

С.А. Оглезнева, К.А. Мазуренко

S.A. Oglezneva, K.A. Mazurenko

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МЕДЬ-УГЛЕРОДНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

STUDY OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES AND WEAR RESISTANCE OF COPPER-CARBON ELECTROTECHNICAL MATERIALS

Рассмотрена сущность процесса электроэрозионной обработки и основные требования, предъявляемые к электродам-инструментам. Представлены классические материалы для электроэрозионной обработки, их свойства. Описано физико-химическое взаимодействие в системе медь – графит, характеристики и свойства порошков ПМС-1, ПМВД-0, графита и углеродного наноматериала «Таунит». Изложены методики эксперимента и исследований. Изучено влияния состава конструкционных материалов на пористость, прочность, электросопротивление, относительную износостойкость ЭИ.

The essence of the process of electrical discharge machining and basic requirements for the tool electrode are investigated. Presented classic materials for electrical discharge machining, their properties. Described physical and chemical interaction in the copper – graphite, characteristics and properties of powders ПМС-1, ПМВД-0, graphite and carbon nanomaterial Taunit. Sets out methods of experiment and research. Studied the impact of composite material on porosity, strength, electrical receptivity, relative wear resistance of tool electrode.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, система медь – углеродные фазы, графит, нанопорошки, материалы электродов-инструментов, пористость, прочность, электросопротивление, износостойкость.

Keywords: electrical discharge machining, system copper – carbon phase, graphite, nanopowders, materials tool electrode, porosity, strength, electrical receptivity, relative wear resistance.

Современные тенденции развития машино- и приборостроения связаны с расширением использования прогрессивных технологических процессов и применением жаропрочных, тугоплавких, сверхтвердых и других труднообрабатываемых материалов, что вызывает большой интерес к технологиче-

ским процессам и оборудованию для электроэрозионной обработки. Электроэрозионная обработка (ЭЭО) основана на эффекте расплавления и испарения микропорций материала, в основном под тепловым воздействием импульсов электрической энергии. Эта энергия выделяется в канале разряда между поверхностью обрабатываемой детали и электродом-инструментом, погруженным в жидкую (обычную неэлектропроводящую) среду. Следующие друг за другом импульсные разряды производят выплавление и испарение микропорции материала; частицы расплавленного материала выбрасываются из зоны обработки развивающимся в канале разряда давлением, и электрод-инструмент получает возможность внедряться в обрабатываемую деталь [1].

Электроды-инструменты (ЭИ) являются одними из основных элементов, участвующих в электроэрозионном процессе. Их параметры оказывают существенное влияние на стабильность электроэрозионного процесса, его эффективность и область использования. Производительность и качество ЭЭО также находится в зависимости от материала ЭИ. Электрод-инструмент должен изготавливаться из эрозионно-стойкого материала, обеспечивать стабильную работу во всем диапазоне рабочих режимов ЭЭО и максимальную производительность при малом износе. Количество тепловой энергии, выделяющейся на каждом из электродов при импульсном электрическом разряде, неодинаково; также различно и количество снимаемого материала с поверхности каждого из электродов.

Масса расплавленного и удаленного с электрода материала зависит от ряда факторов: это теплофизические свойства материалов, из которых изготовлены электроды (температура кипения, плавления, теплопроводность и теплостойкость); параметры рабочего импульса; полярность подключенных электродов. Электрическая эрозия будет менее интенсивной у материалов, обладающих высокими температурами плавления, и наоборот [2]. Одним из путей снижения износа электрода-инструмента является использование материалов, имеющих высокую эрозионную стойкость. Если расположить известные материалы, используемые для изготовления электродов-инструментов, в порядке возрастания их эрозионной стойкости, то перечень будет выглядеть так: алюминий и его сплавы, серый чугун, латунь, медь, вольфрам, графитированные материалы [3].

Электроды-инструменты из меди дают возможность запускать ЭЭО на самых производительных режимах, обеспечивают наиболее стабильное течение процесса. Медь позволяет высокоточно изготовить электрод практически любой сложной формы и профиля на металлообрабатывающем оборудовании [4].

Электроды-инструменты из графита, углеграфитового, графитизированного материала широко используются при ЭЭО благодаря высокой электроэрозионной стойкости, хорошей обрабатываемости и низкой стоимости. По стабильности процесса электроды несколько уступают медным, особенно на чистовых режимах обработки. Ограничение применения графитизирован-

ного материала диктуется главным образом его сравнительно низкой механической прочностью, что не позволяет получать механообработкой сложно-профильные тонкостенные конструкции ЭИ [4].

При обработке твердых сплавов и тугоплавких материалов на основе вольфрама, молибдена и ряда других материалов широко применяют ЭИ из композиционных материалов, так как при использовании графитовых ЭИ не обеспечивается высокая производительность из-за низкой стабильности электроэрозионного процесса, а ЭИ из меди имеют большой износ, достигающий десятка процентов, и высокую стоимость [2]. Композиционные материалы системы медь – вольфрам имеют очень высокую стойкость, чаще применяются для исполнения сложных работ, однако имеют повышенную стоимость.

Существующие электродные материалы, применяемые в промышленности, уже не удовлетворяют в полной мере предъявляемым к ним требованиям. В ряде случаев дальнейшее развитие электроэрозионного метода обработки сдерживается недостаточной износостойкостью или дороговизной и сложностью изготовления электродов-инструментов. Например, эрозионный износ ЭИ, изготовленных из меди, латуни, чугуна, может быть в 10–100 раз выше, чем объем снятого металла с детали, что значительно снижает эффективность или делает даже нецелесообразным применение метода электроэрозионной обработки. Разработка новых технологических процессов создания эрозионно-стойких материалов, обладающих низкой стоимостью, представляет собой весьма важную задачу и имеет большое экономическое значение. Известны материалы, применяемые для изготовления электродов-инструментов станков электроэрозионной обработки на основе меди с различными добавками, повышающими стойкость к электрической эрозии, так как медь обладает хорошими электротехническими и прочностными свойствами

Цель работы – разработка материалов электродов-инструментов системы медь – углеродные фазы для электроэрозионной обработки.

Методики эксперимента и исследований. Для изготовления электродов из композиционных материалов использованы порошки меди ПМС-1 (ГОСТ 49-60–75), ультрадисперсный медный порошок ПМВД-0, полученный методом газофазной конденсации по ТУ 1790-040-12288779–2005 (табл. 1), препарат сухого коллоидального графита марки С-1 (ТУ 113-08-48-63–90), материал углеродный наноструктурный «Таунит МД» (далее – таунит) (ТУ 2166-001-02069289–2007). Углеродный наноматериал таунит представляет собой одномерные наномасштабные нитевидные образования поликристаллического графита, преимущественно цилиндрической формы, с внутренним каналом – многослойные нанотрубки. Он имеет вид полидисперсного сыпучего порошка черного цвета, размер гранул 1–300 мкм, гидрофобен, не слеживается, малотоксичен.

Таблица 1

Характеристики порошков меди

Порошок	Гранулометрический состав, мкм	Содержание кислорода, %	Химический состав, %	Насыпная плотность, г/см ³
Электролитический ПМС-1	< 100–99,5 % < 71–90 % < 45–65 (80) %	Не более 0,2	Cu > 99,5 Fe < 0,18 Sb < 0,005 Pb < 0,05	1,25–1,9
Газофазно осажденный ПМВД-0	Менее 0,150	Более 5	Cu > 99,96	0,1

Параметры используемого материала «Таунит МД»:

Наружный диаметр, нм	8–15
Внутренний диаметр, нм	4–8
Длина, мкм	2 и более
Массовое содержание минеральных примесей, %	2–3
Насыпная плотность, г/см ³	0,03–0,05
Удельная геометрическая поверхность, м ² /г	300–320 и более
Термостабильность на воздухе, °С	до 600

Углеродные наноматериалы (УНМ) обладают рядом уникальных свойств, обусловленных упорядоченной структурой их нанофрагментов: хорошая электропроводность и адсорбционные свойства, способность к холодной эмиссии электронов и аккумулярованию газов, диамагнитные свойства, химическая и термическая стабильность, большая прочность в сочетании с высокими значениями упругой деформации.

Углеродные наноматериалы могут быть использованы для производства прочных и электропроводящих композиционных материалов. Благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам даже небольшие добавки УНМ в различные материалы могут значительно улучшить их механические и электрические характеристики.

В то же время получение медно-графитовых композитов затруднено рядом причин. Во-первых, с углеродом медь не реагирует даже при высоких температурах [5]. В системе медь – графит практически отсутствует смачивание [6]. Оно происходит только в тех случаях, когда металл достаточно интенсивно вступает в химическую реакцию с углеродом. Во-вторых, непреходные металлы, в том числе медь, химически инертные по отношению к углероду, образуют на поверхности углеграфита тупые краевые углы ($\theta > 90^\circ$). Известно, что краевой угол жидкой меди на поверхности углеграфита при температуре 1100 °С равен 140°, из-за чего медь не смачивает углеграфит и не проникает в него [5].

Углерод с медью не взаимодействует, медь в углероде не растворяется (как и углерод в меди). Значения краевого угла смачивания графита расплавленной медью в вакууме при температуре 1373 К составляет 157°, при 1423 К – 170° [7].

Порошки меди смешивали с порошками графита или таунита в смесителе со смещенной осью вращения в течение 4 ч. Из смесей на прессе П-125 прессовали образцы размером 6×6×50 мм при давлении 600 МПа, затем образцы на основе электролитического порошка меди отжигали в вакууме при температуре 700 °С, на основе ПМВД – в водороде при температуре 380 °С и проводили повторное прессование при 600 МПа. Прессовки окончательно спекали в вакуумной печи при температуре 1100 °С, 2 ч (на основе ПМС-1) и при 900 °С, 2 ч (на основе ПМВД). Плотность композиционных материалов определяли на образцах размером 6×6×50 мм расчетным методом по стандартной методике (ГОСТ 18898–89). Твердость спеченных образцов измеряли с помощью пресса Бринелля в соответствии с ГОСТ 9012–59. Использовали индентор с диаметром 5 мм, нагрузку 750 кг, выдержка под нагрузкой 30 с. Испытания на прочность при трехточечном изгибе образцов 6×6×50 мм без трещины производили на машине FP 10/1 по ГОСТ 18227–85 со скоростью нагружения 2 мм/мин, расстояние между опорами 40 мм. Электросопротивление измеряли на цифровом программируемом миллиметре GOM-802 на образцах размером 6×6×50 мм. Рассчитывали удельное электросопротивление проводника R , Ом:

$$R = \rho l / S,$$

где ρ – удельное электросопротивление, Ом·м; l – длина проводника, м; S – площадь поперечного сечения проводника, мм².

Испытания эксплуатационных свойств электродов проводили при электроэрозионной прошивке листа стали X12Ф толщиной 5,5 мм с твердостью 58 HRC на станке Electronica Smart CNC на черновых режимах обработки E81 (длительность импульса 100 мкс, пауза 32 мкс, сила тока 15 А) и E93 (длительность импульса 150 мкс, пауза 32 мкс, сила тока 20 А). Относительный износ электрода определяли по отношению глубины прошитого в стали отверстия к линейному износу электрода [8].

Результаты исследования. Пористость композиционных материалов до спекания составляла 10–18 %.

После окончательного спекания пористость уменьшилась в среднем на 3 %. В системе ПМС-1 + графит пористость образцов с содержанием углеродной фазы 1 и 5 % уменьшилась на 2 %. Незначительные изменения в пористости в сторону уменьшения произошли у образца с содержанием углеродной фазы 0,1 %. В системе ПМВД – таунит пористость образца с содер-

жанием углеродной фазы 0,1 % увеличилась на 3 %. Образец с содержанием углеродной фазы 0,3 % уменьшил свою пористость на 5 %. Для меди ПМС-1 по полученным данным пористость уменьшилась на 2 % (табл. 2).

Таблица 2

Пористость композиционных материалов

Система	Содержание углеродной фазы, мас. %	Пористость	
		до спекания, %	после спекания, %
ПМС-1 + графит	0,1	14	14
	1	13	11
	5	12	10
ПМВД + таунит	0,1	10	13
	0,3	30	25
ПМС-1	–	15	13

При анализе влияния углеродных фаз можно сделать вывод, что при увеличении объема таунита увеличивается пористость (рис. 1), так как ввиду высокой удельной поверхности наноматериала существенно сокращается площадь металлического контакта и ухудшаются условия сращивания частиц при спекании; чем меньше была концентрация таунита, тем меньше была пористость (0,1 % – пористость 13 %, 0,3 % – пористость 25 %). При добавлении коллоидального графита к электролитическому порошку пористость незначительно снижается с увеличением его содержания. При исследовании образцов на прочность наблюдается, что при увеличении объема тугоплавкой фазы прочность образцов понижается (рис. 2) ввиду формирования слабого межчастичного контакта. Однако прочность спеченной электролитической меди по абсолютному значению меньше, чем при добавлении к ней 0,1 % графита. Возможно, что при прессовании меди с добавками графита, действующего как твердая смазка, в прессовке была достигнута более высокая плотность (см. табл. 2), а небольшое количество графита не оказало существенного влияния на ослабление межчастичных контактов.

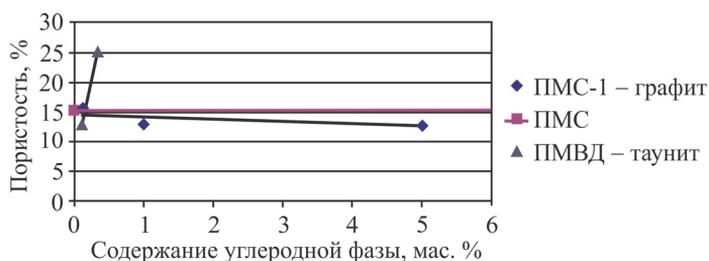


Рис. 1. Пористость композиционных материалов систем медь – углеродные фазы в зависимости от содержания углеродной добавки

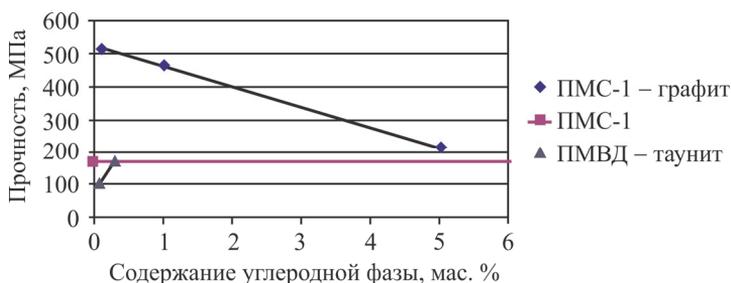


Рис. 2. Предел прочности при изгибе композиционных материалов систем медь – углеродные фазы в зависимости от содержания углеродной добавки

Анализ полученных результатов показал, что при увеличении объема углеродных фаз твердость образцов мало отличается от твердости меди, так как графит не обладает высокой твердостью и химического взаимодействия не происходит.

При исследовании влияния образцов на электросопротивление наблюдается незначительное повышение электросопротивления при увеличении объема коллоидального графита до 5 %, возможно, связанное с выгоранием некоторого количества углерода и образованием дополнительной пористости, ухудшающей свойства проводимости по сравнению с медью (рис. 3). Добавление таунита способствовало увеличению удельного электросопротивления композиционного материала ввиду высокой остаточной пористости.

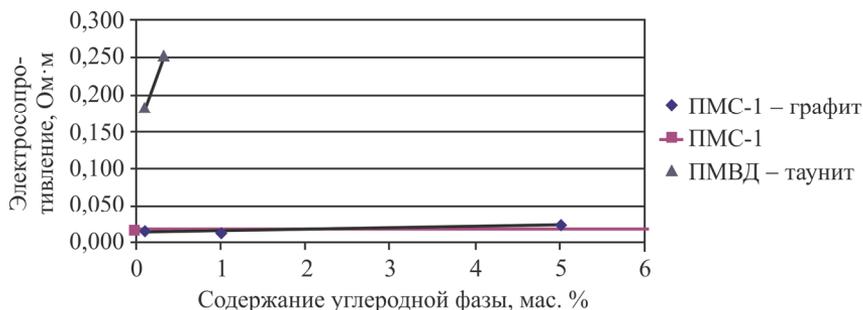


Рис. 3. Удельное электросопротивление композиционных материалов систем медь – углеродные фазы в зависимости от содержания углеродной добавки

Относительный износ ЭИ из спеченного порошка чистой меди был больше в 15 раз, чем в композиционных материалах (табл. 3, рис. 4, 5). В системе медь – графит улучшение эксплуатационных свойств достигнуто за счет низкого электросопротивления композиционных материалов даже с достаточно высокой пористостью П (до 13 %), самое низкое значение относитель-

ного износа наблюдалось при пористости 3 %. Кроме того, улучшение свойств обусловлено формированием трехмерной сетки из тугоплавкой фазы с меньшим размером ячейки (капилляра) за счет более высокой дисперсности частиц тугоплавкой фазы – графита.

Таблица 3

Относительный износ электрода при различных режимах

Номер образца	Тугоплавкая фаза	Тугоплавкая фаза, мас. %	П, %	ρ , Ом·м	Относительный износ электрода, %	
					E81	E92
911	Графит	0,1	12,5	0,015	0,72	3,6
921	Графит	1	3,4	0,013	0,36	3,7
931	Графит	5	10	0,021	0,72	2,0
1011	ПМС-1	–	16	–	18,2	–
1	Таунит	0,1	13	0,021	2,9	9,4
3	Таунит	0,3	25	0,017	8,5	–
*Медь М1		–	0	0,0175	5,60	6,90

* Данные для сравнения.

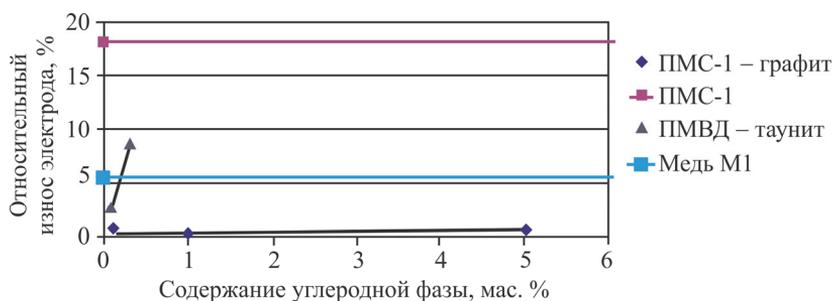


Рис. 4. Относительный износ композиционных материалов систем медь – углеродные фазы в зависимости от содержания углеродной добавки при ЭЭО в режиме E81

Относительный износ электрода из литой меди М1 на этих же режимах обработки E81и E92 составил соответственно 5,6 и 6,9 %. Износ спеченной меди выше в 3 раза из-за высокой пористости. ЭИ, содержащие графит и таунит, обладают износостойкостью в 2–5 раз большей, чем литая медь.

При исследовании производительности ЭИ установлено, что наилучшими показателями обладает электрод системы ПМС-1 – графит, так как к черновым режимам обработки предъявляются требования высокой скорости обработки при повышенной стойкости электрода, и наилучшие эксплуатационные свойства (относительный износ намного меньше) по сравнению с ПМС-1

и ПМВД – таунит при данном режиме обработки показал электрод системы медь – графит, который обладал более низкой пористостью (рис. 6, 7).

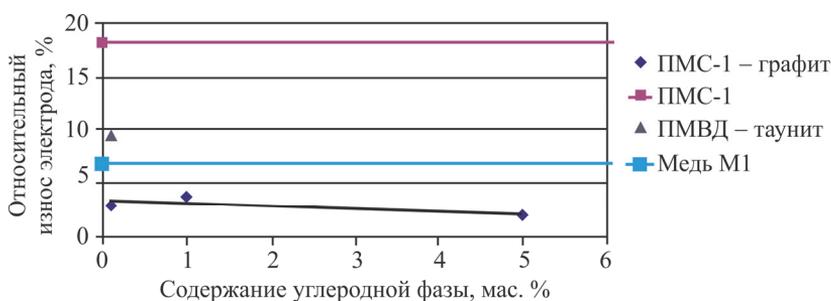


Рис. 5. Относительный износ композиционных материалов систем медь – углеродные фазы в зависимости от содержания углеродной добавки при ЭЭО в режиме E92

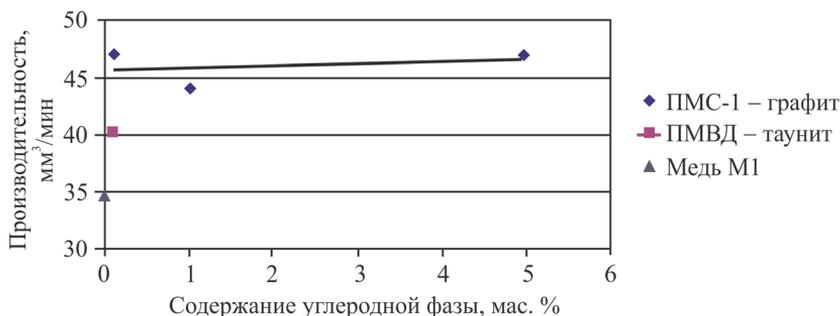


Рис. 6. Производительность от содержания углеродной фазы в ЭЭО режиме E81

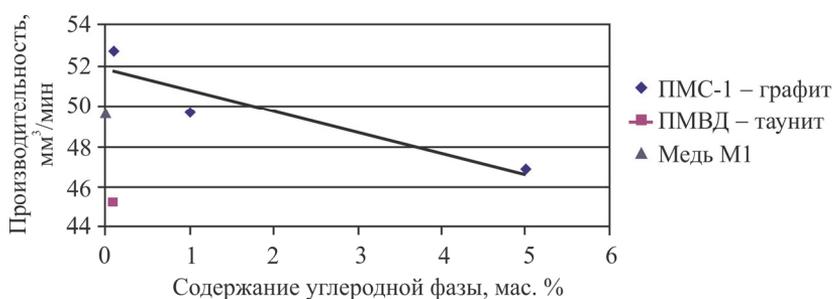


Рис. 7. Производительность в зависимости от содержания углеродной фазы в ЭЭО режиме E92

Производительность электрода из меди в этих режимах составила 34,7 и 49,7 мм³/мин, что сравнимо с производительностью при ЭЭО в режиме E92 и несколько меньше, чем в режиме E81.

Таким образом, установлено, что при увеличении объема таунита увеличивается пористость композиционного материала. При добавлении коллоидального графита к электролитическому порошку пористость незначительно снижается с увеличением его содержания.

При исследовании образцов на прочность наблюдали понижение прочности образцов при увеличении объема тугоплавкой фазы. Небольшое количество графита не оказало существенного влияния на ослабление межчастичных контактов.

Коллоидальный графит не влияет на электросопротивление. При добавлении таунита увеличивалось удельное электросопротивление композиционного материала ввиду высокой остаточной пористости.

В системе медь – графит улучшение эксплуатационных свойств достигнуто за счет низкого электросопротивления композиционных материалов даже с достаточно высокой пористостью (до 13 %), самое низкое значение относительного износа наблюдалось при пористости 3 %. Кроме того, улучшение свойств обусловлено формированием трехмерной сетки из тугоплавкой фазы с меньшим размером ячейки (капилляра) за счет более высокой дисперсности частиц тугоплавкой фазы – графита.

Список литературы

1. Иванайский А.В., Свириденко Д.С., Рябцева А.В. Применение электроэрозионной обработки при производстве деталей машин // Технология машиностроения. – 2013. – № 2. – С. 18–20.
2. Немилев Е.Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов. – М.: Машиностроение. 1989. – 146 с.
3. Чернышев К.А. Пути снижения износа электрода-инструмента при электроэрозионной обработке // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 7. – С. 233–233.
4. Серебренницкий П.П. Современные электроэрозионные технологии и оборудование: учеб. пособие. – 2-е изд., доп. и перераб. – СПб.: Лань, 2013. – 352 с.
5. Белов С.В. Пористые металлы в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
6. Гершман И.С., Гершман Е.И., Тюрнин П.Г. Уменьшение краевого угла смачивания углерода медью в графито-медных токосъемных материалах // Вестн. науч.-исслед. ин-та железнодорож. транспорта. – 2013. – № 2. – С. 21–27.

7. Композиционные материалы: справочник / под ред. Д.М. Карпиноса. – Киев: Наукова думка, 1985. – 588 с.

8. Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки. – М.: Машиностроение, 1980. – 184 с.

Получено 7.10.2014

Оглезнева Светлана Аркадьевна – доктор технических наук, профессор, ПНИПУ, МТФ, e-mail: osa@pm.pstu.ac.ru.

Мазуренко Кристина Анатольевна – магистрант, ПНИПУ, МТФ, гр. ТЛП-14м, e-mail: christinalove-mazurenko@ya.ru.