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	4	35	6	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	5	35	6	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ЖС

Продолжение таблицы 2.4

№ варианта	№ задания	Среднее значение тока при черновой обработке $I_{ср}$, А	Среднее значение тока при чистовой обработке $I_{ср}$, А	Длительность импульса $t_{и}$, мкс	Величина бокового зазора S , мм	Диаметр отверстия для прокатки жидкости d_i , мм	Скорость потока на входе в МЭП v_A , м/с	Число отверстий в 1 контуре m_1 , шт.	Число отверстий в 2 контуре m_2 , шт.	Число отверстий в 3 контуре m_3 , шт.	Принятое число отверстий для прокатки и дегазации N , шт.	Материал
Вариант 15	1	30	3	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	2	30	3	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ЖС
	3	30	6	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	4	30	3	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	5	30	3	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ЖС
Вариант 16	1	70	20	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	2	70	20	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ЖС
	3	70	15	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	4	70	20	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	5	70	20	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ЖС
Вариант 17	1	45	15	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	2	45	15	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ЖС
	3	45	10	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	4	45	15	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	5	45	15	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ЖС
Вариант 18	1	40	10	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	2	40	10	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ЖС
	3	40	6	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	4	40	10	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	5	40	10	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ЖС
Вариант 19	1	35	6	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	2	35	6	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ЖС
	3	35	3	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	4	35	6	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	5	35	6	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ЖС
Вариант 20	1	30	3	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	2	30	3	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ЖС
	3	30	6	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	4	30	3	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	5	30	3	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ЖС

Продолжение таблицы 2.4

№ варианта	№ задания	Среднее значение тока при черновой обработке $I_{ср}, A$	Среднее значение тока при чистовой обработке $I_{ср}, A$	Длительность импульса $t_{и}, мкс$	Величина бокового зазора $S, мм$	Диаметр отверстия для прокатки жидкости $d_i, мм$	Скорость потока на входе в МЭП $v_A, м/с$	Число отверстий в 1 контуре $m_1, шт.$	Число отверстий в 2 контуре $m_2, шт.$	Число отверстий в 3 контуре $m_3, шт.$	Принятое число отверстий для прокатки и дегазации $N, шт.$	Материал	Принятое число отверстий для прокатки и дегазации $N, шт.$	Материал
Вариант 21	1	70	20	20	0,045	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	2	70	20	20	0,045	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ТС
	3	70	15	20	0,045	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	4	70	20	20	0,045	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	5	70	20	20	0,045	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ТС
Вариант 22	1	45	15	20	0,045	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	2	45	15	20	0,045	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ТС
	3	45	10	20	0,045	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	4	45	15	20	0,045	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	5	45	15	20	0,045	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ТС
Вариант 23	1	40	10	20	0,045	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	2	40	10	20	0,045	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ТС
	3	40	6	20	0,045	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	4	40	10	20	0,045	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	5	40	10	20	0,045	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ТС
Вариант 24	1	35	6	20	0,045	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	2	35	6	20	0,045	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ТС
	3	35	3	20	0,045	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	4	35	6	20	0,045	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	5	35	6	20	0,045	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ТС
Вариант 25	1	30	3	20	0,045	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	2	30	3	20	0,045	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ТС
	3	30	6	20	0,045	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	4	30	3	20	0,045	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	5	30	3	20	0,045	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ТС
Вариант 26	1	70	20	20	0,045	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	2	70	20	20	0,045	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ТС
	3	70	15	20	0,045	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	4	70	20	20	0,045	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	5	70	20	20	0,045	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ТС

Продолжение таблицы 2.4

№ варианта	№ задания	Среднее значение тока при черновой обработке $I_{ср}, А$	Среднее значение тока при чистовой обработке $I_{ср}, А$	Длительность импульса $t_{и}, мкс$	Величина бокового зазора $S, мм$	Диаметр отверстия для прокачки жидкости $d_i, мм$	Скорость потока на входе в МЭП $v_A, м/с$	Число отверстий в 1 контуре $m_1, шт.$	Число отверстий в 2 контуре $m_2, шт.$	Число отверстий в 3 контуре $m_3, шт.$	Принятое число отверстий для прокачки и дегазации $N, шт.$	Материал
Вариант 27	1	45	15	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	2	45	15	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ТС
	3	45	10	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	4	45	15	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	5	45	15	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ТС
Вариант 28	1	40	10	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	2	40	10	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ТС
	3	40	6	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	4	40	10	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	5	40	10	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ТС
Вариант 29	1	35	6	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	2	35	6	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ТС
	3	35	3	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	4	35	6	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	5	35	6	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ТС
Вариант 30	1	30	3	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	2	30	3	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ТС
	3	30	6	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	4	30	3	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	5	30	3	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ТС
Вариант 31	1	70	25	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	2	70	25	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	УС
	3	70	15	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	4	70	25	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	5	70	25	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	УС
Вариант 32	1	70	25	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	2	70	25	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ТС
	3	70	15	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	4	70	25	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	5	70	25	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ТС
Вариант 33	1	70	25	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	2	70	25	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ЖС
	3	70	15	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	4	70	25	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	5	70	25	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ЖС

Продолжение таблицы 2.4

№ варианта	№ задания	Среднее значение тока при черновой обработке I_{cp}, A	Среднее значение тока при чистовой обработке I_{cp}, A	Длительность импульса $t_{п}, мкс$	Величина бокового зазора $S, мм$	Диаметр отверстия для прокатки жидкости $d_i, мм$	Скорость потока на входе в МЭП $v_A, м/с$	Число отверстий в 1 контуре $m_1, шт.$	Число отверстий в 2 контуре $m_2, шт.$	Число отверстий в 3 контуре $m_3, шт.$	Принятое число отверстий для прокатки и дегазации $N, шт.$	Материал
Вариант 34	1	70	25	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	2	70	25	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ТС
	3	70	15	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	4	70	25	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	5	70	25	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ТС
Вариант 35	1	70	25	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	2	70	25	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	УС
	3	70	15	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	УС
	4	70	25	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	5	70	25	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	УС
Вариант 36	1	70	25	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	2	70	25	20	0,045	1	0,7	5	2	2	9	ЖС
	3	70	15	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ЖС
	4	70	25	20	0,045	1,5	0,7	3	2	1	6	ТС
	5	70	25	20	0,045	1,5	0,1	3	2	1	6	ЖС
Вариант 37	1	40	10	20	0,045	1,5	0,6	3	2	1	6	УС
	2	40	10	20	0,045	1	0,6	5	2	2	9	УС
	3	40	6	20	0,045	1,5	0,6	3	2	1	6	УС
	4	40	10	20	0,045	1,5	0,6	3	2	1	6	ТС
	5	40	10	20	0,045	1,5	0,2	3	2	1	6	УС
Вариант 38	1	40	10	20	0,045	1,5	0,6	3	2	1	6	ТС
	2	40	10	20	0,045	1	0,6	5	2	2	9	ТС
	3	40	6	20	0,045	1,5	0,6	3	2	1	6	ТС
	4	40	10	20	0,045	1,5	0,6	3	2	1	6	УС
	5	40	10	20	0,045	1,5	0,2	3	2	1	6	ТС
Вариант 39	1	40	10	20	0,045	1,5	0,6	3	2	1	6	ЖС
	2	40	10	20	0,045	1	0,6	5	2	2	9	ЖС
	3	40	6	20	0,045	1,5	0,6	3	2	1	6	ЖС
	4	40	10	20	0,045	1,5	0,6	3	2	1	6	УС
	5	40	10	20	0,045	1,5	0,2	3	2	1	6	ЖС
Вариант 40	1	40	10	20	0,045	1,5	0,6	3	2	1	6	ТС
	2	40	10	20	0,045	1	0,6	5	2	2	9	ТС
	3	40	6	20	0,045	1,5	0,6	3	2	1	6	ТС
	4	40	10	20	0,045	1,5	0,6	3	2	1	6	ЖС
	5	40	10	20	0,045	1,5	0,2	3	2	1	6	ТС

Продолжение таблицы 2.4

№ варианта	№ задания	Среднее значение тока при черновой обработке I_{cp} , А	Среднее значение тока при чистовой обработке I_{cp} , А	Длительность импульса $t_{им}$, мкс	Величина бокового зазора S , мм	Диаметр отверстия для проочки жидкости d_i , мм	Скорость потока на входе в МЭП v_A , м/с	Число отверстий в 1 контуре m_1 , шт.	Число отверстий в 2 контуре m_2 , шт.	Число отверстий в 3 контуре m_3 , шт.	Принятое число отверстий для проочки и дегазации N , шт.	Материал
Вариант 41	1	40	10	20	0,045	1,5	0,6	3	2	1	6	УС
	2	40	10	20	0,045	1	0,6	5	2	2	9	УС
	3	40	6	20	0,045	1,5	0,6	3	2	1	6	УС
	4	40	10	20	0,045	1,5	0,6	3	2	1	6	ЖС
	5	40	10	20	0,045	1,5	0,2	3	2	1	6	УС
Вариант 42	1	40	10	20	0,045	1,5	0,6	3	2	1	6	ЖС
	2	40	10	20	0,045	1	0,6	5	2	2	9	ЖС
	3	40	6	20	0,045	1,5	0,6	3	2	1	6	ЖС
	4	40	10	20	0,045	1,5	0,6	3	2	1	6	ТС
	5	40	10	20	0,045	1,5	0,2	3	2	1	6	ЖС
Вариант 43	1	40	10	20	0,04	1,5	0,8	3	2	1	6	УС
	2	40	10	20	0,04	1	0,8	5	2	2	9	УС
	3	40	6	20	0,04	1,5	0,8	3	2	1	6	УС
	4	40	10	20	0,04	1,5	0,8	3	2	1	6	ТС
	5	40	10	20	0,04	1,5	0,2	3	2	1	6	УС
Вариант 44	1	40	10	20	0,04	1,5	0,8	3	2	1	6	ТС
	2	40	10	20	0,04	1	0,8	5	2	2	9	ТС
	3	40	6	20	0,04	1,5	0,8	3	2	1	6	ТС
	4	40	10	20	0,04	1,5	0,8	3	2	1	6	УС
	5	40	10	20	0,04	1,5	0,2	3	2	1	6	ТС
Вариант 45	1	40	10	20	0,04	1,5	0,8	3	2	1	6	ЖС
	2	40	10	20	0,04	1	0,8	5	2	2	9	ЖС
	3	40	6	20	0,04	1,5	0,8	3	2	1	6	ЖС
	4	40	10	20	0,04	1,5	0,8	3	2	1	6	УС
	5	40	10	20	0,04	1,5	0,2	3	2	1	6	ЖС
Вариант 46	1	40	10	20	0,04	1,5	0,8	3	2	1	6	ТС
	2	40	10	20	0,04	1	0,8	5	2	2	9	ТС
	3	40	6	20	0,04	1,5	0,8	3	2	1	6	ТС
	4	40	10	20	0,04	1,5	0,8	3	2	1	6	ЖС
	5	40	10	20	0,04	1,5	0,2	3	2	1	6	ТС
Вариант 47	1	40	10	20	0,04	1,5	0,8	3	2	1	6	УС
	2	40	10	20	0,04	1	0,8	5	2	2	9	УС
	3	40	6	20	0,04	1,5	0,8	3	2	1	6	УС
	4	40	10	20	0,04	1,5	0,8	3	2	1	6	ЖС
	5	40	10	20	0,04	1,5	0,2	3	2	1	6	УС

Продолжение таблицы 2.4

№ варианта	№ задания	Среднее значение тока при черновой обработке $I_{ср}$, А	Среднее значение тока при чистовой обработке $I_{ср}$, А	Длительность импульса $t_{и}$, мкс	Величина бокового зазора S , мм	Диаметр отверстия для прокатки жидкости d_i , мм	Скорость потока на входе в МЭП v_A , м/с	Число отверстий в 1 контуре m_1 , шт.	Число отверстий в 2 контуре m_2 , шт.	Число отверстий в 3 контуре m_3 , шт.	Принятое число отверстий для прокатки и дегазации N , шт.	Материал
Вариант 48	1	40	10	20	0,04	1,5	0,8	3	2	1	6	ЖС
	2	40	10	20	0,04	1	0,8	5	2	2	9	ЖС
	3	40	6	20	0,04	1,5	0,8	3	2	1	6	ЖС
	4	40	10	20	0,04	1,5	0,8	3	2	1	6	ТС
	5	40	10	20	0,04	1,5	0,2	3	2	1	6	ЖС
Вариант 49	1	35	6	20	0,045	1,5	0,75	3	2	1	6	УС
	2	35	6	20	0,045	1	0,75	5	2	2	9	УС
	3	35	15	20	0,045	1,5	0,75	3	2	1	6	УС
	4	35	6	20	0,045	1,5	0,75	3	2	1	6	ЖС
	5	35	6	20	0,045	1,5	0,75	3	2	1	6	УС
Вариант 50	1	35	6	20	0,045	1,5	0,75	3	2	1	6	ЖС
	2	35	6	20	0,045	1	0,75	5	2	2	9	ЖС
	3	35	15	20	0,045	1,5	0,75	3	2	1	6	ЖС
	4	35	6	20	0,045	1,5	0,75	3	2	1	6	ТС
	5	35	6	20	0,045	1,5	0,75	3	2	1	6	ЖС

3 Практическая задача № 3. Расчет размеров электрода-инструмента и качества обработанной поверхности для пары электродов «Медь-Сталь45»

Цели:

- 1) рассчитать размеры электрода-инструмента при объёмном копировании;
- 2) рассчитать полученную в ходе обработки шероховатость и толщину измененного слоя.

Для расчёта размеров электрода-инструмента при объёмном копировании необходимо определить значения бокового $S_б$ и торцевого $S_т$ межэлектродных зазоров (рисунок 3.1).

Электроды:

- инструмент – медь;
- деталь – сталь 45.

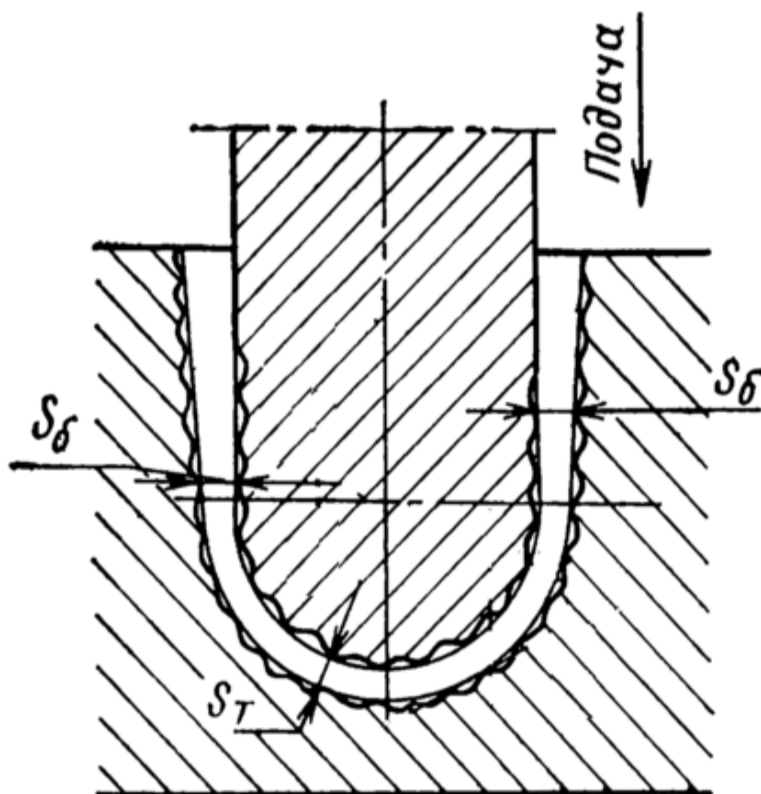


Рисунок 3.1 – Виды межэлектродного зазора при прошивании отверстий

Задание: рассчитать боковой и торцевой межэлектродные зазоры согласно заданию, выбираемому по таблице 3.1; рассчитать размер электрода-инструмента с точностью до 1 мкм; рассчитать полученную в ходе обработки шероховатость и толщину измененного слоя.

Таблица 3.1 – Исходные данные

Вариант	Длина отверстия а, мм	Ширина отверстия b, мм	Припуск под обработку z, мм	Частота f, Гц	Средний ток I _{ср} , А	Скважность q	Напряжение холостого хода U ₀ , В	Длина вертикальной трассы удаления продуктов эрозии h, мм	Минимальный допуск на поперечные размеры отверстия δ, мм	расход диэлектрической жидкости Q, 1·10 ⁻⁶ м ³ /с	Производительность обработки Q/R, см ² /с	Коэффициент для пары электродов «медь-сталь 45»
1	21	21	0,3	66000	3	3	200	10	0,033	2	4	1
2	22	22	0,2	40000	3	3	150	10	0,033	2	4	1
3	23	23	0,6	80000	5	3	220	10	0,033	2	4	1
4	24	24	0,1	33000	3	3	380	10	0,033	2	4	1
5	25	25	0,4	75000	6	3	110	10	0,033	2	4	1
6	26	26	0,3	62100	5,8	4	200	10	0,033	2	4	1

Продолжение таблицы 3.1

Вариант	Длина отверстия а, мм	Ширина отверстия b, мм	Припуск под обработку z, мм	Частота f, Гц	Средний ток Iср, А	Скважность q	Напряжение холостого хода U0, В	Длина вертикальной трассы удаления продуктов эрозии h, мм	Минимальный допуск на поперечные размеры отверстия δ, мм	расход диэлектрической жидкости Q, 1·10 ⁻⁶ м ³ /с	Производительность обработки Q/R, см ² /с	Коэффициент для пары электродов «медь-сталь 45»
7	27	27	0,2	63200	6,4	4	150	10	0,033	2	4	1
8	28	28	0,6	64300	7	4	220	10	0,033	2	4	1
9	29	29	0,1	65400	7,6	4	380	10	0,033	2	4	1
10	30	30	0,4	66500	8,2	4	110	10	0,033	2	4	1
11	31	31	0,3	67600	8,8	4	220	10	0,033	2	4	1
12	32	32	0,2	68700	9,4	5	380	10	0,033	2	4	1
13	33	33	0,6	69800	10	5	110	10	0,033	2	4	1
14	34	34	0,1	70900	10,6	5	380	10	0,033	2	4	1
15	35	35	0,4	72000	11,2	5	110	10	0,033	2	4	1
16	36	36	0,3	73100	11,8	5	200	10	0,033	2	4	1
17	37	37	0,2	74200	12,4	2	150	10	0,033	2	4	1
18	38	38	0,6	75300	13	2	150	10	0,033	2	4	1
19	39	39	0,2	76400	13,6	2	220	10	0,033	2	4	1
20	40	40	0,4	77500	14,2	2	380	10	0,033	2	4	1
21	21	31	0,3	67600	3	3	220	10	0,033	2	4	1
22	22	32	0,2	68700	3	3	380	10	0,033	2	4	1
23	23	33	0,6	69800	5	3	110	10	0,033	2	4	1
24	24	34	0,1	70900	3	3	380	10	0,033	2	4	1
25	25	35	0,4	72000	6	3	110	10	0,033	2	4	1
26	26	36	0,3	73100	5,8	4	200	10	0,033	2	4	1
27	27	37	0,2	74200	6,4	4	150	10	0,033	2	4	1
28	28	38	0,6	75300	7	4	150	10	0,033	2	4	1
29	29	39	0,1	76400	7,6	4	220	10	0,033	2	4	1
30	30	40	0,4	77500	8,2	4	380	10	0,033	2	4	1
31	31	21	0,3	66000	3	5	110	10	0,033	2	4	1
32	32	22	0,2	40000	3	5	200	10	0,033	2	4	1
33	33	23	0,6	80000	5	2	150	10	0,033	2	4	1
34	34	24	0,1	33000	3	2	150	10	0,033	2	4	1
35	35	25	0,4	75000	6	2	220	10	0,033	2	4	1
36	36	26	0,3	62100	5,8	2	380	10	0,033	2	4	1
37	37	27	0,2	63200	6,4	3	220	10	0,033	2	4	1
38	38	28	0,6	64300	7	3	380	10	0,033	2	4	1
39	39	29	0,2	65400	7,6	3	110	10	0,033	2	4	1
40	40	30	0,2	66500	8,2	3	380	10	0,033	2	4	1
41	21	21	0,3	33000	3	3	200	10	0,033	2	4	1
42	22	22	0,2	75000	3	3	150	10	0,033	2	4	1

Продолжение таблицы 3.1

Вариант	Длина отверстия а, мм	Ширина отверстия б, мм	Припуск под обработку z, мм	Частота f, Гц	Средний ток I _{ср} , А	Скважность q	Напряжение холостого хода U ₀ , В	Длина вертикальной трассы удаления продуктов эрозии h, мм	Минимальный допуск на поперечные размеры отверстия δ, мм	расход диэлектрической жидкости Q, 1·10 ⁻⁶ м ³ /с	Производительность обработки Q/R, см ² /с	Коэффициент для пары электродов «медь-сталь 45»
43	23	23	0,6	62100	5	3	220	10	0,033	2	4	1
44	24	24	0,1	63200	3	3	380	10	0,033	2	4	1
45	25	25	0,4	64300	6	3	110	10	0,033	2	4	1
46	26	26	0,3	65400	5,8	4	200	10	0,033	2	4	1
47	27	27	0,2	66500	6,4	4	150	10	0,033	2	4	1
48	28	28	0,6	67600	7	4	220	10	0,033	2	4	1
49	29	29	0,1	68700	7,6	4	380	10	0,033	2	4	1
50	30	30	0,4	69800	8,2	4	110	10	0,033	2	4	1

Методика расчёта

Площадь обрабатываемой поверхности S рассчитывается как

$$S = ab - (a - z)^2, \quad (3.1)$$

где a – длина отверстия, мм;

b – ширина отверстия, мм;

z – припуск на электроэрозионную обработку, мм.

Для расчёта зазора необходимо знать технологическую плотность тока

$$j = I_{\text{ср}} / S, \quad (3.2)$$

где I_{ср} – средний ток, А.

S – площадь обрабатываемой поверхности, см².

Расчёт бокового зазора на чистовых режимах (здесь все величины необходимо подставлять в формулу в том виде, как они были даны и рассчитаны, без преобразования размерностей) проводится по формуле

$$S_6 = k(2,12 + 4,12I_{\text{ср}} - 0,0001f + 3,29q + 0,195U_0 + 0,39j + 0,785h - 0,065jI_{\text{ср}} - 0,02hI_{\text{ср}} - 0,008U_0I_{\text{ср}}), \quad (3.3)$$

где S₆ – расчётное значение бокового зазора, мкм;

k – коэффициент, зависящий от материала электродов;
 j – технологическая плотность тока, А/см²;
 f – частота электрических разрядов, Гц;
 q – скважность;
 U_0 – напряжение холостого хода, В;
 h – длина вертикальной трассы удаления продуктов эрозии, мм.

Размер электрода-инструмента определяется как разность размеров отверстия и боковых зазоров

$$(a - S_6) \cdot (b - S_6). \quad (3.4)$$

Чтобы уложиться в пределы назначенного допуска на обработку ($\delta = 0,033$ мм). Электрод-инструмент необходимо изготовить с допуском на порядок выше, но не менее 0,01 мм. В противном случае можно выйти за пределы допуска и получить брак.

Расчёт бокового зазора S_6 на черновых и получистовых режимах проводится по формуле

$$S_6 = k \frac{e^{1,252} I_{\text{cp}}^{0,377} q^{0,039} [\ln(h)]^{0,25}}{[\ln(f)]^{1,65} U_0^{0,117} j^{0,076} (Q/R)^{0,083}}, \quad (3.5)$$

где Q/R – производительность обработки.

Расчёт торцевого зазора на черновых и получистовых режимах производится по формуле

$$S_T = k \frac{I_{\text{cp}}^{0,59} f^{0,02} U_0^{0,5} j^{0,28}}{e^{7,1} q^{0,05} Q^{0,46}}. \quad (3.6)$$

Далее необходимо по графику (рисунок 3.2) определить высоту микронеровностей R_T для стали 45. Затем по графику (рисунок 3.3) определить глубину изменённого слоя T_a для стали 45.

В ответе указать: боковой зазор на чистовых режимах $S_{6,\text{чист}}$, боковой зазор на черновых режимах $S_{6,\text{черн}}$, торцевой зазор на черновых режимах $S_{T,\text{черн}}$, торцевой зазор на получистовых режимах $S_{T,\text{пч}}$, размер электрода-инструмента, высоту микронеровностей детали R_T , толщину измененного слоя T_a .

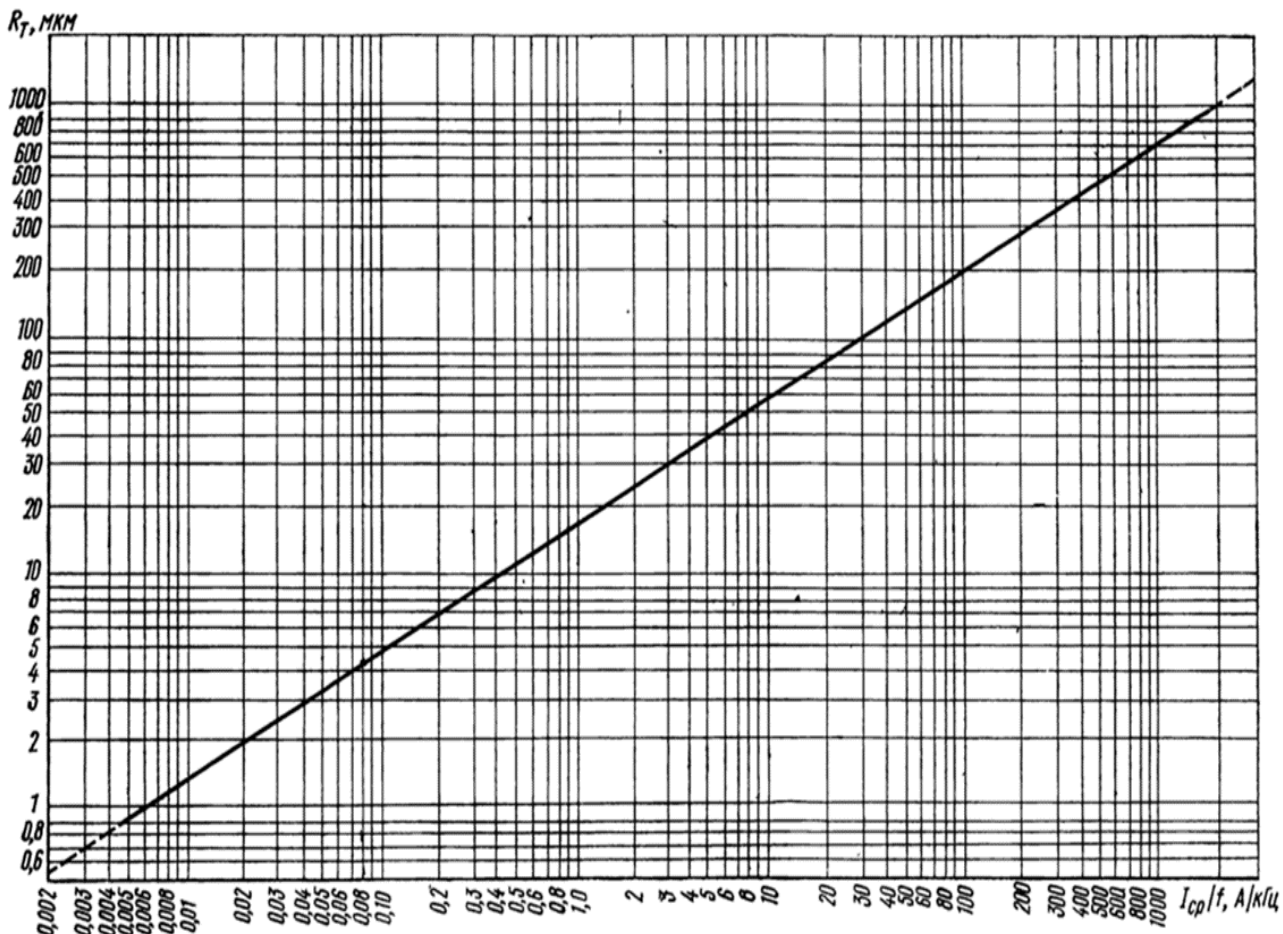


Рисунок 3.2 – Зависимость высоты микронеровностей от соотношения среднего тока к частоте импульсов различных материалов (медный электрод)

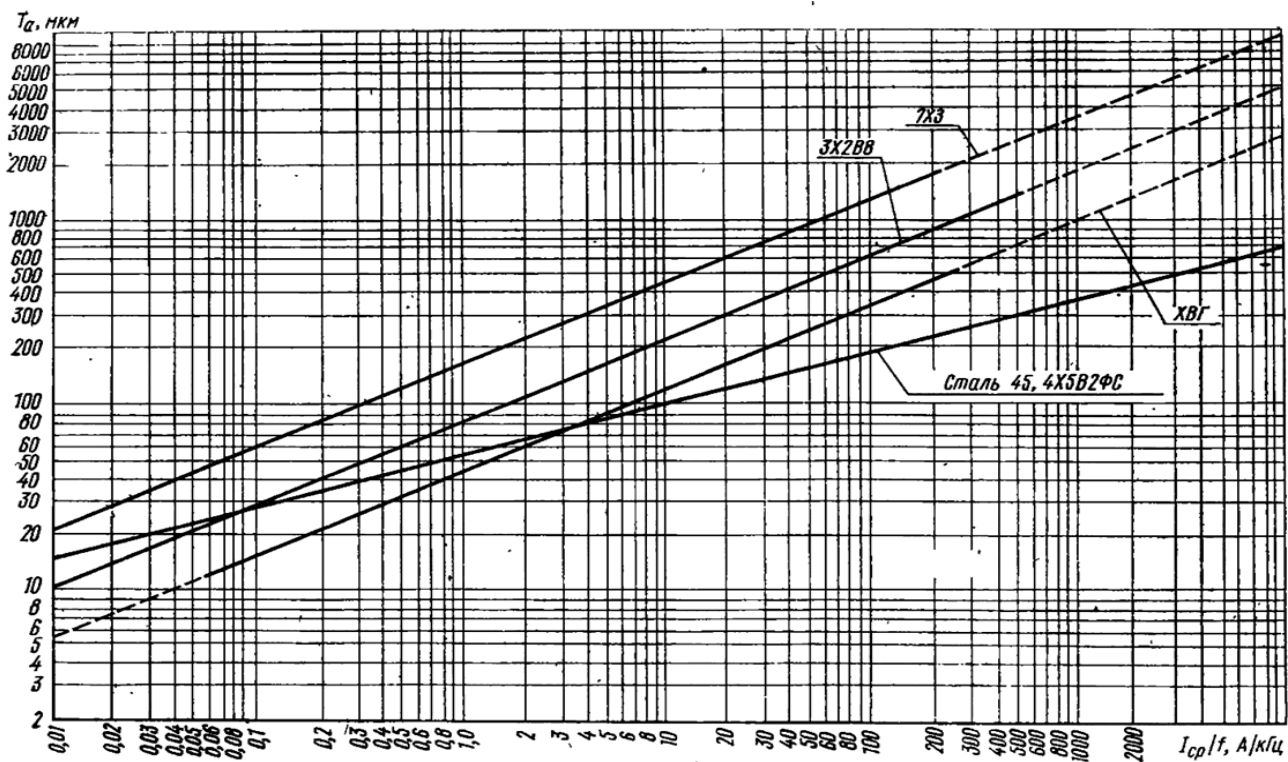
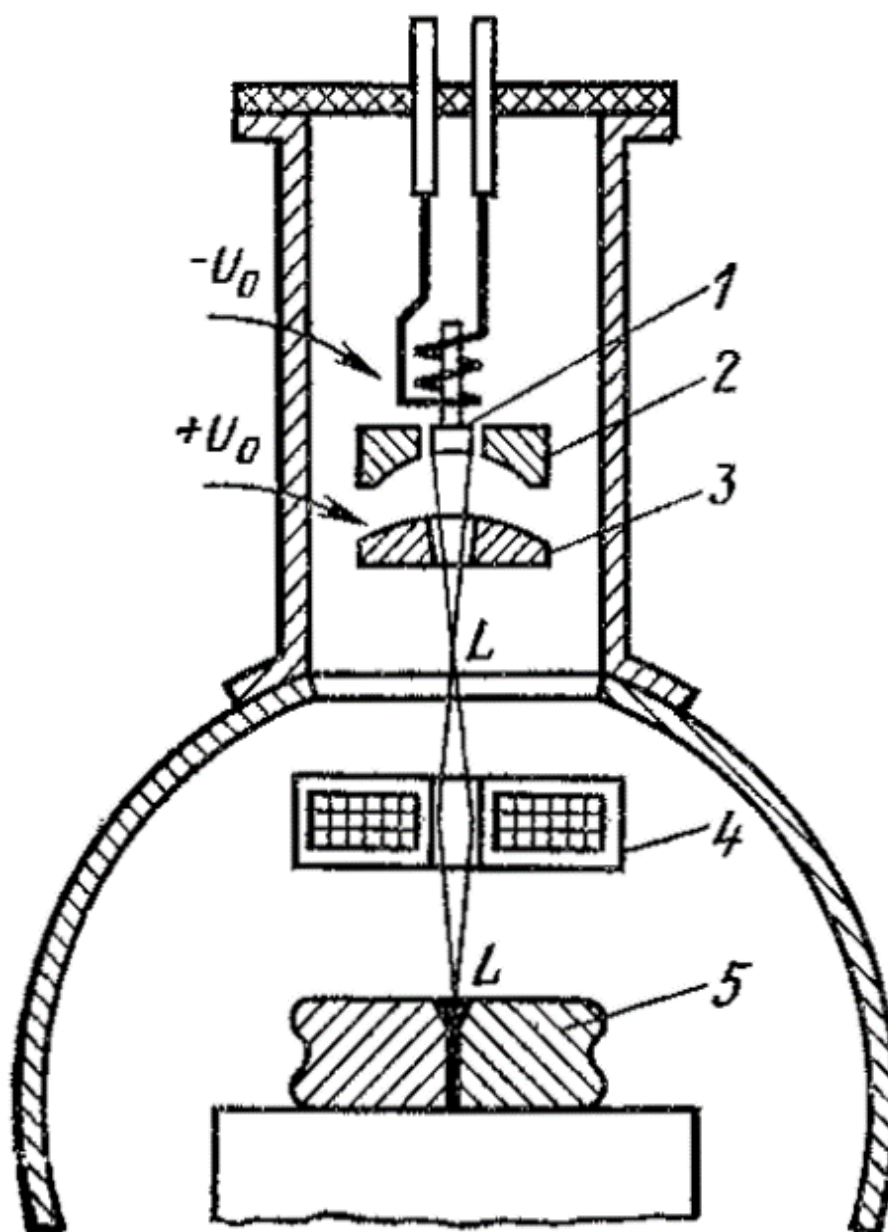


Рисунок 3.3 – Зависимость глубины изменённого слоя от соотношения среднего тока к частоте импульсов (электрод-инструмент – медь)

4 Практическая задача № 4. Расчёт и проектирование электронно-лучевых технологических систем

Цель: рассчитать основные параметры процессов электронно-лучевой сварки и размерной обработки. Схема обработки представлена на рисунке 4.1.

Задание: рассчитать скорость движения электродов, передаваемую электронным лучом мощность, приобретаемую электронами в электрическом поле кинетическую энергию, пробег электрона и удельную мощность луча согласно таблице вариантов (таблица 4.1).



1 – накаливаемый катод; 2 – фокусирующий наконечник; 3 – анод; 4 – катушка, фокусирующая электронный луч L; 5 – обрабатываемая заготовка

Рисунок 4.1 – Схема электронно-лучевой установки

Таблица 4.1 – Исходные варианты

№ вар.	Обрабатываемый материал	$U_{\text{уск}}$, кВ	$I_{\text{л}}$, мА	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·°С)	$T_{\text{пл}}$, °С	Время обработки t , с	Толщина металла h , м
1	Алюминий	149	113	2700	237	660	60	0,005
2	Титан	180	360	4505	22,8	1668	84	0,007
3	Железо	165	220	7874	71	1538	144	0,012
4	Молибден	160	140	10220	135	2623	228	0,019
5	Платина	170	250	21500	70	1768	324	0,027
6	Алюминий	100	162	2700	237	660	108	0,009
7	Титан	150	390	4505	22,8	1668	192	0,016
8	Железо	150	235	7874	71	1538	312	0,026
9	Молибден	150	150	10220	135	2623	456	0,038
10	Платина	150	270	21500	70	1768	600	0,05
11	Алюминий	100	113	2700	237	660	156	0,013
12	Титан	150	360	4505	22,8	1668	312	0,026
13	Железо	150	220	7874	71	1538	480	0,04
14	Молибден	150	140	10220	135	2623	600	0,05
15	Платина	150	250	21500	70	1768	600	0,05
16	Алюминий	149	162	2700	237	660	204	0,017
17	Титан	180	390	4505	22,8	1668	420	0,035
18	Железо	165	235	7874	71	1538	600	0,05
19	Молибден	160	150	10220	135	2623	600	0,05
20	Платина	170	270	21500	70	1768	600	0,05
21	Алюминий	149	113	2700	237	660	264	0,022
22	Алюминий	149	113	2700	237	660	540	0,045
23	Алюминий	180	360	2700	237	660	600	0,05
24	Алюминий	165	220	2700	237	660	600	0,05
25	Алюминий	160	140	2700	237	660	600	0,05
26	Алюминий	170	250	2700	237	660	312	0,026
27	Алюминий	100	162	2700	237	660	600	0,05
28	Алюминий	150	390	2700	237	660	600	0,05
29	Титан	150	235	4505	22,8	1668	600	0,05
30	Титан	150	150	4505	22,8	1668	600	0,05
31	Титан	150	270	4505	22,8	1668	372	0,031
32	Титан	100	113	4505	22,8	1668	600	0,05
33	Титан	150	360	4505	22,8	1668	600	0,05
34	Титан	150	220	4505	22,8	1668	600	0,05
35	Железо	150	140	7874	71	1538	600	0,05
36	Железо	150	250	7874	71	1538	420	0,035
37	Железо	149	162	7874	71	1538	600	0,05
38	Железо	180	390	7874	71	1538	600	0,05
39	Железо	165	235	7874	71	1538	600	0,05
40	Железо	160	150	7874	71	1538	600	0,05
41	Молибден	170	270	10220	135	2623	480	0,04
42	Молибден	149	113	10220	135	2623	600	0,05
43	Молибден	180	360	10220	135	2623	600	0,05
44	Молибден	165	220	10220	135	2623	600	0,05
45	Молибден	160	140	10220	135	2623	600	0,05

Продолжение таблицы 4.1

№ вар.	Обрабатываемый материал	$U_{\text{уск}}$, кВ	$I_{\text{л}}$, мА	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·°С)	$T_{\text{пл}}$, °С	Время обработки t , с	Толщина металла h , м
46	Платина	170	250	21500	70	1768	540	0,045
47	Платина	100	162	21500	70	1768	600	0,05
48	Платина	150	390	21500	70	1768	600	0,05
49	Платина	150	235	21500	70	1768	600	0,05
50	Платина	150	150	21500	70	1768	600	0,05

Методика расчёта

При ускорении электронов в электрическом поле, что необходимо для придания им достаточной кинетической энергии, скорость движения электронов определяется как

$$v = \sqrt{\frac{2eU_{\text{уск}}}{m_e}}, \quad (4.1)$$

где e – заряд электрона; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл;
 $U_{\text{уск}}$ – ускоряющее напряжение, кВ;
 m_e – масса электрона; $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ кг.

Мощность, передаваемая электронным лучом объекту его фокусирования (без учёта потерь на отражение и излучение)

$$W = I_{\text{л}} \cdot U_{\text{уск}}, \quad (4.2)$$

где W – передаваемая мощность, Вт;
 $I_{\text{л}}$ – сила тока в луче, А.

Кинетическая энергия, приобретаемая электронами в электрическом поле

$$E_{\text{кин}} = e \cdot U_{\text{уск}} \cdot 6,242 \cdot 10^{18}, \quad (4.3)$$

где $E_{\text{кин}}$ – кинетическая энергия, эВ.

Электроны, тормозящиеся поверхностью материала, проникают в него на некоторую глубину. Толщина слоя вещества, в котором электрон полностью теряет скорость, называется пробегом электрона

$$\delta_{\text{эл}} = 2,1 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{U_{\text{уск}}^2}{\rho}, \quad (4.4)$$

где $\delta_{эл}$ – пробег электрона, мкм;

ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³.

Теплота, выделяющаяся при торможении электронного луча, в зависимости от его мощности, нагревает, плавит или испаряет металл.

Для проведения технологических операций ЭЛО необходима удельная мощность луча для образования расплавленной ванны диаметром d_s , равным толщине h металла

$$W_{уд} = \frac{3,47 \cdot \lambda \cdot T_{пл}}{10 \cdot d_0}, \quad (4.5)$$

где $W_{уд}$ – удельная мощность луча, Вт/м²;

λ – теплопроводность обрабатываемого материала, Вт/(м·°С);

$T_{пл}$ – температура плавления обрабатываемого материала, °С;

d_0 – диаметр участка, на краях которого температура T_0 остаётся неизменной; $d_0 = 10 \cdot h$.

Затраченная электроэнергия вычисляется по формуле

$$\mathcal{E} = \frac{Wt}{3600 \cdot 1000}, \quad (4.6)$$

где \mathcal{E} – затраченная электроэнергия, кВт/ч.

В ответе указать передаваемую электронным лучом мощность, пробег электрона, удельную мощность луча и затраченную электроэнергию.

5 Практическая задача № 5. Расчёт режимов лазерной обработки

Цель: определить влияние режимов лазерной обработки на мощность и энергию импульсов излучения газового (N₂) лазера.

Задание: рассчитать диаметр фокусного пятна, определить мощность импульсов и энергию импульсов согласно общим данным (таблица 5.1) и исходным вариантам (таблица 5.2).

Активная среда азотного лазера (рисунок 5.1) – чистый азот, азотно-гелиевая смесь, а иногда чистый воздух (с более низкой производительностью). Излучение производится на длине волны 337,1 нм. Высокий коэффициент усиления света приводит к тому, что лазерная установка может обходиться без

резонатора, испуская относительно эффективное супер люминесцентное излучение.

Таблица 5.1 – Общие данные

Параметр № условий	1	2	3	4	5
τ , с	$3,37 \cdot 10^{-6}$	$3,37 \cdot 10^{-6}$	$3,37 \cdot 10^{-6}$	$3,37 \cdot 10^{-6}$	$3,37 \cdot 10^{-6}$
q_0 , Вт/м ²	$1 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{11}$
θ , рад;	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001
f , м	0,03	0,03	0,03	0,03	0,06
h , м	0,006	0,003	0,006	0,006	0,006

Таблица 5.2 – Исходные варианты

№ вар.	Периметр обработки Р, м	Смещение r , %	№ вар.	Периметр обработки Р, м	Смещение r , %
1	0,05	8,00	26	2,664	8,00
2	0,056	6,00	27	2,883	8,00
3	0,069	4,00	28	3,111	9,00
4	0,089	3,00	29	3,348	10,00
5	0,117	7,00	30	3,594	3,00
6	0,153	7,00	31	3,849	10,00
7	0,197	3,00	32	4,113	1,00
8	0,249	6,00	33	4,386	3,00
9	0,309	5,00	34	4,668	2,00
10	0,378	6,00	35	4,959	8,00
11	0,455	8,00	36	5,259	10,00
12	0,541	8,00	37	5,569	6,00
13	0,635	10,0	38	5,888	5,00
14	0,738	10,00	39	6,216	2,00
15	0,85	2,00	40	6,553	8,00
16	0,97	1,00	41	6,899	4,00
17	1,099	7,00	42	7,255	3,00
18	1,237	7,00	43	7,62	8,00
19	1,384	8,00	44	7,994	5,00
20	1,54	7,00	45	8,377	8,00
21	1,705	3,00	46	8,77	4,00
22	1,879	9,00	47	9,172	9,00
23	2,062	1,00	48	9,583	6,00
24	2,254	9,00	49	10,003	8,00
25	2,454	3,00	50	10,433	4,00

Методика расчёта

Диаметр пучка на фокусном расстоянии определяется как

$$d = \theta \cdot f, \quad (5.1)$$

где θ – расходимость пучка, рад;
 f – фокусное расстояние оптической системы, м.

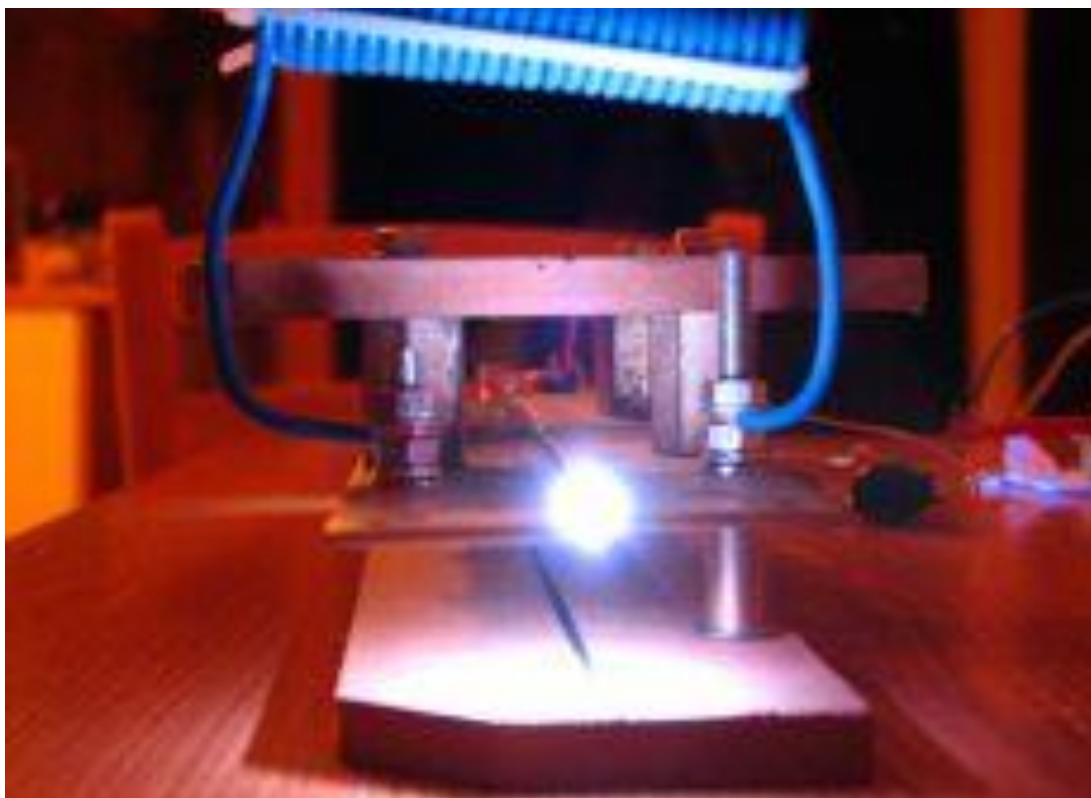


Рисунок 5.1 – Азотный лазер

Мощность импульсов лазерного излучения определяется выражением

$$P_0 = q_0 \cdot S, \quad (5.2)$$

где q_0 – мощность излучения в фокусе, Вт/м²;
 S – площадь пятна в фокальной плоскости, м²; $S = \pi \cdot d^2 / 4$.

Количество потреблённой электрической энергии рассчитывается по формуле

$$W = P_0 \cdot \tau, \quad (5.3)$$

где τ – длительность импульса, с.

При обработке лазер совершает определенное движение, согласно программе обработки, со скоростью, обеспечивающей перемещение лазера за время между импульсами, равное некоторой части диаметра фокусного пятна.

При этом, следует учесть то, что каждая элементарная часть площади обрабатывается h/d раз. Тогда количество импульсов равно

$$n = \frac{Ph}{d^2r}, \quad (5.4)$$

где r – часть диаметра, на которую производится смещение.

Принимая паузу между импульсами равной длине импульса, находится время обработки

$$t = 2n\tau. \quad (5.5)$$

Необходимая скорость перемещения лазера составит

$$U = \frac{P}{t} \cdot 1000. \quad (5.6)$$

В ответе указать: мощность импульсов лазерного излучения, энергию импульсов излучения, число импульсов, время обработки, скорость перемещения лазера. Сделать вывод о влиянии тех или иных параметров на результаты и заполнить таблицу 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты расчётов

Параметр № условий	1	2	3	4	5
P_0					
W					
n					
t					
V					

6 Практическая задача № 6. Проектирование точечного волновода

Цель: спроектировать точечный волновод, присоединяемый к трансформатору упругих колебаний.

Задание: рассчитать коэффициент усиления согласно таблице вариантов (таблица 6.1), найти резонансную длину волноводов, вычислить показатель сужения, составить таблицу для построения профиля волноводов, построить профили круглых экспоненциальных волноводов (рисунок 6.1), выяснить влияние физических свойств материала экспоненциального волновода на его параметры; определить объём, массу и стоимость каждого волновода и выбрать наиболее дешёвый.

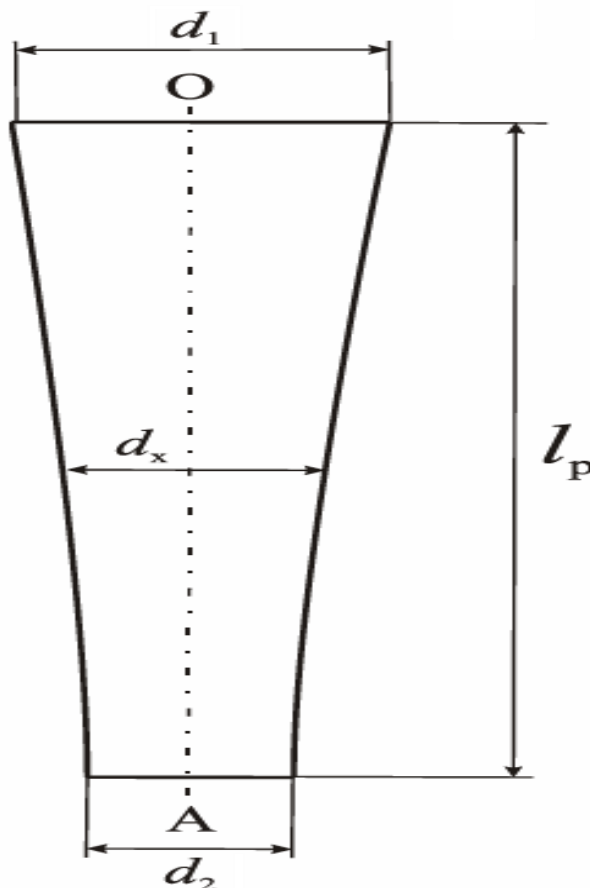


Рисунок 6.1 – Круглый экспоненциальный волновод

Таблица 6.1 – Таблица вариантов

№ вар.	f , кГц	d_1 , мм	d_2 , мм	C_1 , м/с	C_2 , м/с	C_3 , м/с	$Ц_{M1}$, руб/кг	$Ц_{M2}$, руб/кг	$Ц_{M3}$, руб/кг	r_1 , г/см ³	r_2 , г/см ³	r_3 , г/см ³
1	18,5	35	7	3000	4000	5000	1800	1600	1400	8,4	7,9	7,4
2	19	36	8	3200	4200	4900	1800	1600	1400	8,3	7,8	7,3
3	19,5	37	9	3400	4400	4700	1700	1500	1300	8,2	7,7	7,2
4	20	38	10	3600	4600	4500	1700	1500	1300	8,1	7,6	7,1
5	20,5	39	11	3800	4800	4100	1600	1500	1300	8	7,5	7
6	21	40	12	3000	4000	5000	1800	1600	1400	8,4	7,9	7,4
7	21,5	41	13	3200	4200	4900	1800	1600	1400	8,3	7,8	7,3
8	22	42	14	3400	4400	4700	1700	1500	1300	8,2	7,7	7,2
9	22,5	43	15	3600	4600	4500	1700	1500	1300	8,1	7,6	7,1
10	23	44	16	3800	4800	4100	1600	1500	1300	8	7,5	7
11	23,5	45	17	3000	4000	5000	1800	1600	1400	8,4	7,9	7,4

Продолжение таблицы 6.1

№ вар.	f , кГц	d_1 , мм	d_2 , мм	C_1 , м/с	C_2 , м/с	C_3 , м/с	Π_{M1} , руб/ кг	Π_{M2} , руб/ кг	Π_{M3} , руб/ кг	r_1 , г/см ³	r_2 , г/см ³	r_3 , г/см ³
12	24	46	18	3200	4200	4900	1800	1600	1400	8,3	7,8	7,3
13	24,5	47	19	3400	4400	4700	1700	1500	1300	8,2	7,7	7,2
14	25	48	20	3600	4600	4500	1700	1500	1300	8,1	7,6	7,1
15	25,5	49	21	3800	4800	4100	1600	1500	1300	8	7,5	7
16	26	50	22	3000	4000	5000	1800	1600	1400	8,4	7,9	7,4
17	26,5	51	23	3200	4200	4900	1800	1600	1400	8,3	7,8	7,3
18	27	52	24	3400	4400	4700	1700	1500	1300	8,2	7,7	7,2
19	27,5	53	25	3600	4600	4500	1700	1500	1300	8,1	7,6	7,1
20	28	54	26	3800	4800	4100	1600	1500	1300	8	7,5	7
21	28,5	55	27	3000	4000	5000	1800	1600	1400	8,4	7,9	7,4
22	29	56	28	3200	4200	4900	1800	1600	1400	8,3	7,8	7,3
23	29,5	57	29	3400	4400	4700	1700	1500	1300	8,2	7,7	7,2
24	30	58	30	3600	4600	4500	1700	1500	1300	8,1	7,6	7,1
25	30,5	59	31	3800	4800	4100	1600	1500	1300	8	7,5	7
26	30,5	35	7	3000	4000	5000	1800	1600	1400	8,4	7,9	7,4
27	30	36	8	3200	4200	4900	1800	1600	1400	8,3	7,8	7,3
28	29,5	37	9	3400	4400	4700	1700	1500	1300	8,2	7,7	7,2
29	29	38	10	3600	4600	4500	1700	1500	1300	8,1	7,6	7,1
30	28,5	39	11	3800	4800	4100	1600	1500	1300	8	7,5	7
31	28	40	12	3000	4000	5000	1800	1600	1400	8,4	7,9	7,4
32	27,5	41	13	3200	4200	4900	1800	1600	1400	8,3	7,8	7,3
33	27	42	14	3400	4400	4700	1700	1500	1300	8,2	7,7	7,2
34	26,5	43	15	3600	4600	4500	1700	1500	1300	8,1	7,6	7,1
35	26	44	16	3800	4800	4100	1600	1500	1300	8	7,5	7
36	25,5	45	17	3000	4000	5000	1800	1600	1400	8,4	7,9	7,4
37	25	46	18	3200	4200	4900	1800	1600	1400	8,3	7,8	7,3
38	24,5	47	19	3400	4400	4700	1700	1500	1300	8,2	7,7	7,2
39	24	48	20	3600	4600	4500	1700	1500	1300	8,1	7,6	7,1
40	23,5	49	21	3800	4800	4100	1600	1500	1300	8	7,5	7
41	23	50	22	3000	4000	5000	1800	1600	1400	8,4	7,9	7,4
42	22,5	51	23	3200	4200	4900	1800	1600	1400	8,3	7,8	7,3
43	22	52	24	3400	4400	4700	1700	1500	1300	8,2	7,7	7,2
44	21,5	53	25	3600	4600	4500	1700	1500	1300	8,1	7,6	7,1
45	21	54	26	3800	4800	4100	1600	1500	1300	8	7,5	7
46	20,5	55	27	3000	4000	5000	1800	1600	1400	8,4	7,9	7,4
47	20	56	28	3200	4200	4900	1800	1600	1400	8,3	7,8	7,3
48	19,5	57	29	3400	4400	4700	1700	1500	1300	8,2	7,7	7,2
49	19	58	30	3600	4600	4500	1700	1500	1300	8,1	7,6	7,1
50	18,5	59	31	3800	4800	4100	1600	1500	1300	8	7,5	7

Методика расчёта

Коэффициент усиления рассчитывается по формуле

$$K_y = \frac{d_1}{d_2}, \quad (6.1)$$

где d_1 – диаметр входа, м;
 d_2 – диаметр выхода, м.

Резонансная длина i -ого волновода определяется как

$$l_{pi} = \frac{C_i}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln K_y}{\pi}\right)^2}, \quad (6.2)$$

где C_i – скорость звука в i -ом волноводе, м/с;
 f – резонансная частота, Гц.

Находится показатель сужения

$$b_i = \frac{2}{l_{pi}} \ln K_y, \quad (6.3)$$

Для построения профилей волноводов необходимо для каждого из них составить таблицу зависимости радиуса от длины с шагом в 5 мм (таблица 6.2).

Таблица 6.2 – Построение профиля волновода

х, мм	$(b_i/2)x$	$e^{-(b_i/2)x}$	$r_x = (d_1 e^{-(b_i/2)x})/2$, мм
0			
5			
10			
...			
l_{pi}			

По данным таблицы построить профиль волновода. Для этого необходимо провести осевую линию ОА, длина которой равна l_{pi} . Перпендикулярно этой линии, на расстоянии x от точки О необходимо провести в обе стороны отрезки длиной r_x . Далее профиль волновода обводится по контуру, подобно рисунку 6.1.

Построив профиль волновода, можно сделать вывод о том, что фигура, образованная осью волновода, прямыми $x = 0$ и $x = l_{pi}$, а также кривой радиусов волновода образуют собой криволинейную трапецию. Тогда можно определить объём волновода как

$$V_i = \pi \int_0^{l_{pi}} \left(\frac{d_1 e^{-\left(\frac{b_i}{2}\right)x}}{2} \right)^2 dx. \quad (6.4)$$

Масса волновода вычисляется по формуле

$$m_i = \rho_i V_i, \quad (6.5)$$

где ρ_i – плотность материала i -ого волновода, кг/м³.

Стоимость i -ого волновода вычисляется по формуле

$$Ст_i = m_i \cdot Ц_{м_i}, \quad (6.6)$$

где $Ц_{м_i}$ – стоимость материала i -ого волновода, руб./кг.

В ответе указать: номер наиболее дешёвого волновода.

7 Практическая задача № 7. Расчёт прогнозируемого упрочнения железа после лазерного легирования алюминием

Цели:

- 1) ознакомиться с сущностью процесса лазерного легирования;
- 2) рассчитать суммарный предел текучести железа после лазерного легирования.

Задание: рассчитать приросты предела текучести за счёт: твёрдорастворного упрочнения легирующими элементами, дислокационного упрочнения, зернограничного упрочнения, образования субструктуры, образования микронапряжений и суммарный предел текучести железа после лазерного легирования; сравнить полученное значение с требуемым пределом текучести и скорректировать концентрацию легирующего элемента для получения требуемого предела текучести согласно исходным вариантам представленных в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Исходные варианты

№ вар.	Марка стали	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Концентрация легирующего элемента СЛЭ, %	Модуль упругости E , МПа	Требуемый предел текучести, МПа
1	18ХГТ	780	0,5	211000	1930

Продолжение таблицы 7.1

№ вар.	Марка стали	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Концентрация легирующего элемента СЛЭ, %	Модуль упругости E, МПа	Требуемый предел текучести, МПа
2	15X	195	0,5	215000	1350
3	20Л	215	0,5	201000	1370
4	20К	245	0,5	211000	1400
5	40	315	0,5	213000	1470
6	45	345	0,5	200000	1500
7	30ХГСН2А	1375	0,5	195000	2530
8	34ХН3М	735	0,5	207000	1890
9	25ХГСА	1200	0,5	213000	2350
10	38ХМА	1600	0,5	211000	2750
11	12Х18Н10Т	200	0,5	198000	1350
12	40ХС	640	0,5	219000	1790
13	10Х14Г14Н4Т	245	0,5	194000	1400
14	18ХГТ	780	0,75	211000	2000
15	15X	195	0,75	215000	1400
16	20Л	215	0,75	201000	1500
17	20К	245	0,75	211000	1500
18	40	315	0,75	213000	1600
19	45	345	0,75	200000	1600
20	30ХГСН2А	1375	0,75	195000	2600
21	34ХН3М	735	0,75	207000	2000
22	25ХГСА	1200	0,75	213000	2400
23	38ХМА	1600	0,75	211000	2800
24	12Х18Н10Т	200	0,75	198000	1400
25	40ХС	640	0,75	219000	1900
26	10Х14Г14Н4Т	245	0,75	194000	1500
27	18ХГТ	780	1,0	211000	2080
28	15X	195	1,0	215000	1420
29	20Л	215	1,0	201000	1530
30	20К	245	1,0	211000	1530
31	40	315	1,0	213000	1640
32	45	345	1,0	200000	1640
33	30ХГСН2А	1375	1,0	195000	2740
34	34ХН3М	735	1,0	207000	2080
35	25ХГСА	1200	1,0	213000	2520
36	38ХМА	1600	1,0	211000	2960
37	12Х18Н10Т	200	1,0	198000	1420
38	40ХС	640	1,0	219000	1970
39	10Х14Г14Н4Т	245	1,0	194000	1530
40	18ХГТ	780	2,0	211000	2200
41	15X	195	2,0	215000	1500
42	20Л	215	2,0	201000	1600
43	20К	245	2,0	211000	1600
44	40	315	2,0	213000	1700
45	45	345	2,0	200000	1700
46	30ХГСН2А	1375	2,0	195000	2900

№ вар.	Марка стали	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Концентрация легирующего элемента СЛЭ, %	Модуль упругости E, МПа	Требуемый предел текучести, МПа
47	34ХН3М	735	2,0	207000	2200
48	25ХГСА	1200	2,0	213000	2700
49	38ХМА	1600	2,0	211000	3200
50	12Х18Н10Т	200	2,0	198000	1500

Лазерное легирование заключается в насыщении материала легирующими элементами посредством диффузии предварительно нанесённого слоя под воздействием лазерного пучка. При этом достигается высокая концентрация легирующих компонентов в поверхностных слоях материалов.

Преимущества лазерного поверхностного легирования:

- хорошая воспроизводимость параметров и свойств поверхностного слоя;
- большая скорость процесса и достижение высокого качества поверхностного слоя;
- возможность получения узких локальных зон с заданным химическим составом;
- экономия дорогостоящего легирующего материала;
- отсутствие необходимости в последующей термообработке;
- экологическая чистота процесса легирования.

В процессе лазерного легирования на поверхности железа в зонах термического влияния образуется мелкозернистая структура легированного феррита с высокой плотностью дислокаций. При лазерном легировании поверхности армко-железа (технически чистого железа, от аббр. ARMCO – сокращённого названия американской фирмы American Rolling Mill Corporation) одним из нитридообразующих элементов (V, Cr, Mo, Al), как правило в зоне лазерного легирования формируется структура твёрдого раствора легируемого элемента (ЛЭ) в Fe с распределением легирующего элемента с концентрацией от 5 % до 17 %, которая зависит от параметров лазерного излучения.

Для структуры зон лазерного легирования характерна высокая плотность дислокаций ($\rho = 10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-2}$) и очень мелкое зерно (от 2 до 7 мкм, рисунок 7.1).

На основании экспериментальных и расчётных данных об основных параметрах структуры можно рассчитать значения прироста предела текучести за счёт твёрдорастворного, дислокационного, зернограничного, субзернограничного, а также упрочнения, возникающего от микронапряжений в кристаллической решётке.

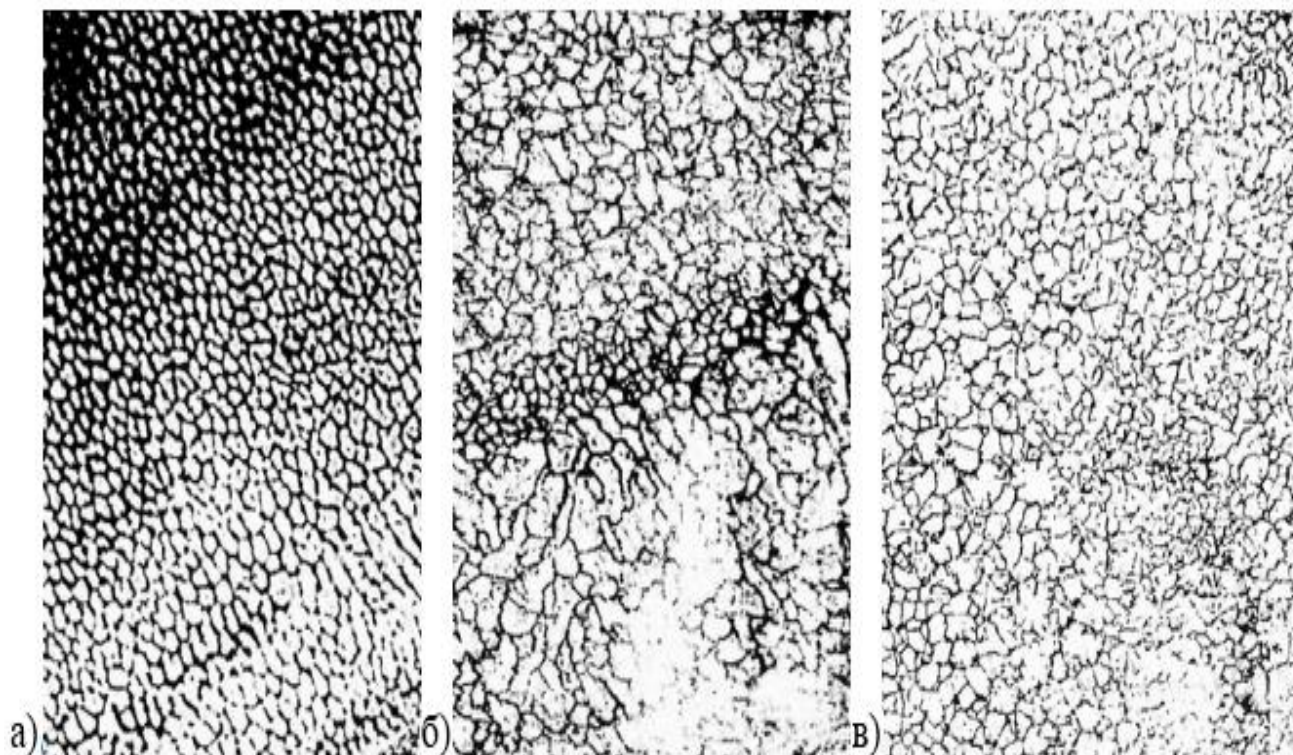
Методика расчёта

Наиболее изучено влияние легирующих элементов на изменение механических свойств феррита. Прирост предела текучести при твёрдорастворном упрочнении легирующими элементами (элементами замещения)

$$\Delta\sigma_{\text{трлэ}} = K_{\text{лэ}} \cdot C_{\text{лэ}}, \quad (7.1)$$

где $K_{\text{лэ}}$ – коэффициент твёрдорастворного упрочнения легирующего материала, $K_{\text{лэ}} = 60 \text{ МПа}$;

$C_{\text{лэ}}$ – концентрация легирующего элемента, %.



а – хромом; б – ванадием; в – молибденом

Рисунок 7.1 – Микроструктуры железа после лазерного легирования

Оценочный расчёт твёрдорастворного упрочнения элементами замещения позволяет определить, какие легирующие элементы являются наиболее эффективными упрочнителями. Вместе с тем, в реальных сталях легирующие элементы могут образовывать карбиды или нитриды, что скажется на фактическом значении данного параметра.

Упрочнение металла за счёт торможения движущихся дислокаций другими неорганизованными дислокациями чаще всего реализуется в результате пластической деформации. Прирост предела текучести за счёт дислокационного упрочнения

$$\Delta\sigma_{\text{д}} = abG\sqrt{\rho_{\text{д}}}, \quad (7.2)$$

где a – коэффициент дислокационного упрочнения, $a = 0,3$;

b – вектор Бюргера матричного металла, для сплавов железа при выполнении задания принять $b = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}$;

G – модуль сдвига матричного металла, для сплавов железа при выполнении задания принять $G = 82000$ МПа;

ρ_d – плотность дислокаций легирующего металла, см^{-2} .

При зернограничном упрочнении прирост прочности обусловлен сопротивлением границ зёрен движению дислокаций. Прирост предела текучести за счёт зернограничного упрочнения

$$\Delta\sigma_3 = \frac{K_3}{\sqrt{d_3}}, \quad (7.3)$$

где K_3 – коэффициент зернограничного упрочнения, $K_3 = 6 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{м}^{1/2}$;
 d_3 – размер зерна легирующего металла, для алюминия $d_3 = 5 \cdot 10^{-6}$ м.

Субструктурное упрочнение обусловлено торможением дислокаций такими элементами субструктуры, как субзерна или ячейки. Прирост предела текучести за счёт образования субструктуры

$$\Delta\sigma_c = \frac{K_c}{l_{\text{я}}}, \quad (7.4)$$

где K_c – коэффициент субструктурного упрочнения, $K_c = 150 \text{ Па} \cdot \text{м}$;
 $l_{\text{я}}$ – размер ячеек, $l_{\text{я}} = 5 \cdot 10^{-7}$ м.

Прирост предела текучести за счёт микронапряжений

$$\Delta\sigma_H = \frac{\Delta a}{a} \cdot E, \quad (7.5)$$

где $\frac{\Delta a}{a}$ – относительное изменение параметра решётки; $\frac{\Delta a}{a} = 2,1 \cdot 10^{-4}$;

E – модуль упругости железа, $E = 2,12 \cdot 10^5$ МПа.

Суммарный прирост предела текучести железа после лазерного легирования

$$\sigma_T = \sigma_0 + \Delta\sigma_d + \Delta\sigma_3 + \Delta\sigma_c + \Delta\sigma_{\text{трЛЭ}} + \Delta\sigma_H, \quad (7.5)$$

где σ_0 – напряжение Пайерлса-Набарро матрицы, для железа $\sigma_0 = 30$ МПа.

Далее необходимо сравнить полученное значение (сумма прироста текучести и $\sigma_{0,2}$) с требуемым пределом текучести и скорректировать концентрацию легирующего элемента для получения требуемого предела текучести.

В ответе указать: суммарный прирост предела текучести железа после лазерного легирования по предварительному расчёту и необходимую для получения требуемого предела текучести концентрацию легирующего элемента.

Библиографический список

1. Григорьев, С. Н. Технология обработки концентрированными потоками энергии: учебное пособие для вузов / С.Н. Григорьев, Е.В. Смоленцев, М.А. Волосова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол : ООО ТНТ, 2022. – 280 с.
2. Дятлов, Р.Н. Обработка материалов концентрированными потоками энергии. Конспект лекций / Р.Н. Дятлов. – Рязань : Рязанский институт (филиал) Университета машиностроения, 2015. – 67 с.
3. Ковшов, А.Н. Нетрадиционные методы обработки материалов: учебное пособие / А.Н. Ковшов, Ю.Ф. Назаров, В.М. Ярославцев. – Москва : МГОУ, 2007. – 211 с.
4. Кондрахин, А.А. Высокие технологии размерной обработки в машиностроении: курс лекций / А.А. Кондрахин. – Рязань : Рязанский институт (филиал) МГОУ, 2011. – 78 с.
5. Петрова, Л.Г. Прогнозирование уровня упрочнения металлов и сплавов на основе методологии управления структурообразованием / Л.Г. Петрова, О.В. Чудина // Упрочняющие технологии и покрытия. – № 7(31). – 2007. – С. 3-12.

Учебное издание

Аверин Николай Витальевич,
Асаев Александр Семенович

**ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАБОТКА
МАТЕРИАЛОВ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ
ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ**

Практикум

Подписано в печать _____. Тираж 5 экз.
Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета
390000, г. Рязань, ул. Право-Лыбедская, 26/53