

УДК 621.7-4

М.Г. КИСЕЛЕВ, д-р техн. наук; А.В. ДРОЗДОВ, канд. техн. наук;  
С.Г. МОНИЧ, А.В. МОСКАЛЕНКО, П.С. БОГДАН

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЛУНКИ НА ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОДНОКРАТНОМ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

*Статья посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию процесса формирования лунки на обрабатываемой поверхности при однократном электроконтактном воздействии. С использованием математической модели образования ударных кратеров получено уравнение, позволяющее рассчитать траекторию максимальных выбросов жидкого металла из лунки с учетом его теплофизических характеристик и энергии единичного электрического разряда. Представлены результаты его численного исследования, отражающие влияние энергии электрического разряда и условий его протекания на геометрические параметры получаемой на стальной и титановой поверхности лунки. Приведено описание методики проведения экспериментальных исследований, по результатам которых подтверждена достоверность предложенной математической модели процесса формирования лунки на металлической поверхности при однократном электроконтактном воздействии.*

**Ключевые слова:** электроконтактная обработка, электрический разряд, математическая модель, электрическая эрозия, лунка

**Введение.** Электроконтактная обработка (ЭКО) представляет собой разновидность электроэрозионной, в основе которой лежит явление электрической эрозии — направленного разрушения токопроводящих материалов за счет их расплавления и испарения под действием кратковременных тепловых импульсов, возникающих при протекании в промежутке между поверхностями инструмента и заготовки электрических разрядов. В результате однократного такого воздействия на обрабатываемой поверхности образуется лунка, по форме близкая к сферической, имеющая по краям характерные наплывы застывшего металла.

Вместе с тем, в процессах размерной электроэрозионной обработки, когда основным технологическим показателем является интенсивность удаления припуска, наличие таких наплывов металла на обрабатываемой поверхности не учитывается, а при расчете производительности выполнения операции оценивается объем сферической лунки, имеющей глубину  $h$  и диаметр  $d$ , которые определяются от уровня исходной поверхности (рисунок 1 а) [1, 5, 6, 8].

Согласно результатам проведенных в последнее время исследований, электроконтактную обработку можно эффективно использовать для модификации исходной поверхности изделий различного назначения с целью повышения ее эксплуатационных показателей. В частности, это придание проволочному (непрофилированному) инструменту режущей способности за счет ЭКО его исходной поверхности [2, 7], повышение прочностных характеристик соединения моди-

фицированной с помощью ЭКО поверхности металлического имплантата с имитатором костной ткани, полученного с использованием фиксирующего материала [3, 9, 10].

Следует подчеркнуть, что в этих случаях на уровень эксплуатационных показателей модифицированной поверхности существенное влияние оказывают, помимо глубины  $h$  и диаметра  $d$  лунки, параметры образовавшихся по ее краям наплывов металла (см. рисунок 1 б), в частности, их форма, высота  $\Delta H$  и диаметр  $d_H$ . Так на модифицированной поверхности проволочного инструмента они выполняют роль своеобразных конструктивных элементов, придающих ей режущую способность, а параметры этих наплывов (их форма и размеры) также существенно влияют на условия взаимодействия модифицированной поверхности металлического имплантата с биологическими жидкостями и тканями в процессе его интеграции в организме человека.

Отсюда следует, что для успешного решения практических задач по целенаправленной модификации поверхности, обеспечивающей высокий уровень ее эксплуатационных показателей, необходимо располагать данными, отражающими

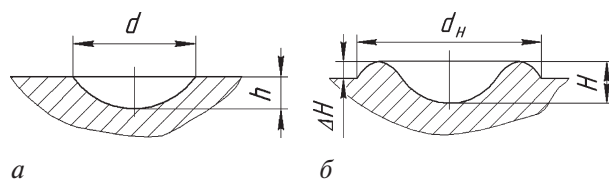


Рисунок 1 — Форма поперечного сечения лунки без учета наплывов металла по ее краям (а) и при их наличии (б)

ми влияние условий и режимов электроконтактной обработки на параметры получаемых на ней лунок с учетом образующихся по их краям наплывов металла.

Теоретическому и экспериментальному исследованию процесса формирования лунки на металлической поверхности при однократном электроконтактном воздействии посвящена данная работа, целью которой является установление зависимости между геометрическими параметрами получаемой лунки, имеющей по краям наплывы металла, и режимами обработки.

**Теоретическое описание процесса формирования лунки при однократном электроэрозионном воздействии.** Объем лунки без учета наплывов металла (см. рисунок 1 а) соответствует объему шарового сегмента, который вычисляется по формуле

$$V = \pi \cdot H^2 \cdot \left( r - \frac{1}{3} \cdot H \right), \quad (1)$$

где  $r = \frac{d}{2}$  — радиус лунки.

Для образования лунки с таким объемом необходимо воздействие электрического импульса с количеством энергии  $E$ , которое определяется

$$E = \frac{C \cdot U^2}{2}, \quad (2)$$

где  $C$  — емкость накопительного конденсатора в разрядной цепи;  $U$  — напряжение на нем.

Допустив, что формирование лунки происходит за счет испарения металла, рассчитаем необходимую для этого энергию  $Q$ :

$$Q = L \cdot \rho \cdot V, \quad (3)$$

где  $L$  — удельная теплота испарения металла;  $\rho$  — его плотность.

Тогда, с учетом выражений (1)–(3), радиус образующей лунки определяется:

$$r = \frac{C \cdot U^2}{2\pi \cdot \rho \cdot L \cdot h^2} + \frac{h}{3}. \quad (4)$$

Учитывая, что выделение энергии в промежутке между поверхностями инструмента и заготовки происходит за очень короткое время, протекающие при формировании лунки процессы оправдано рассматривать аналогично процессам, происходящим при взрыве. Тогда, для описания исследуемого процесса воспользуемся результатами работы [4], посвященной изучению механизма образования ударных кратеров на Земле и планетах.

Согласно принятой ее авторами модели, материал выбрасывается из лунки по траекториям, описываемым уравнением

$$S = r_e \cdot (1 - \cos(k \cdot \theta))^{\frac{1}{Z-2}}, \quad (5)$$

где  $S$  и  $\theta$  — координаты произвольной точки, фиксирующей данную траекторию;  $k$  — коэффициент, зависящий от энергии взрыва;  $Z$  — показатель сте-

пени, определяемый экспериментально в зависимости от условий обработки ( $Z = 0,75$  — при проведении ЭКО в воздушной среде и  $Z = 0,9$  — при проведении ЭКО в водной среде).

Применительно к нашему случаю параметр  $r_e$  представляет собой радиус лунки, т. е.  $r_e = r$ , который вычисляется по выражению (4). С учетом этого, с помощью уравнения (5) ( $k = 0,75$  для энергии  $E = 0,5$  Дж,  $k = 0,9$  при  $E = 2,0$  Дж и  $k = 1,3$  при  $E = 4,5$  Дж, а  $Z = 0,75$  — при проведении ЭКО в воздушной среде и  $Z = 0,9$  — при проведении ЭКО в водной среде) были рассчитаны траектории максимальных выбросов жидкого металла из лунки при различных значениях энергии накопительного конденсатора. На рисунке 2 представлены соответствующие этим траекториям профили сечения лунок, полученных на стальной поверхности при однократном электроконтактном воздействии на воздухе. Пунктирными линиями показан исходный уровень поверхности. Аналогичные данные были получены при однократном электроконтактном воздействии на титановую поверхность.

Из анализа представленных данных следует, что с увеличением энергии накопительного конденсатора с  $E = 0,5$  до  $4,5$  Дж глубина лунки относительно исходного уровня поверхности  $h$  возрастает от 12 до 40 мкм (кривые 1–3 и пунктирные линии 1'–3' соответственно). Это сопровождается увеличением высоты наплывов  $\Delta H$  от 15 до 55 мкм, диаметра лунки  $d$  от 270 до 520 мкм и диаметра окружности сопряжения наплыва с исходной поверхностью  $d_H$  от 300 до 715 мкм.

Полученные в результате численного исследования уравнения (5) данные позволяют также оценить влияние энергии электрического разряда на соотношение между количеством выброшенного из лунки расплавленного металла и его испарившимся количеством. Для этого воспользуемся отноше-

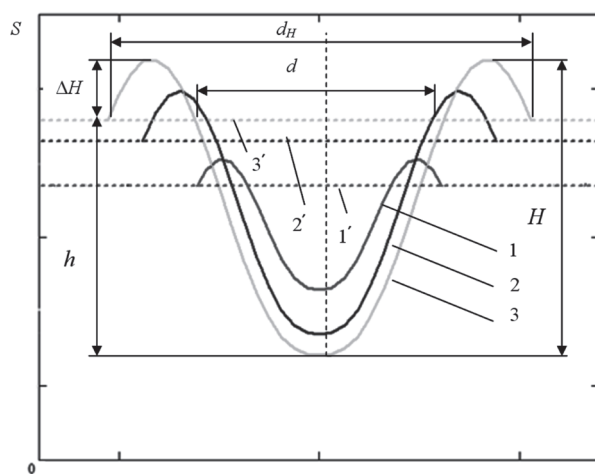


Рисунок 2 — Рассчитанные профили сечения лунок, образовавшихся на стальной поверхности в результате однократного акта на ЭКО на воздухе при различных значениях запасенной на накопительном конденсаторе энергии: 1 — 0,5 Дж; 2 — 2,5 Дж; 3 — 4,5 Дж (1', 2' и 3' — соответствующие указанным значениям энергии положения исходной поверхности)

нием объема металла в образовавшихся наплывах  $V_H$  к объему лунки  $V_L$ , определяемому по выражению (1), т. е. высота и радиус которой соответствуют уровню исходной поверхности. С достаточной для инженерных расчетов точностью представим форму поперечного сечения наплыва металла по краю лунки в виде половины тора, объем которой вычисляется по формуле:

$$V_H = \frac{\pi^2}{8} \cdot d \cdot \Delta H \cdot (d + d_H).$$

Обозначим отношение  $V_H / V_L$  через коэффициент  $k_H$ , который характеризует количество металла, перешедшего в наплыв в процессе формирования лунки при однократном электроэрозионном воздействии. Чем он выше, тем больше размер образовавшихся наплывов, а соответственно, тем меньше количество испарившегося при этом металла.

На рисунке 3 представлена диаграмма зависимости рассчитанных значений коэффициента  $k_H$  от энергии электрического разряда при обработке титана и стали.

Из приведенных данных следует, что наибольшее значение коэффициент  $k_H$  (0,5 для стали и 0,44 для титана) имеет место при наименьшем значении электрического разряда ( $E = 0,5$  Дж). По мере его увеличения значение  $k_H$  снижается, достигая при  $E = 4,5$  Дж 0,28 для стали и 0,3 для титана. Это свидетельствует о том, что с повышением энергии электрического разряда процесс формирования лунки сопровождается уменьшением количества металла, перешедшего в наплывы, и возрастанием количества испарившегося.

Таким образом, на основании результатов проведенных исследований теоретически обосновано, что путем изменения энергии электрического разряда за счет соответствующего изменения емкости накопительного конденсатора и напряжения на нем, можно управлять параметрами получаемой на металлической поверхности лунки, в частности, ее диаметром и глубиной, а также высотой и шириной образовавшихся по ее краям наплывов металла.

**Методика выполнения экспериментальных исследований и их результаты.** Цель их проведения

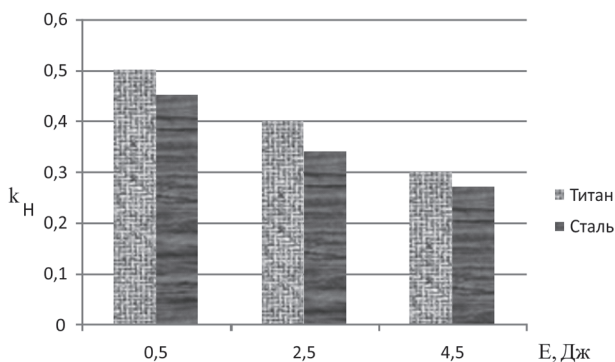


Рисунок 3 — Диаграмма зависимости значения коэффициента  $k_H$  от энергии электрического разряда при обработке титана и стали

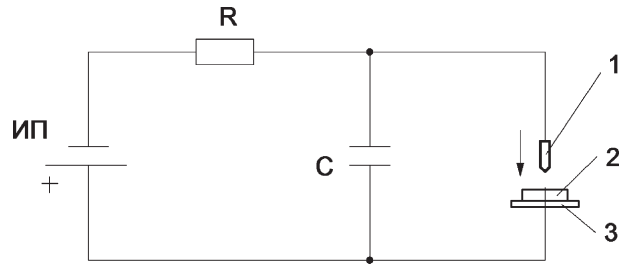


Рисунок 4 — Схема ЭКО поверхности металлического образца

заклучалась в подтверждении результатов теоретических исследований процесса формирования лунки при однократном электроконтактном воздействии. Эксперименты по получению на поверхности образцов лунок при таком воздействии проводились с помощью установки, схема которой приведена на рисунке 4.

Инструмент 1 и образец 2 через электроизоляционную прокладку 3 включены в электрическую цепь, состоящую из источника постоянного тока ИП, накопительного конденсатора  $C$  и токоограничивающего резистора  $R$ . Образцы в форме диска изготавливались из стали 12Х18Н10Т и титанового сплава ВТ1-0, а их торцевые (обрабатываемые) поверхности тщательно полировались. Инструмент представлял собой стальной стержень с остро заточенным концом и имел возможность вертикального перемещения вниз. В процессе его сближения с поверхностью образца на расстоянии, соответствующем электрическому пробое среды, происходил разряд накопительного конденсатора, в результате чего на поверхности образца образовывалась лунка с характерным наплывом металла по ее краям. В ходе проведения экспериментов за счет изменения напряжения на накопительном конденсаторе (емкостью 400 мкФ) с 50 до 150 В изменялась энергия однократного электрического разряда с 0,5 до 4,5 Дж.

В одной серии экспериментов обработка осуществлялась на воздухе, а в другой — с использованием диэлектрической жидкости (дистиллированная вода), которая в виде капель наносилась на поверхность образца в зоне образования лунки.

После завершения экспериментов на данном образце, он снимался, его обработанная поверхность очищалась с помощью мягкой ветоши, смоченной в ацетоне, и высушивалась. Затем с помощью цифрового микроскопа МКИ-2 проводилось фотографирование сформированных на ней лунок и с помощью полученных снимков измерялись диаметр раскрытия лунки  $d$  и диаметр наплывов металла вокруг нее  $d_H$ , как показано на рисунке 5. За окончательное значение этих параметров принималось среднее арифметическое результатов измерения диаметров в двух взаимоперпендикулярных направлениях. Для измерения глубины лунки относительно исходного уровня поверхности  $H$  и высоты наплывов  $\Delta H$  использовалась методика, основанная на получении слепков.

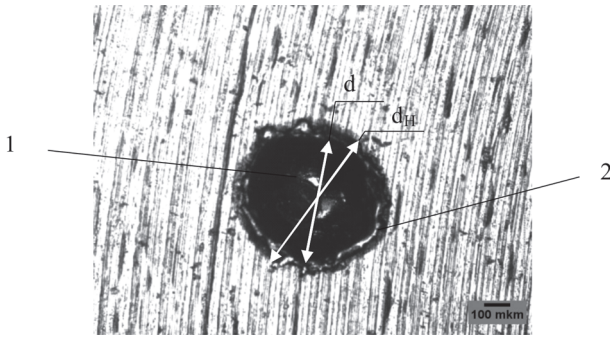


Рисунок 5 — Фотография лунки 1 на поверхности образца с наплывами металла 2 по ее краям

Для этого на поверхность образца с исследуемой лункой наносился слой протакрила, который нагружался грузом 500 г с плоской поверхностью, что обеспечивало формирование плоской базовой поверхности у получаемого слепка. После отверждения протакрила, слепок отделялся от образца и своей плоской базовой поверхностью фиксировался на плоской поверхности концевой меры длины. Затем с помощью вертикального длинномера ИЗВ-6 измерялись глубина  $H$  и высота наплывов  $\Delta H$ .

В таблице 1 приведены результаты экспериментальных исследований, отражающие влияние энергии однократного электрического разряда и условий его протекания на геометрические параметры получаемых на поверхности образцов лунок.

Как показывает анализ полученных экспериментальных данных, во всех случаях с повышением энергии электрического разряда геометрические параметры получаемых лунок увеличиваются, включая диаметр и высоту наплывов металла, что полностью согласуется с результатами теоретических исследований.

При прочих равных условиях лунки, полученные на поверхности стального образца, имеют большие значения геометрических параметров, по сравнению с лунками на титановом образце, что согласно предложенной математической модели их формирование обусловлено более низким значением удельной теплоты испарения нержавеющей стали.

По сравнению с обработкой на воздухе применение дистиллированной воды во всех случаях приводит к уменьшению значения геометрических параметров лунок, что объясняется дополни-

Таблица 1 — Геометрические параметры лунок, полученных на поверхности образцов при различных значениях энергии электрического разряда и условиях обработки

Материал образца	Условия обработки	Энергия электрического разряда, Дж											
		0,5				2,0				4,5			
		$D$ , мкм	$d$ , мкм	$\Delta H$ , мкм	$H$ , мкм	$D$ , мкм	$d$ , мкм	$\Delta H$ , мкм	$H$ , мкм	$D$ , мкм	$d$ , мкм	$\Delta H$ , мкм	$H$ , мкм
Сталь 12Х18Н10Т	на воздухе	583	571	20	35	1100	628	43	65	1440	1095	62	81
	с применением дист. воды	548	510	18	29	1029	897	35	62	1325	951	55	74
Титановый сплав ВТ1-0	на воздухе	542	503	18	32	1019	605	52	62	1252	980	54	70
	с применением дист. воды	501	438	14	28	791	586	41	56	1148	925	50	67

Таблица 2 — Величины объемов лунок  $V_L$  и наплывов металла  $V_H$ , полученных на поверхности образцов, а также значения коэффициента  $k_H$  при различной энергии единичного разряда и условий его протекания

Материал образца	Условия обработки	Энергия электрического разряда, Дж								
		0,5			2,0			4,5		
		$V_L$ , $10^4 \cdot \text{мкм}^3$	$V_H$ , $10^4 \cdot \text{мкм}^3$	$k_H$	$V_L$ , $10^4 \cdot \text{мкм}^3$	$V_H$ , $10^4 \cdot \text{мкм}^3$	$k_H$	$V_L$ , $10^4 \cdot \text{мкм}^3$	$V_H$ , $10^4 \cdot \text{мкм}^3$	$k_H$
Сталь 12Х18Н10Т	на воздухе	4,6	2,3	0,5	23,3	8,5	0,4	40,7	13,2	0,3
	с применением дист. воды	4,2	2,1	0,5	21,5	7,2	0,3	34,8	12,0	0,3
Титановый сплав ВТ1-0	на воздухе	3,6	2,2	0,6	20,0	7,7	0,3	32,5	9,8	0,3
	с применением дист. воды	3,3	2,0	0,6	19,1	6,5	0,3	28,4	9,2	0,3



тельными затратами энергии электрического разряда на ее испарение.

В таблице 2 приведены рассчитанные по экспериментальным данным величины объемов лунок и наплывов металла, полученных на поверхности образцов, а также значения коэффициента  $k_H$  при различной энергии единичного разряда и условий его протекания.

При анализе приведенных данных следует обратить внимание на то обстоятельство, что во всех случаях с повышением энергии единичного разряда с 0,5 до 2,0 Дж значение коэффициента  $k_H$  снижается, т. е. количество металла, перешедшего в наплывы, уменьшается за счет возрастания доли испарившегося металла, так, например, для образцов из стали 12Х18Н10Т при проведении ЭКО в воздушной среде с увеличением энергии накопительного конденсатора от 0,5 до 2,0 Дж объем лунки  $V_L$  увеличивается от  $4,6 \cdot 10^4$  до  $23,3 \cdot 10^4$  мкм<sup>3</sup>, объем наплывов увеличивается от  $2,3 \cdot 10^4$  до  $7,2 \cdot 10^4$  мкм<sup>3</sup>, что приводит к уменьшению коэффициента  $k_H$  от 0,5 до 0,3. Отметим, что аналогичный вывод был сделан по результатам теоретических исследований влияния энергии единичного разряда на значение коэффициента  $k_H$ . При дальнейшем повышении энергии единичного разряда с 2,0 до 4,5 Дж значение коэффициента  $k_H$  практически не изменяется.

#### Выводы.

1. Показано, что на уровень эксплуатационных показателей поверхности, модифицированной путем ее электроконтактной обработки, существенное влияние, наряду с размерами полученных на ней за счет электрической эрозии лунок, оказывают параметры образовавшихся по их краям наплывов металла в результате выброса из них в жидком состоянии и последующем затвердевании.

2. Показано, что протекающие при формировании лунки процессы по характеру выделения во времени электрической энергии оправдано рассматривать аналогично процессам, протекающим при взрыве, в частности, при образовании ударных кратеров на Земле и планетах. С использованием математической модели процесса образования таких кратеров, получено уравнение, позволяющее рассчитать траекторию максимальных выбросов жидкого металла из лунки с учетом энергии электрического разряда и теплофизических характеристик металла поверхности.

3. По результатам численного исследования полученного уравнения установлено, что с повышением энергии разряда глубина лунки, ее диаметр, а также диаметр наплывов металла и их высота увеличиваются и тем больше, чем меньше его удельная теплота испарения. При этом возрастает количество испарившегося металла по сравнению с количеством расплавленного металла, о чем свидетельствует уменьше-

ние отношения объема металла в наплывах к объему образовавшейся лунки.

4. Разработана методика проведения экспериментов по определению параметров лунок, получаемых на полированной металлической поверхности при однократном электроконтактном воздействии с различной энергией разряда, позволяющая с помощью дополнительно полученного из протакрила слепка лунки, измерять ее диаметр  $d$  и глубину  $H$ , а также диаметр  $d_H$  и высоту наплывов металла  $\Delta H$ .

5. На основании сравнения полученных экспериментальных данных и результатов теоретических исследований установлено, что предложенная математическая модель с достаточной адекватностью для инженерных расчетов точно описывает процесс формирования лунки на металлической поверхности при однократном электроконтактном воздействии. В частности, установлено, что во всех случаях с повышением энергии единичного разряда с 0,5 до 4,5 Дж геометрические параметры полученной лунки (ее диаметр и глубина, диаметр наплыва металла и его высота) увеличиваются, при этом их численные значения отличаются от теоретически рассчитанных не более чем на 10–15 %. Также экспериментально показано, что при прочих условиях указанные параметры лунок, полученных на стальной поверхности, имеют большие размеры, чем на поверхности образца из титана, у которого по сравнению со сталью, удельная теплота испарения, входящая в знаменатель полученного уравнения, имеет большее значение. Нашло экспериментальное подтверждение сформулированное на основе результатов теоретических исследований положение о том, что с повышением энергии единичного разряда, отношение объема металла, перешедшего в наплывы, к объему испарившегося в процессе формирования лунки уменьшается, т. е. значение коэффициента  $k_H$  снижается. Установлено, что по сравнению с обработкой на воздухе при менении дистиллированной воды в качестве диэлектрической жидкости во всех случаях приводит к уменьшению геометрических параметров лунки, что обусловлено дополнительными затратами энергии разряда на ее испарение.

#### Список литературы

1. Фотеев, Н.К. Технология электроэрозионной обработки / Н.К. Фотеев. — М.: Машиностроение, 1980. — 184 с., ил.
2. Влияние способа выполнения электроконтактной обработки исходной поверхности проволочного инструмента на его режущую способность / М.Г. Киселев [и др.] // Материалы, технологии, инструменты. — 2012. — Т. 17, № 4. — С. 83–88.
3. Киселев, М.Г. Методика и аппаратные средства определения прочностных характеристик соединения поверхностей имплантата и имитатора костной ткани, полученного с использованием фиксирующего материала / М.Г. Киселев, А.В. Дроздов, С.Г. Мониц // Метрология приборостроения. — 2013. — № 2. — С. 11–15.

4. Иванов, Б.А. Механизмы образования ударных кратеров на Земле и планетах: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 04.00.22 / Б.А. Иванов. — М., 2000. — 235 с.
5. Андреев, В.И. Технологические возможности применения вращающихся электродов-инструментов для ЭИЛ / В.И. Андреев [и др.] // Электронная обработка материалов. — Кишинев. — 1990. — № 2. — С. 85–87.
6. Снежков, В.А. Современное состояние и перспективы развития метода электроэрозионного упрочнения / В.А. Снежков, В.И. Ливурдов, А.А. Беликов // Электронная обработка материалов. — Кишинев. — 1994. — № 6. — С. 19–21.
7. Theisen, W. Electro discharge machining of nickel-titanium shape memory alloys / W. Theisen, A. Schuermann // J. Materials science and engineering. — 2004. — № 378. — Pp. 200–204.
8. Surface modification process by electrical discharge machining with a Ti powder green compact electrode / Z. Wang [et al.] // J. of materials processing technology. — 2002. — № 129. — Pp. 139–142.
9. Metal surface modification by electrical discharge machining with composite electrode / N. Mohri [et al.] // J. Annals of the CIRP. — 1993. — № 42(1). — Pp. 219–222.
10. Kumar, S. Surface modification by electrical discharge machining: A review / S. Kumar [et al.] // J. of materials processing technology. — 2009. — № 209. — Pp. 3675–3687.

---

Kiselev M.G., Drozdov A.V., Monich S.G., Moscalenko A.V., Bogdan P.S.

**Theoretical and experimental studies of hole formation process on a work surface by electrocontact single action**

The article is devoted to theoretical and experimental study of the formation of holes on the surface to be treated by a single electric-contact exposure. Using a mathematical model of the formation of impact craters to derive an equation enables us to calculate the trajectory of the maximum emission of liquid metal from the hole because of its thermal characteristics and energy of a single electrical discharge. The results of his numerical studies reflecting the impact energy of the electric discharge and the conditions of its occurrence on the geometric parameters obtained on steel and titanium surface wells. The description of the methodology for conducting experimental studies, the results of which confirmed the accuracy of the mathematical model of the process of formation of holes on the metal surface after a single electrocontact exposure.

**Keywords:** *electrocontact processing, electrical discharge, mathematical model, electrical erosion, pit*

*Поступила в редакцию 29.01.2014.*