

УДК 621.922

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАДИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОВОЛОЧНОГО ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗАГОТОВКИ ПРИ ЕЕ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ОБРАБОТКЕ

М. Г. КИСЕЛЕВ, А. В. ДРОЗДОВ, С. Г. МОНИЧ, П. С. БОГДАН

*Учреждение образования «Белорусский национальный
технический университет», Республика Беларусь*

Введение

Для модификации исходной поверхности заготовки с целью придания ей требуемых эксплуатационных показателей авторами работ [1], [4], [6] предложено использовать электроконтактную обработку (ЭКО), выполняемую с помощью вращающегося проволочного электрода-инструмента. В этом случае он, периодически контактируя с обрабатываемой поверхностью, обеспечивает, с одной стороны, прерывание электрической цепи, вызывая электрическую эрозию ее материала, а с другой – механически воздействует на нее за время их контактного взаимодействия. Поэтому характер и геометрические параметры получаемого на обработанной поверхности микрорельефа определяются интенсивностью протекания этих двух процессов. Отсюда следует, что для решения технологических задач по целенаправленной модификации исходной поверхности заготовки необходимо располагать совокупностью данных, отражающих влияние на формируемый на ней микрорельеф параметров режима ЭКО, определяющих как интенсивность протекания процесса электрической эрозии, так и механического воздействия на нее проволочного электрода-инструмента. В связи с этим в первую очередь следует выявить и исследовать характерные стадии протекания процесса ЭКО при однократном взаимодействии проволочного электрода-инструмента с обрабатываемой поверхностью при различных условиях его реализации. Данное обстоятельство определило цель настоящей работы.

Методика проведения исследований

На рис. 1 представлена принципиальная схема установки. Она состоит из массивного основания 1, на котором смонтирована установочная призма 2, изготовленная из диэлектрического материала, в которой закреплен электродвигатель постоянного тока с встроенным редуктором 3 (МН-145А). На его валу неподвижно посажена насадка 4, в которой консольно закреплен проволочный электрод-инструмент 5, имеющий свободную длину L . Обрабатываемый образец 6 устанавливается на стойке 7 и с помощью сменных прокладок 8 обеспечивается требуемая величина натяга проволочного инструмента $\delta = L - h$, где h – наименьшее расстояние от обрабатываемой поверхности образца до точки закрепления проволоки на оправке.

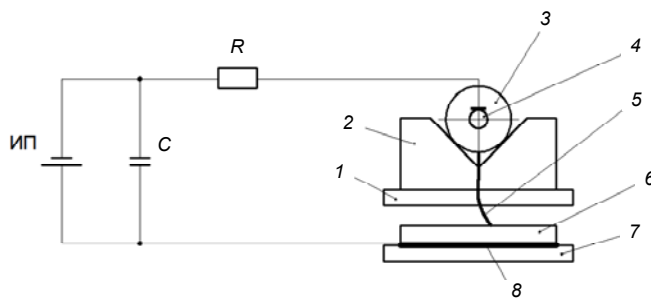


Рис. 1. Принципиальная схема установки

Проволочный электрод-инструмент и образец включены в электрическую цепь, состоящую из источника питания постоянного тока ИП, накопительного конденсатора C и токоограничивающего резистора R . Образец подключен к положительному полюсу источника питания (используется прямая полярность), а электрод-инструмент с помощью токосъемного устройства – к отрицательному полюсу ИП.

В ходе проведения экспериментов в качестве электрода-инструмента использовалась упругая стальная проволока диаметром 0,3, 0,8 и 1,2 мм. Титановый (BT1-0) образец, выполненный в виде цилиндра диаметром 30 и высотой 5 мм, имел отполированные торцевые поверхности, которые подвергались воздействию проволочного электрода-инструмента. В одной серии экспериментов это взаимодействие протекало на воздухе, а в другой – в присутствии дистиллированной воды, которая в виде капель наносилась на поверхность образца. Напряжение накопительного конденсатора емкостью 200 мкФ изменялось от 17 до 72 В. Частота вращения проволочного электрода-инструмента регулировалась в диапазоне 36–72 мин⁻¹.

Для выявления и последующего описания характерных стадий однократного электроконтактного взаимодействия проволочного электрода-инструмента с обрабатываемой поверхностью образца с помощью цифровой камеры Canon PowerShot SX230 HS была проведена видеосъемка этого процесса с частотой 240 кадров в секунду. В качестве примера на рис. 2 приведена раскадровка полученной видеосъемки с интервалом времени между кадрами, равном 0,04 с.

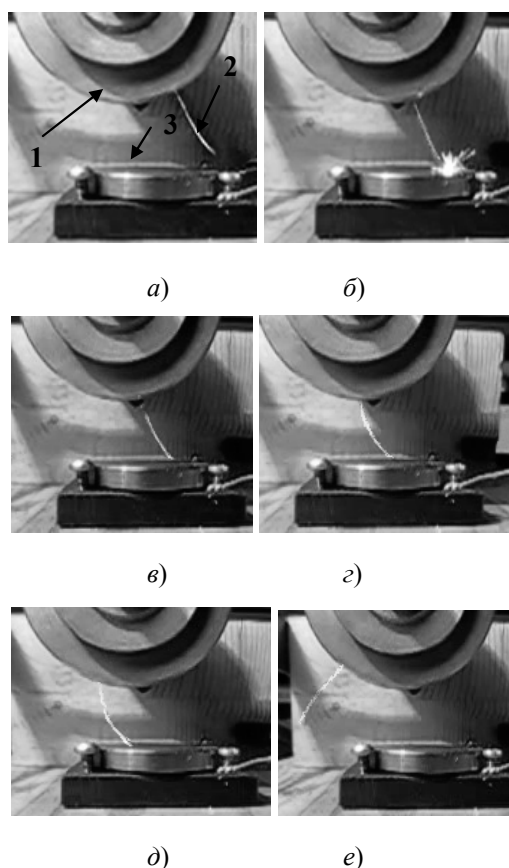


Рис. 2. Раскадровка видеосъемки электроконтактного взаимодействия проволочного электрода-инструмента с обрабатываемой поверхностью образца:
a – стадия сближения электрода-инструмента с обрабатываемой поверхностью образца; *1* – оправка; *2* – проволочный электрод-инструмент; *3* – обрабатываемая поверхность образца; *б* – пробой межэлектродного промежутка; *в* – начало фрикционной стадии; *г* – момент наибольшего натяга проволочного электрода-инструмента; *д* – окончание фрикционной стадии; *е* – отрыв проволочного электрода-инструмента от обрабатываемой поверхности образца и восстановление формы первого

На основании обобщенного анализа результатов этих исследований установлено, что процесс однократного взаимодействия проволочного электрода-инструмента с обрабатываемой поверхностью характеризуется последовательным протеканием следующих основных стадий, которые схематично показаны на рис. 3.

Вращающийся с частотой $N = 60 \text{ мин}^{-1}$ проволочный электрод-инструмент 1 находится в положении, при котором отсутствует как электрический, так и механический его контакт с обрабатываемой поверхностью образца 2 (рис. 3, а). По мере последующего сближения торцевой поверхности инструмента с поверхностью образца наступает момент, когда расстояние между ними S_{min} становится равным величине минимального межэлектродного промежутка (МЭП), при которой происходит его электрической пробой (рис. 3, б). В результате электрической эрозии происходит разрушение поверхностей образца и электрода-инструмента, причем во всех случаях эта стадия предшествует наступлению механического контакта между ними, с которым связано протекание следующей стадии их взаимодействия (рис. 3, в). Ее начало характеризуется косым ударом торцевой части вращающегося проволочного инструмента об обрабатываемую поверхность, в результате которого осуществляется механическое воздействие инструмента на металл образца, подвергнутого электрической эрозии на предыдущей стадии. Дальнейшее поведение системы «инструмент–заготовка» характеризуется относительным скольжением их поверхностей, т. е. стадией их фрикционного взаимодействия, которая включает в себя две фазы.

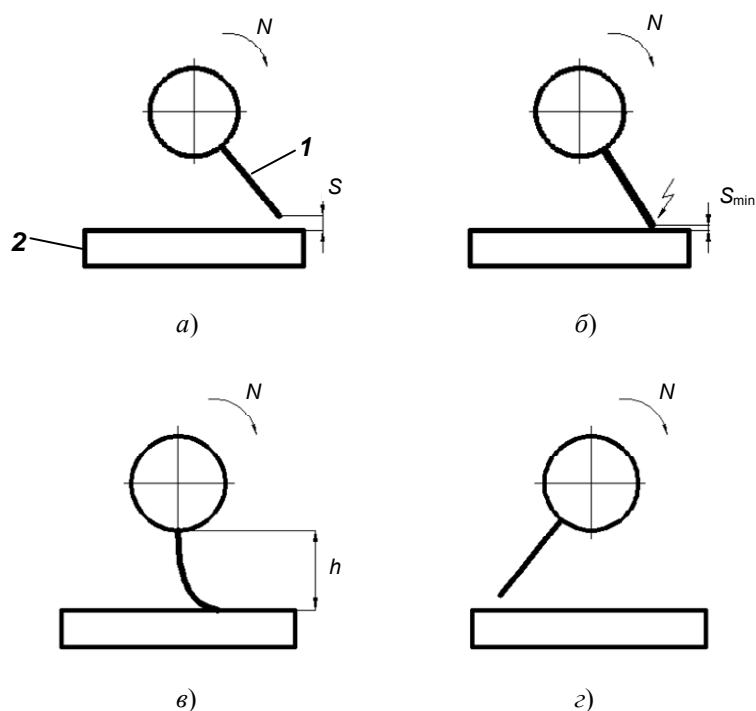


Рис. 3. Схемы протекания стадий однократного электроконтактного взаимодействия проволочного электрода-инструмента с поверхностью обрабатываемого образца

Первая, на которой за счет возрастания упругой деформации изгиба проволочного инструмента (его натяга) усилие, действующее в зоне скользящего контакта, увеличивается, достигая максимума при $\delta = L - h$. При дальнейшем повороте проволочного инструмента его упругая деформация изгиба уменьшается, что соответствует фазе снижения усилия, действующего в зоне фрикционного контакта, которое становится равным нулю в момент нарушения механического контакта проволочного инструмента с поверхностью образца и восстановлением его исходной формы (рис. 3, г).

Для определения продолжительности протекания указанных стадий использовался осциллограф GW Instek GDS-71062, включенный параллельно контактирующим поверхностям инструмента и образца. Продолжительность стадии электрической эрозии t_3 , которая протекает до наступления механического контакта между ними, определялась по осциллограммам изменения напряжения за время их однократного взаимодействия (рис. 4, а). Наличие и продолжительность механического контактирования проволочного электрода-инструмента с поверхностью образца t_M определялись при напряжении между ними менее 1 В, что исключало наличие стадии электрической эрозии (рис. 4, б). Общая продолжительность однократного электроконтактного взаимодействия проволочного электрода-инструмента с поверхностью образца t_0 вычислялась как сумма t_3 и t_M .

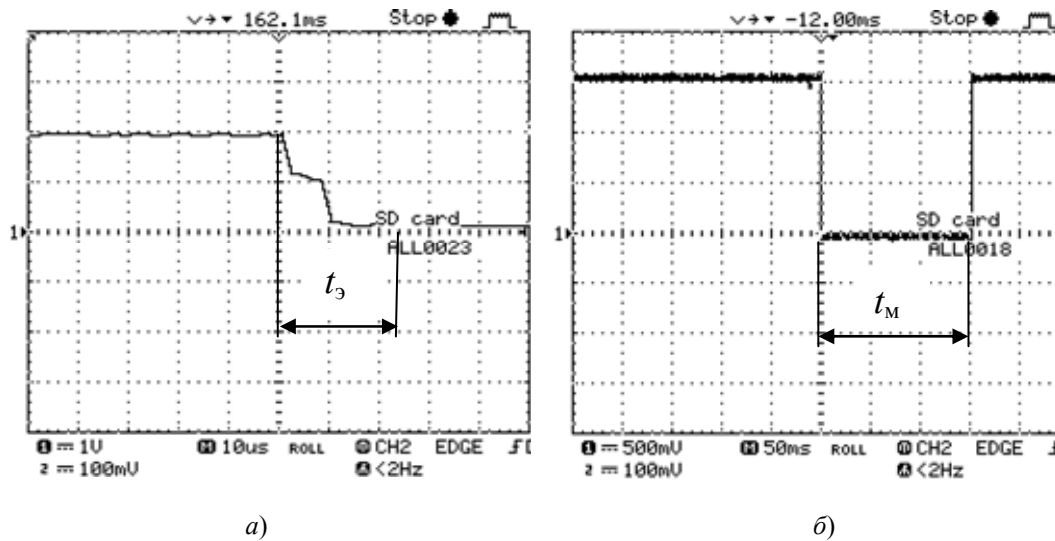


Рис. 4. Осциллограмма изменения напряжения за время однократного взаимодействия инструмента с образцом:
 а – осциллограмма электрической эрозии;
 б – осциллограмма контактного взаимодействия

В таблице приведены экспериментально полученные величины t_0 , t_3 , t_M при различных значениях напряжения накопительного конденсатора U , частоты вращения проволочного электрода-инструмента N и величины его натяга δ .

Временные характеристики контактного взаимодействия

Частота, об/мин	Натяг, мм	Напряжение, В	
		18	72
36	3	$t_M = 150$ мс	$t_M = 150$ мс
		$t_3 = 0,025$ мс	$t_3 = 0,025$ мс
	$t_0 = 150,025$ мс	$t_0 = 150,025$ мс	
	6	$t_M = 280$ мс	$t_M = 280$ мс
		$t_3 = 0,020$ мс	$t_3 = 0,020$ мс
	$t_0 = 280,020$ мс	$t_0 = 280,020$ мс	
9	$t_M = 300$ мс	$t_M = 300$ мс	
	$t_3 = 0,020$ мс	$t_3 = 0,020$ мс	
$t_0 = 300,020$ мс	$t_0 = 300,020$ мс		

Частота, об/мин	Натяг, мм	Напряжение, В	
		18	72
72	3	$t_M = 75 \text{ мс}$ $t_3 = 0,025 \text{ мс}$	$t_M = 75 \text{ мс}$ $t_3 = 0,025 \text{ мс}$
		$t_0 = 75,025 \text{ мс}$	$t_0 = 75,025 \text{ мс}$
	6	$t_M = 145 \text{ мс}$ $t_3 = 0,025 \text{ мс}$	$t_M = 145 \text{ мс}$ $t_3 = 0,025 \text{ мс}$
		$t_0 = 145,025 \text{ мс}$	$t_0 = 145,025 \text{ мс}$
	9	$t_M = 150 \text{ мс}$ $t_3 = 0,020 \text{ мс}$	$t_M = 150 \text{ мс}$ $t_3 = 0,020 \text{ мс}$
		$t_0 = 150,020 \text{ мс}$	$t_0 = 150,020 \text{ мс}$

Как видно из таблицы, общая продолжительность однократного электроконтактного взаимодействия проволочного электрода-инструмента с обрабатываемой поверхностью образца уменьшается с повышением частоты его вращения и возрастает с увеличением его натяга. Причем эти изменения t_0 обусловлены соответствующими изменениями продолжительности стадии механического взаимодействия поверхностей t_M при практически неизменной продолжительности электроконтактной стадии t_3 . Следует подчеркнуть, что повышение напряжения накопительного конденсатора с 18 до 72 В не вызывает изменения значения t_3 .

Таким образом, за время однократного электроконтактного взаимодействия проволочного электрода-инструмента с обрабатываемой поверхностью удаление с нее металла и формирование на ней нового микрорельефа происходит в результате последовательного действия электрической эрозии и механического воздействия инструмента. Очевидно, что влияние каждого из этих процессов на условия удаления металла с обрабатываемой поверхности, а соответственно, и на характер формируемого на ней микрорельефа зависит от соотношения параметров режима ЭКО, определяющих, с одной стороны, интенсивность протекания электрической эрозии, а с другой – интенсивность механического воздействия на нее проволочного инструмента. К числу параметров ЭКО, влияющих на интенсивность электроэрозионного разрушения поверхности заготовки [2], [3], [7]–[10], относятся напряжение накопительного конденсатора U , его емкость C , величина тока I и длительность импульса $T_{и}$, с увеличением которых она возрастает. На интенсивность механического воздействия доминирующее влияние оказывают жесткость проволочного инструмента Y , зависящая от его материала, термообработки, диаметра d и свободной длины L , величина натяга δ , форма и геометрия торцевой поверхности, а также ее окружная скорость V . Следовательно, за счет изменения параметров режима ЭКО, ответственных за интенсивность электроэрозионного и механического воздействий, можно соответствующим образом влиять на величину и характер разрушения обрабатываемой поверхности, а в итоге на параметры получаемого на ней микрорельефа.

Для подтверждения данного положения с помощью микроскопа МК-3 были получены фотографии следов обработки (рис. 5), образовавшихся на полированной поверхности титанового образца при однократном взаимодействии на нее проволочным электродом-инструментом различного диаметра и при различном значении напряжения на накопительном конденсаторе.

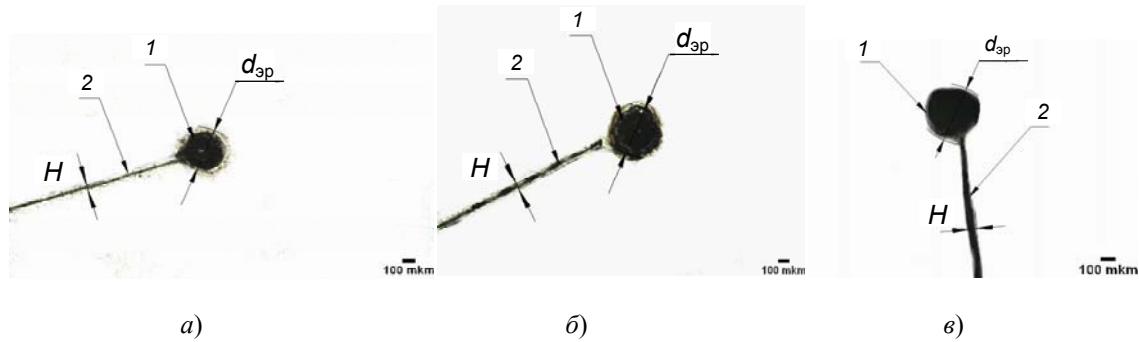


Рис. 5. Фотографии следов обработки при использовании проволочного электрода-инструмента с диаметром:
a – 0,3 мм при $U = 18$ В; *б* – 0,3 мм при $U = 72$ В; *в* – 1,2 мм при $U = 72$ В

Из представленных фотографий видно, что формируемый на поверхности образца след имеет две принципиально отличных части. Первая – головная часть следа *1* имеет форму окружности диаметром d_3 и является результатом удаления металла за счет электрической эрозии, а вторая – хвостовая часть *2* имеет форму канавки шириной H , которая формируется в результате механического воздействия на поверхность образца проволочного электрода-инструмента. Измерения d_3 и H показали, что с увеличением значения напряжения накопительного конденсатора ($d_{пр} = 0,3$ мм) с 18 до 72 В увеличивается d_3 с 314 до 358 мкм, при этом величина H остается постоянной и составляет 26 мкм (рис. 5, *a*, *б*). С увеличением диаметра проволочного электрода-инструмента с 0,3 до 1,2 мм ($U = 72$ В) значение параметра H возрастает с 25 до 75 мкм, а диаметр головной части следа остается практически неизменным $d_3 = 360$ мкм (рис. 5, *б*, *в*).

Установленные закономерности объясняются следующим образом. С повышением напряжения накопительного конденсатора U возрастает энергия импульса, а соответственно, и количество металла, удаленного с поверхности образца за время его протекания, что сопровождается увеличением головной части следа d_3 . С увеличением диаметра проволочного электрода-инструмента $d_{пр}$ повышается его жесткость, а следовательно, и уровень его силового воздействия на поверхность образца, вызывая тем самым возрастание ширины хвостовой части H . Следует подчеркнуть, что в этом случае механизм механического воздействия проволочного электрода-инструмента на обрабатываемую поверхность образца аналогичен иглофрезерованию [7].

Заключение

1. Создана экспериментальная установка, позволяющая осуществлять электроконтактную обработку поверхности металлического образца вращающимся проволочным электродом-инструментом с варьированием напряжения накопительного конденсатора, диаметра инструмента, частоты его вращения и величины натяга.

2. С помощью цифровой камеры Canon PowerShot SX230 HS проведена видеосъемка (240 кадров в секунду) процесса однократного электроконтактного взаимодействия вращающегося проволочного электрода-инструмента с поверхностью образца, по результатам которой определены и описаны характерные стадии его протекания. Установлено, что первой является стадия электрического пробоя межэлектродного промежутка между торцевой поверхностью образца, в результате чего происходит их электроэрозионное разрушение. В момент наступления механического контакта наступает стадия их ударно-фрикционного взаимодействия, в течение которой проволочный инструмент оказывает механическое воздействие на поверхность образца и которая заканчивается в момент разрыва контакта между ними.

3. С использованием осциллографа GW Instek GDS-71062, включенного параллельно контактирующим поверхностям, получены экспериментальные данные, отражающие влияние напряжения накопительного конденсатора U , частоты вращения проволочного электрода-инструмента N и величины его натяга δ на продолжительность однократного электроконтактного взаимодействия проволочного электрода-инструмента с поверхностью образца t_0 , включая продолжительность стадии электроэрозии t_3 и стадии их механического взаимодействия t_m . Установлено, что с увеличением N и снижением δ значение t_0 уменьшается, это происходит за счет сокращения стадии механического взаимодействия поверхностей t_m , в то время как продолжительность электроэрозионной стадии t_3 во всех случаях остается практически постоянной.

С помощью микроскопа МК-3 исследованы форма и геометрические параметры следов обработки, полученных на полированной поверхности титанового образца при однократном электроконтактном воздействии на нее проволочным электродом-инструментом при различных условиях его протекания. Установлено, что получаемый след включает в себя две принципиально отличных части. Первая – головная часть следа имеет форму, близкую к окружности диаметром d_3 и является результатом удаления металла за счет электрической эрозии, а вторая – хвостовая часть следа имеет форму канавки шириной H , которая формируется в результате механического воздействия проволочного электрода-инструмента на поверхность образца. Показано, что за счет варьирования параметров режима электроконтактного воздействия можно целенаправленно влиять на условия формирования следов обработки. В частности, повышение напряжения накопительного конденсатора с 18 до 72 В влечет за собой увеличение диаметра d_3 с 314 до 358 мкм, при неизменной величине $H = 26$ мкм ($d_{пр} = 0,3$ мм; $\delta = 3$ мм). С увеличением диаметра проволочного электрода-инструмента (его жесткости) с 0,3 до 1,2 мм ($U = 18$ В) ширина канавки H возросла с 25 до 75 мкм, а диаметр головной части следа практически не изменился.

На основании результатов проведенных исследований установлено, что применение электроконтактной обработки проволочным электродом-инструментом позволяет за счет изменения электрических (напряжение накопительного конденсатора, его емкость) и механических (жесткость проволочного электрода-инструмента, частота его вращения и величина натяга) параметров режима обработки целенаправленно влиять на форму и геометрию следов, формируемых на обрабатываемой поверхности, а следовательно на ее микрогеометрию, что свидетельствует о перспективности ее использования для управляемой модификации исходной поверхности заготовок с целью придания ей требуемых эксплуатационных показателей.

Литература

1. Киселев, М. Г. Применение электроконтактной виброударной обработки для модификации образцов титановых имплантатов / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, В. А. Борисов // Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка : сб. докл. междунар. симпозиума. – Минск, 2011. – С. 53–57.
2. Исследование электрических разрядов в газах и жидкостях с целью создания новых технологических процессов обработки материалов / И. И. Сафронов [и др.] // Отчет НПФ АН МССР. – 1980. – Т. 1. – № 77075429.
3. Лазаренко, Б. Р. Динамическая теория выброса материала электрода коротким электрическим импульсом и закономерности образования ударных кратеров / Б. Р. Лазаренко, Д. И. Городецкий, К. Я. Краснолоб // Электрон. обработка материалов. – 1969. – № 2. – С. 18–23.

4. Киселев, М. Г. Влияние электроконтактной обработки с ультразвуком на параметры поверхностей титановых имплантов / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, В. А. Борисов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2011. – С. 129–136.
5. Влияние технологических режимов механизированного электроискрового легирования на качество получаемой поверхности / Ю. Н. Петров // Электрон. обработка материалов. – 1965. – № 3. – С. 45–49.
6. Теоретическое обоснование рациональных параметров режима электроконтактной обработки проволочного инструмента / М. Г. Киселев [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2012. – № 3. – С. 3–10.
7. Баршай, И. Л. Формирование качества поверхности и эксплуатационных характеристик деталей при иглофрезеровании и комбинированной обработке иглофрезерованием и поверхностным пластическим деформированием : монография / И. Л. Баршай, В. К. Шелег, Е. Э. Фельдштейн. – Минск : БНТУ, 2009. – 231 с.
8. Соколов, И. А. Механизация процесса электроискрового легирования / И. А. Соколов // Электрон. обработка материалов. – 1975. – № 1. – С. 33–34.
9. Технологические возможности применения вращающихся электродов-инструментов для ЭИЛ / В. И. Андреев [и др.] // Электрон. обработка материалов. – 1990. – № 2. – С. 85–87.
10. Снежков, В. А. Современное состояние и перспективы развития метода электроэрозионного упрочнения / В. А. Снежков, В. И. Ливурдов, А. А. Беликов // Электронная обработка материалов. – 1994. – № 6. – С. 19–21.

Получено 08.01.2013 г.