

СОДЕРЖАНИЕ

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК И СБОРКА

Ямников А.С., Чуприков А.О. Влияние упрочняющих фасок на режущем клине керамических резьбовых резцов на эксплуатационные характеристики 2

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ, ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ И ДРУГИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Скрябин В.А. Режимные параметры и основные технологические показатели электроэрозионной обработки 9

НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ

Кузнецов Ю.А., Кравченко И.Н., Петровский Д.И. Исследование элементного состава и износостойкости покрытий, полученных плазменно-электролитическим оксидированием. 15

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Пожидаева С.Д., Иванов А.М. Сравнительные характеристики использования в качестве окислителя металлов и сплавов молекулярного йода и соединений меди(II) в процессе с регенерацией их по ходу протекания 21

ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ МЕТАЛЛОВ И МАТЕРИАЛОВ

Смирнов Е.Н., Скляр В.А., Богадевич Д.И., Смирнов А.Н., Белевитин В.А. Оценка силовых параметров реализации технологии MSR в условиях сортовой МНЛЗ при наличии дополнительного сдвигового воздействия 31

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ОБОРУДОВАНИЯ, КОНСТРУКЦИЙ И МАТЕРИАЛОВ

Баурова Н.И., Коноплин А.Ю. Технологическая наследственность и модели ее визуализации 38

ТРУБНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Казанцева Н.К., Казанцева Т.В., Лукоянова П.М., Шимов В.В., Александров В.А. Анализ национальной и международной базы стандартов на трубную продукцию 43

Гончарук А.В., Романцев Б.А., Орлов Д.А., Гамин Ю.В. Влияние режимов деформации на точность бесшовных труб 50

СОРТОПРОКАТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Сметанин С.В., Перетяцько В.Н., Юрьев А.Б., Дорофеев В.В. Ресурсосберегающая технология прокатки асимметричных рельсовых профилей на стане тандем 55

Режимные параметры и основные технологические показатели электроэрозионной обработки

В.А. СКРЯБИН*, д-р техн. наук, проф.

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», г. Пенза, 440026, Российская Федерация

*E-mail: vs-51@list.ru

DOI: 10.31044/1684-2499-2020-0-1-9-14

Статья поступила в редакцию 02.07.2019

Принята после доработки 29.08.2019

Принята к публикации 18.09.2019

Рассмотрены вопросы по определению режимных параметров и основных технологических показателей. Приведены конкретные примеры их расчета.

Ключевые слова: режимные параметры, основные технологические показатели, электроэрозионная обработка, примеры расчета.

Сущность электроэрозионной обработки заключается в удалении припуска с заготовки в среде диэлектрика за счет микроразрядов, расплавляющих частицы металла.

Процесс электроэрозионной обработки (ЭЭО) [1–3] представляет собой разрушение металла или иного токопроводящего материала в результате локального воздействия кратковременных многократных электрических разрядов между двумя электродами, один из которых является обрабатываемой деталью, а другой — электродом-инструментом (ЭИ). Под воздействием высоких температур в зоне разряда происходит нагрев, расплавление и частичное испарение металла — электрическая эрозия. Для получения высокой температуры в ограниченной области малого съема необходима большая концентрация энергии. Достижение этой цели осуществляется использованием импульсного напряжения, а ЭЭО осуществляется в жидкой среде,

которая заполняет зазор между электродами, называемый межэлектродным промежутком (МЭП), или межэлектродным зазором. Схема электроэрозионной обработки показана на рис. 1. Электроды, один из которых является обрабатываемой деталью 1, а другой — инструментом 2, подключаются к генератору электрических импульсов и погружаются в диэлектрическую жидкость 3. При сближении электродов на достаточно малое расстояние происходит пробой межэлектродной среды в месте с наибольшей напряженностью электрического поля. Диэлектрическая прочность промежутка в месте пробоя нарушается, и образуется тонкий токопроводящий канал 4, замыкающий электроды. По образовавшемуся токопроводящему каналу протекает импульс тока большой плотности, канал разряда расширяется, при этом температура в зоне разряда достигает нескольких тысяч градусов. Участки электродов 5 и 7 в зоне разряда расплавляются и испаряются. Под воздействием высоких

температур жидкость в зоне разряда разлагается и испаряется, и вместе с парами металла образует быстро расширяющийся пузырь 6.

При уменьшении тока, проходящего через электроды, давление паров в расширяющемся газовом пузыре падает. В результате снижения давления расплавленный металл вскипает и выбрасывается в виде мелких капель 8 в окружающую среду (жидкость), где и застывает в виде мелких частиц. Твердые продукты эрозии выносятся из межэлектродного промежутка под действием ударных волн и течений жидкости, вызванных электрическим разрядом и образованием шарового пузыря с последующим его расширением. На поверхностях электродов в месте прохождения разряда образуются лунки. Размеры лунок зависят в основном от энергии и длительности импульсов и электроэрозионной стойкости материала. 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 с одного из электродов, даже если материалы электродов одинаковы. Направленность съема материала определяется полярностью подключения электродов к генератору импульсов и параметрами импульсов. При подаче синусоидального импульса напряжения на электроды (рис. 2) на участке 0—1 напряжение увеличится до $U_{пр}$, при котором нарушается диэлектрическая прочность промежутка. Среднее напряжение, при котором происходит пробой межэлектродного промежутка, почти линейно зависит от величины этого промежутка и на чистовых режимах составляет 40—50 В, а на черновых 70—80 В. Участок 1—2 соответствует искровой стадии разряда, для которой характерно быстрое снижение напряжения на промежутке до 25—35 В и столь же быстрое увеличение тока в цепи. Участок 2—3 соответствует дуговой стадии разряда, на которой незначительно снижаются напряжение и ток

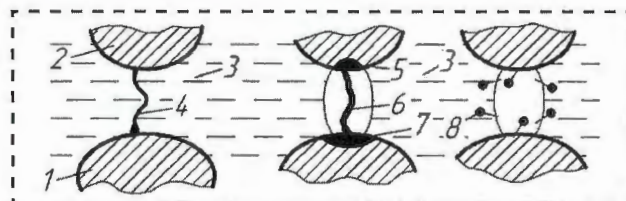


Рис. 1. Схема электроэрозионной обработки

в цепи. При падении напряжения U_s ниже 15—20 В разряд прекращается. При обработке короткими импульсами высокой частоты дуговая стадия разряда может отсутствовать, и разряд прекращается сразу после искровой стадии. Количество удаленного материала на дуговой стадии разряда и размеры образующихся лунок значительно больше, чем на искровой стадии.

Основные технологические показатели процесса электроэрозионной обработки (ЭЭО) — точность, качество поверхности, производительность — зависят от количества выплавляемого за один импульс металла из ванн, что определяется энергией импульса.

Энергию импульса находим из выражения [3—4]:

$$A_{и} = I_{ср} \cdot U_{ср} \cdot \tau_{и} \text{ Дж}, \quad (1)$$

где $I_{ср} = (0,5—0,75) I_k$ — средняя сила тока, А; I_k — значение силы тока при коротком замыкании (устанавливается по приборам станка); $U_{ср} = (0,5—0,75) U_0$ — среднее напряжение пробоя, В; U_0 — напряжение холостого хода при разомкнутых электродах (контролирует-

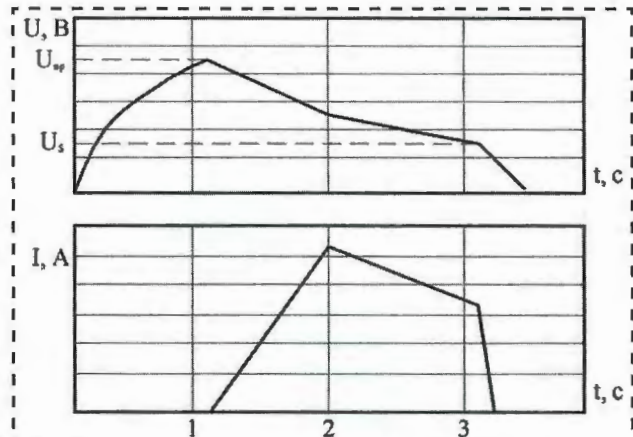


Рис. 2. Временные диаграммы изменения напряжения и тока в электродном промежутке

Величины энергии импульса

Режим ЭЭО	U_0 , В	I_k , А		$\tau_{и}$, мкс	
		Черновая обработка	Чистовая обработка	Черновая обработка	Чистовая обработка
Электроискровой	40—180	20—600	0,5—50	200—10 ⁵	5—200
Электроимпульсный	18—36				
Электроконтактная обработка в жидкости	18—40				
Электроконтактная обработка на воздухе	3—12				

ся в процессе обработки); $\tau_{и}$ — длительность импульсов (обратно пропорциональна частоте их следования), с.

В зависимости от технологических условий энергию импульса можно оценить по рекомендациям таблицы.

Исходя из теории теплопередачи, температуру в точке воздействия импульса определяют из выражения

$$T = \frac{T_0 + \theta \cdot \eta_{и} \cdot A_{и}}{(c \cdot \rho \cdot r^3)} K, \quad (2)$$

где T_0 — начальная температура электрода, К; $\eta_{и}$ — коэффициент полезного использования энергии импульса; θ — безразмерный параметр температуры, учитывающий термодинамические свойства электродов (теплопроводность, теплоемкость, плотность, условия обработки); c — удельная теплоемкость обрабатываемого электрода, Дж/(кг·К); ρ — плотность обрабатываемого электрода, кг/м; r — радиусы полусфер изотерм, характеризующих распределения температур от точки воздействия импульса энергии, м.

Из (2) определяем радиус полусферы выплавляемого металла

$$r = \sqrt[3]{\frac{\theta \cdot \eta_{и} \cdot A_{и}}{(T - T_0) \cdot c \cdot \rho}}. \quad (3)$$

Отсюда объем металла (в виде полусферы), удаляемого одним импульсом, находим из выражения

$$\alpha_{им} = \frac{0,5236}{2} \cdot D^3, \quad (4)$$

где объем сферы $0,5236 D^3$, $D = 2r$.

На практике число импульсов, выработанных генератором, и число импульсов, реализуемых в межэлектродном зазоре, отличаются

из-за реальных условий протекания процесса, что учитывается коэффициентом Ψ :

$$\Psi = \frac{f}{f_{г.и}}, \quad (5)$$

где f — частота импульсов, вызывающих эрозию, Гц; $f_{г.и}$ — частота импульсов, вырабатываемых генератором.

Реальное количество металла, удаляемого импульсом, будет

$$K = \Psi \alpha_{им}. \quad (6)$$

Производительность процесса ЭЭО находим из выражения

$$Q = \frac{K \cdot a_{им}}{q \cdot \tau_{им}}, \quad (7)$$

где q — скважность, отношение периода повторения импульсов к их длительности.

Время действия импульса, скважность и частота импульсов связаны зависимостью

$$\tau_{и} = \frac{1}{(qf)} c. \quad (8)$$

Скорость перемещения электрода-инструмента определяем из выражения

$$V_{ин} = \frac{Q}{S}, \quad (9)$$

где S — площадь обрабатываемой поверхности.

Основное время ЭЭО определяем по формуле

$$t_0 = \frac{h}{V_{ин}}, \quad (10)$$

где h — перемещение электрода-инструмента для снятия необходимого припуска.

Ожидаемую после ЭЭО шероховатость поверхности оцениваем по формуле

$$R_z = k_n A_n^p \text{ мкм}, \quad (11)$$

где k_n — коэффициент условий обработки (для черновых режимов $k_n = 10-50$, а для чистовых режимов $k_n = 2-10$); p — показатель степени, характеризующий форму лунки, образованной от воздействия импульса ($p = 0,3-0,04$).

На точность изготовления деталей после ЭЭО влияют: точность изготовления электрода-инструмента; износ инструмента; погрешность формы и размеров заготовки и т.д. На современном уровне ЭЭО точность достигает 6—7 квалитета.

Режимные параметры и основные технологические показатели ЭЭО можно определить на примере обработки глухого паза $50 \times 10 \times 10$, выполненной по 7-му квалитету, $R_a = 1,6$ мкм, в закаленной стальной высокоуглеродистой пластине в условиях серийного производства. ЭЭО предусматривает обработку в рабочей жидкости и использование широкодиапазонного генератора импульсов.

Указанные условия по точности и шероховатости поверхности могут быть выполнены при электроискровом режиме обработки с прямой полярностью включения электродов, со временем импульса $\tau_n = 5-200$ мкс, при частоте $f = (50-2) \cdot 10^3$ Гц. В качестве диэлектрической жидкости можно использовать пиронафт (керосин осветленный тяжелый). Но при подобном режиме производительность обработки будет незначительна. В условиях серийного производства наиболее целесообразно применение комбинированной обработки, а именно: предварительную черновую обработку произвести в более производительном электроимпульсном режиме, а окончательную чистовую обработку — в электроискровом режиме.

Для обеспечения комбинированной обработки необходимо изготовление двух видов инструментов-электродов: из металлографита по 10-му квалитету точности при $R_a = 6,3$ мкм и из меди по 6-му квалитету точности с $R_a = 0,8$ мкм, соответственно для черновой и чистовой обработок.

В конструкциях инструментов необходимо предусмотреть отверстия для прокачки рабо-

чей жидкости. Схемы черновой и чистовой обработки показаны на рис. 3.

Примем межоперационный припуск $z = 1$ мм.

В качестве рабочей жидкости используем масло индустриальное 20 (кинематическая вязкость 10^{-4} м²/с — при 30 °С, температура вспышки 170 °С). Согласно табл. 1 принимаем $I_{cp} = 500$ А; $U_{cp} = 30$ В; $f = 10^3$ Гц; $q = 1$.

По (1) определяем энергию импульса:

$$A_n = I_{cp} U_{cp} \tau_n = 30 \cdot 500 \cdot 10^{-3} = 15 \text{ Дж},$$

$$\text{где } \tau_n = \frac{1}{(qf)} = \frac{1}{1 \cdot 10^3} = 10^{-3} \text{ с.}$$

Находим радиус полусферы металла, выплаваемого одним импульсом, по зависимости (3):

$$\begin{aligned} r &= \sqrt[3]{\frac{\theta \cdot \eta_n \cdot A_n}{(T - T_0) \cdot c \cdot \rho}} = \\ &= \sqrt[3]{\frac{2,3 \cdot 10^{-4} \cdot 0,85 \cdot 15}{(1800 - 300) \cdot 0,426 \cdot 7,9 \cdot 10^{-3}}} = \\ &= 0,84 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0,084 \text{ мм}, \end{aligned}$$

где температура плавления стали $T = 1800$ К ($T = 273,15 + t$ °С); начальная температура заготовки $T_0 = 300$ К; безразмерный температурный параметр $\theta = 2,3 \cdot 10^{-4}$; коэффициент полезного использования энергии импульса $\eta_n = 0,85$; удельная теплоемкость заготовки $c = 0,426 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К); плотность заготовки $\rho = 7,9 \cdot 10^3$ кг/м³.

Определяем объем металла, удаляемого одним импульсом, по формуле (4):

$$(D = 2r = 2 \cdot 0,084 = 0,168 \text{ мм}).$$

$$\begin{aligned} \alpha_{им} &= \frac{0,5236}{2} \cdot D^3 = \frac{0,5236}{2} \cdot 0,168^3 = \\ &= 2,43 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3. \end{aligned}$$

Производительность ЭЭО определяем по формуле (7), принимая $\psi = 1$, $Q = \frac{k \cdot A_n}{q \cdot \tau_n} =$

$$= 2,43 \cdot 10^{-4} \cdot 15 \cdot 10^3 = 3,6 \text{ мм}^3/\text{с} = 216 \text{ мм}^3/\text{мин}.$$

Определим скорость перемещения электрода-инструмента по формуле (9) с учетом припусков под чистовую обработку:

$$V_{ин} = \frac{Q}{S} = \frac{216}{384} = 0,562 \text{ мм/мин},$$

$$\text{где } S = 48 \cdot 8 = 384 \text{ мм}^2.$$

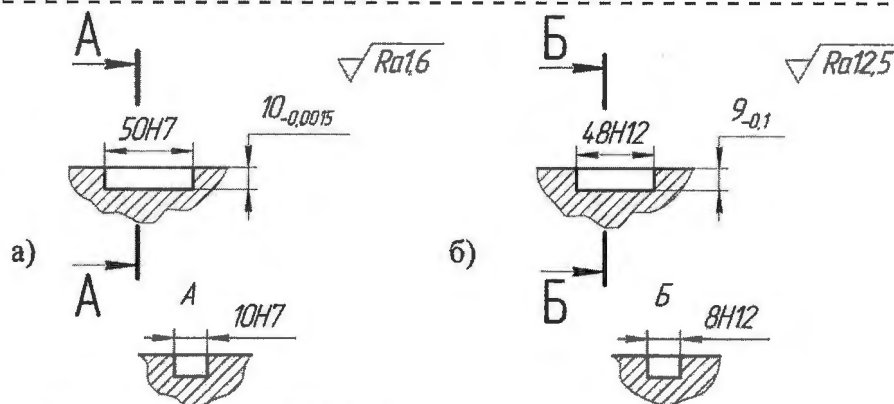


Рис. 3. Схемы обработки:
а — чистовая; б — черновая

Определим основное время черновой обработки по формуле (10):

$$t_0 = \frac{h}{V_{ин}} = \frac{9}{0,562} = 16,01 \text{ мин.}$$

Определим ожидаемую шероховатость поверхности после черновой обработки по формуле 11, принимая $p = 1/3$ и $k_n = 20$:

$$R_z = k_n A_n^p = 20 \sqrt[3]{15} = 20 \cdot 2,47 = 49,4 \text{ мкм,}$$

$$R_a \approx \frac{R_z}{4} \approx \frac{49,4}{4} \approx 12,3 \text{ мкм.}$$

При чистовой обработке в качестве рабочей жидкости принимаем пиронафт. Режимы работы — электроискровой, прямой.

Определим энергию импульса, обеспечивающего требуемое качество обработки поверхностей ($R_a = 1,6 \text{ мкм}$ или $R_z \approx 4 \cdot 1,6 = 6,4 \text{ мкм}$).

Из формулы (11) находим $A_n^p = \frac{R_z}{k_n}$, принимая

$p = 1/3$ и $k_n = 10$, что соответствует чистовой обработке. В результате получим:

$$A_n = \sqrt[3]{\frac{R_z}{k_n}} = \sqrt[3]{\frac{6,4}{10}} = 0,86 \text{ Дж.}$$

Ориентируясь на полученное значение $A_{н.т.}$ по рекомендациям, представленным в табл. 1, принимаем следующие электродинамические параметры: $I_{cp} = 50 \text{ А}$; $U_{cp} = 150 \text{ В}$; $\tau_{и} = 100 \cdot 10^{-6} \text{ с}$; $q = 2$.

Отсюда определяем реальное значение энергии импульса для чистовой обработки по формуле (1):

$$A_{и} = I_{cp} \cdot U_{cp} \cdot \tau_{и} = 150 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 0,75 \text{ Дж.}$$

Меньшее значение энергии импульса, по сравнению с требуемым значением, гарантирует получение необходимого качества поверхности обработки и незначительно уменьшит производительность процесса, поэтому в дальнейших расчетах будем ориентироваться на выбранные электродинамические параметры.

Находим радиус полусферы в заготовке, выплавляемой под воздействием одного импульса, по формуле (3):

$$(T - T_0 = 1500 \text{ К}; \theta = 2,3 \cdot 10^{-4}; \eta_{и} = 0,8; c = 0,426 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг·К)}; \rho = 7,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3),$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{\theta \cdot \eta_{и} \cdot A_{и}}{(T - T_0) \cdot c \cdot \rho}} = \sqrt[3]{\frac{2,3 \cdot 10^{-4} \cdot 0,8 \cdot 0,75}{1500 \cdot 0,426 \cdot 10^3 \cdot 7,9 \cdot 10^3}} = 0,301 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0,03 \text{ мм};$$

$$(D = 0,06 \text{ мм}).$$

Находим объем металла, удаляемого одним импульсом, по (4):

$$\alpha_{им} = \frac{0,5236}{2} \cdot D^3 = \frac{0,5236}{2} \cdot 0,06^3 = 56,548 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3.$$

Определяем объем металла, удаляемого суммарной энергией импульса, в 1 Дж (чтобы использовать (7), необходимо затратить энергию не менее 1 Дж).

$$\alpha_{им(1 \text{ Дж})} = \frac{1}{0,75} \alpha_{им} = \frac{1}{0,75} \cdot 56,548 \cdot 10^{-6} = 75,39 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3.$$

Определяем производительность чистового процесса ЭЭО по формуле (7) при $\psi = 1$.

$$Q = \frac{\alpha_{\text{им(1 Дж)}}}{q\tau_{\text{и}}} = \frac{75,39 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 0,3769 \text{ мм}^3/\text{с} = 22,617 \text{ мм}^3/\text{мин}.$$

Скорость перемещения электрода-инструмента, с учетом припусков под чистовую обработку, в зависимости от площади обработки распределится по двум уровням по формуле (9):

$$V_1 = \frac{Q}{S_1} = \frac{22,617}{116} = 0,1949 \text{ мм/мин};$$

$$\{S_1 = 2(50 \cdot 1) + 2(8 \cdot 1) = 116 \text{ мм}^2\};$$

$$V_2 = \frac{Q}{S_2} = \frac{22,617}{500} = 0,0452 \text{ мм/мин};$$

$$(S_2 = 50 \cdot 10 = 500 \text{ мм}^2).$$

Определяем основное время по двум уровням скорости (10):

$$t_{0,1} = \frac{h_1}{V_1} = \frac{9}{0,1949} = 46,17 \text{ мин};$$

$$t_{0,2} = \frac{h_2}{V_2} = \frac{1}{0,045} = 22,12 \text{ мин}.$$

Находим основное время чистовой обработки

$$t_0 = t_{0,1} + t_{0,2} = 46,17 + 22,12 = 68,29 \text{ мин}.$$

Таким образом, определены следующие параметры ЭЭО:

• для черновой обработки: электроимпульсный режим, масло индустриальное 20;

$I_{\text{ср}} = 500 \text{ А}; U_{\text{ср}} = 30 \text{ В}; f = 10^3 \text{ Гц}; q = 1; A_{\text{и}} = 15 \text{ Дж}; \tau_{\text{и}} = 10^{-3} \text{ с}; V_{\text{ин}} = 0,562 \text{ мм/мин}; t_0 = 16,01 \text{ мин}; Q = 216 \text{ мм}^3/\text{мин}; R_a = 12,3 \text{ мкм};$

• для чистовой обработки: электроискровой режим, прямой; диэлектрическая жидкость — пиронафт;

$I_{\text{ср}} = 50 \text{ А}; U_{\text{ср}} = 150 \text{ В}; \tau_{\text{и}} = 100 \cdot 10^{-6} \text{ с}; q = 2; A_{\text{и}} = 0,75 \text{ Дж}; R_a \leq 1,6 \text{ мкм}; V_1 = 0,195 \text{ мм/мин}; V_2 = 0,045 \text{ мм/мин}; t_0 = 68,29 \text{ м}.$

Список литературы

1. Артамонов Б.А. и др. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: учебное пособие в 2 т. М.: Высшая школа, 1983.
2. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Под ред. В.А. Волосатова. Л.: Машиностроение, 2000. 719 с.
3. Дальский А.М. Технология конструкционных материалов. М.: Машиностроение, 2002. 328 с.
4. Скрябин В.А., Зотов Е.В., Зинкин С.В. Электрофизические и электрохимические методы обработки: учебное пособие. Пенза: «Приволжский Дом знаний», 2015. 200 с.
5. Скрябин В.А. Внеканальное электролитическое осаждение металла при восстановлении деталей // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2018. № 1. С. 3—6.
6. Скрябин В.А. Технологические методы восстановления изношенных поверхностей деталей машин нанесением покрытий из хрома и сплава никель—хром // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2018. № 3. С. 3—8.
7. Скрябин В.А. Отделочные операции обработки деталей различных машин и механизмов. Часть 2 // Технология металлов. 2018. № 1. С. 2—5.
8. Скрябин В.А. Отделочные операции обработки деталей различных машин и механизмов. Часть 1 // Технология металлов. 2017. № 12. С. 11—18.