

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-190-197>

УДК 620.176

## Физическое моделирование условий взаимодействия обрабатываемого материала с наплывами металла, полученными на гладкой поверхности штрипсы в результате ее электроэрозионного модифицирования

Докт. техн. наук, проф. М. Г. Киселев<sup>1)</sup>, канд. техн. наук С. Г. Монич<sup>1)</sup>,  
асп. П. С. Богдан<sup>1)</sup>, К. А. Сидоров<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018  
Belarusian National Technical University, 2018

**Реферат.** Статья посвящена физическому моделированию процесса взаимодействия обрабатываемого материала с наплывами металла по краю лунок, полученными на гладкой поверхности инструмента в результате ее электроэрозионного модифицирования. Приведена методика получения на режущем инструменте (штрипсе) единичных лунок. Описаны основные геометрические элементы, полученные в результате воздействия единичного электрического разряда. Указаны геометрические параметры единичной лунки, полученной на рабочей поверхности штрипсы при таком воздействии. Приведены обоснование и описание примененного в исследованиях макета ленточного инструмента – штрипсы в виде латунной полосы, на которой закреплена шайба с различным радиусом скругления наружной кромки, моделирующая наплывы металла на ее модифицированной рабочей поверхности. Изложена методика проведения экспериментов, заключавшихся в исследовании условий взаимодействия созданного макета штрипсы с обрабатываемым материалом, включая описание устройства для изучения процесса взаимодействия шайбы с образцами из парафина и гипса. Представлены фотографии, позволяющие визуализировать процесс разрушения шайбой (модель наплывов металла) образцов. Показаны стадии разрушения образцов при использовании шайб с разным радиусом скругления, описан характер разрушения различных материалов образцов. Приведены и обсуждены результаты исследований, отражающие влияние формы наружной кромки шайбы, в частности радиуса ее скругления, на протекание характерных стадий процесса разрушения образцов из парафина и гипса. Экспериментально подтверждено, что образовавшиеся по краю лунки наплывы металла, выходящие за исходный контур поверхности, представляют собой режуще-деформирующие элементы, способные разрушать материал, уступающий по твердости металлу наплывов.

**Ключевые слова:** физическое моделирование, электроэрозионная обработка, модифицирование поверхности, режущая способность, резание, штрипса

**Для цитирования:** Физическое моделирование условий взаимодействия обрабатываемого материала с наплывами металла, полученными на гладкой поверхности штрипсы в результате ее электроэрозионного модифицирования / М. Г. Киселев [и др.] // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 3. С. 190–197. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-190-197>

## Physical Modeling of Conditions on Interaction of Processed Material with Metal Deposits Obtained on Smooth Surface of Strips due to its Electro-Erosion Modification

M. G. Kiselev<sup>1)</sup>, S. G. Monich<sup>1)</sup>, P. S. Bohdan<sup>1)</sup>, K. A. Sidorov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper is devoted to a physical modeling of the process pertaining to interaction of the machined material with metal deposits along a hole edge which are obtained on a smooth tool surface due to its electro-erosion modification.

### Адрес для переписки

Киселев Михаил Григорьевич  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 22,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-40-81  
kipp@bntu.by

### Address for correspondence

Kiselev Mihail G.  
Belarusian National Technical University  
22 Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-40-81  
kipp@bntu.by

A technique for obtaining single holes on a cutting tool (strip) is given in the paper. The paper describes main geometric elements which have obtained due to the action of a single electric discharge. Geometric parameters of a single hole initiated on a working strip surface in the course of this effect have been given in the paper. The paper provides a justification and description of a tape tool prototype used in the investigations - brass band strips, on which a washer with different rounding radius of an outer edge is fixed. The prototype makes it possible to simulate metal deposits on the modified working surface of the strips. The paper presents methodology for carrying out experiments on investigations for interaction of the created strip prototype with a processed material, including a description of a device for studying the process of washer interaction with the samples from paraffin and gypsum. Photographs are given that allow to visualize a destruction process of samples which is caused by a washer (model of metal deposits). The paper shows stages of sample fracture when using washers with different rounding radius and describes nature of the destruction for various sample materials. The results of the conducted studies reflecting an influence of the shape of an outer washer edge, in particular a radius of its rounding, on the course of characteristic stages in the process of destruction of samples from paraffin and gypsum are presented and discussed in the paper. It has been experimentally confirmed that metal deposits which are formed at the hole edge and extend beyond an initial surface contour, represent cutting-deforming elements with a capability to destroy material which ranks below in hardness to metal of the deposits.

**Keywords:** physical modeling, electro-erosion treatment, surface modification, cutting ability, cutting, strip

**For citation:** Kiselev M. G., Monich S. G., Bohdan P. S., Sidorov K. A. (2018) Physical Modeling of Conditions on Interaction of Processed Material with Metal Deposits Obtained on Smooth Surface of Strips due to its Electro-Erosion Modification. *Science and Technique*. 17 (3), 190–197. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-190-197> (in Russian)

## Введение

Результатами предшествующих исследований [1–4] экспериментально установлено, что поверхность после электроэрозионной обработки обладает режущей способностью, которую ей придают наплывы металла, образовавшиеся в местах перекрытия лунок. Именно эти наплывы выполняют роль своеобразных режуще-деформирующих элементов, которые способны разрушать материал, уступающий по твердости металлу наплывов. С целью повышения режущей способности такой поверхности авторами [5–8] осуществлялось ее электроэрозионное модифицирование. В отличие от размерной электроэрозионной обработки [9, 10] в этом случае лунки на обрабатываемой поверхности располагаются без их перекрытия, т. е. расстояние между центрами соседних лунок превышает значение их диаметра. Благодаря этому на поверхности образуется совокупность единичных лунок, имеющих по краям наплывы металла, форма и размеры которых определяются энергией электрического разряда и условиями его протекания (на воздухе или с использованием диэлектрической жидкости). Очевидно, что режущая способность модифицированной поверхности будет зависеть от формы и размеров наплывов металла, которые непосредственно влияют на условия их взаимодействия с обрабатываемым материалом. Поэтому для определения режимов и условий электроэрозионного модифицирования поверхности инструмента, обеспечивающих придание ей

наибольшей режущей способности, необходимо располагать данными о влиянии формы и размеров наплывов металла на процесс их взаимодействия с обрабатываемым материалом. В этой связи цель данной работы заключалась в физическом моделировании условий взаимодействия обрабатываемого материала с наплывами металла, полученными на исходной гладкой поверхности инструмента в результате ее электроэрозионного модифицирования.

## Методика проведения экспериментальных исследований

В ходе разработки методики необходимо было решить две задачи. Во-первых, обосновать параметры и создать макет инструмента, моделирующего наплывы металла на его рабочей поверхности, а во-вторых, создать устройство для исследования условий взаимодействия макета инструмента с обрабатываемым материалом с визуализацией во времени процесса его разрушения.

В качестве инструмента, для которого разрабатывался макет, была принята штрипса с модифицированной рабочей поверхностью. Для моделирования наплывов металла на ней необходимо располагать данными об их геометрических параметрах. С этой целью провели серию экспериментов, в ходе которых определялись геометрические параметры лунки, полученной на рабочей поверхности штрипсы в результате воздействия единичного электрического разряда.

Выполнялась эта операция следующим образом (рис. 1).

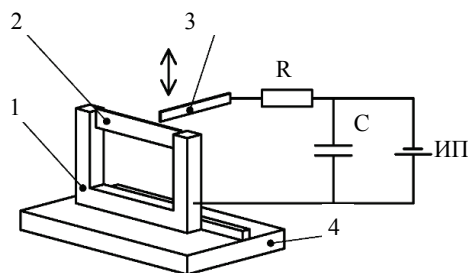


Рис. 1. Схема получения лунки на рабочей поверхности штрипсы

при воздействии единичного электрического разряда

Fig. 1. Scheme for obtaining hole on working strip surface due to single electric discharge

Штрипсу 2 из стали У10А длиной 110 мм, шириной 8 мм и толщиной 0,3 мм закрепляли и натягивали на рамке 1 (рис. 1). Последнюю устанавливали на диэлектрическом основании 4 таким образом, чтобы рабочая поверхность штрипсы располагалась вверх. Электроду-инструменту 3 в виде тонкой стальной (У8А) полосы вручную сообщалось движение в вертикальном направлении. Штрипса и электроду-инструмент были включены в электрическую цепь, состоящую из накопительного конденсатора С емкостью 350 мкФ, токоограничивающего резистора R и источника питания постоянного тока ИП. В процессе сближения электрода-инструмента с рабочей поверхностью штрипсы на расстоянии, соответствующем минимальному значению межэлектродного промежутка между ними, протекал электрический разряд, в результате чего на поверхности штрипсы формировалась единичная лунка. Обработка осуществлялась на воздухе при прямой полярности, т. е. анодом являлась штрипса. Напряжение  $U$  накопительного конденсатора изменялось от 18 до 75 В.

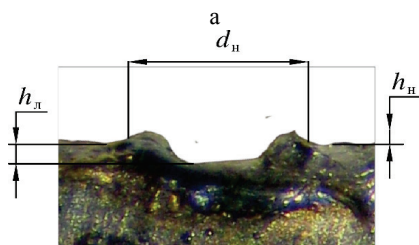


Рис. 2. Фотография единичной лунки сбоку (а) и в плане (b), полученной на поверхности штрипсы, с указанием ее параметров

Fig. 2. Photo of single hole at the side (a) and in plan view (b), obtained on strip surface with indication of its parameters

Фотография лунки на поверхности штрипсы с указанием ее параметров, к которым относятся глубина лунки  $h_n$ , ее диаметр  $d_n$ , высота наплывов металла по ее краю и их ширина  $b_n$ , приведена на рис. 2.

Первые два параметра измерялись с помощью малого инструментального микроскопа ММИ-2. Приращение толщины режущей кромки штрипсы  $b_n$  за счет образовавшихся наплывов металла определялось с помощью микрометра МК-25-0,1 как разность значений толщин штрипсы после формирования на ней лунки  $B$  и в исходном состоянии  $B_0$  ( $b_n = B - B_0$ ). Значения исследуемых параметров единичной лунки на поверхности штрипсы, полученной при различных напряжениях  $U$  накопительного конденсатора, представлены в табл. 1.

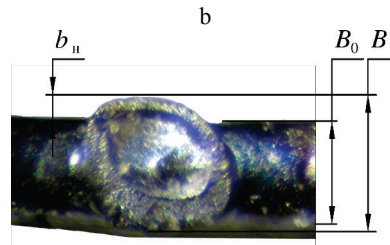
Таблица 1

Значения геометрических параметров лунки, полученной на поверхности штрипсы при различных напряжениях накопительного конденсатора

Values of geometric parameters for hole obtained on strip surface at various voltages of storage capacitor

Напряже- ние $U$ , В	Геометрический параметр лунки, мм			
	$d_n$	$h_n$	$b_n$	$b_n$
18	0,06	0,02	0,15	0,02
36	0,22	0,08	0,36	0,03
75	0,34	0,13	0,67	0,05

На основании полученных данных предложен макет штрипсы с наплывами металла на ее рабочей поверхности. Он состоит из латунной полосы шириной 14 мм, длиной 140 мм и толщиной 1 мм. Для моделирования наплывов металла на ее поверхности применялись стальные шайбы наружным диаметром 16 мм, внутренним 9 мм и толщиной 2 мм. При этом наружный, внутренний диаметры шайбы и ее толщина в масштабе 50:1 соответствовали диаметру наплывов металла по краю лунки и их высоте, полученных при  $U = 36$  В.



Предварительно путем механической обработки наружной кромке шайбы придавалась в одном случае скругленная форма (с отрицательным передним углом), а в другом – заостренная (с положительным передним углом), что моделировало форму наплывов металла по краю лунки. Затем с помощью эпоксидной смолы шайба закреплялась на поверхности латунной пластины, как показано на рис. 3.

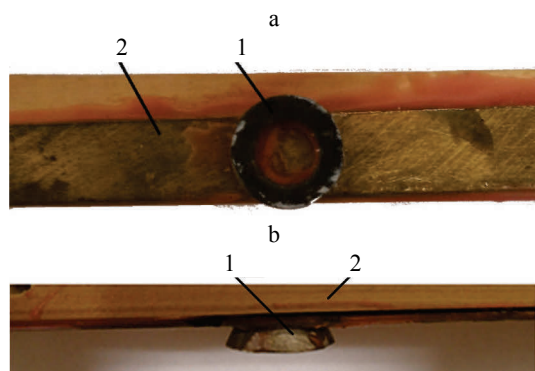


Рис. 3. Фотография латунной пластины с закрепленной на ней шайбой: а – вид сверху; б – вид сбоку; 1 – шайба; 2 – пластина

Fig. 3. Photo of brass plate with washer fixed to it: а – top view; б – side view; 1 – washer; 2 – plate

Исследование условий взаимодействия наплывов металла на поверхности пластины с обрабатываемым материалом проводилось с помощью специально созданного устройства, принципиальная схема которого и фотография общего вида представлены на рис. 4.

Устройство состоит из неподвижного кронштейна 1, на котором закрепляется пластинка с шайбой 2, горизонтальных направляющих 3, на которые неподвижно устанавливается образец обрабатываемого материала 4. От электродвигателя РД-09 со встроенным редуктором посредством передачи винт – гайка направляющая получает поступательное перемещение с малой скоростью ( $v = 100$  мм/мин). Предварительно путем регулировочных перемещений в вертикальном направлении пластины с шайбой на кронштейне устанавливается необходимая глубина резания. Непосредственно процесс взаимодействия рабочей кромки шайбы (модель наплыва металла) с материалом образца фиксировался с помощью видеокамеры Pana-

sonic HC-V160. После окончания процесса взаимодействия образца с рабочей поверхностью шайбы он снимался и с помощью микроскопа ММИ-2 исследовались характер и параметры полученного на нем следа обработки при различной форме рабочей части шайбы.

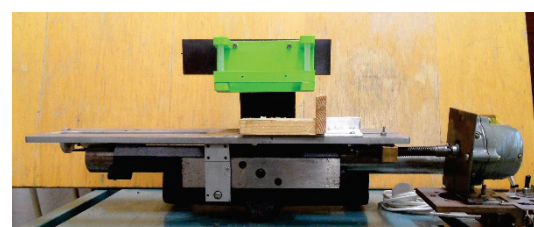
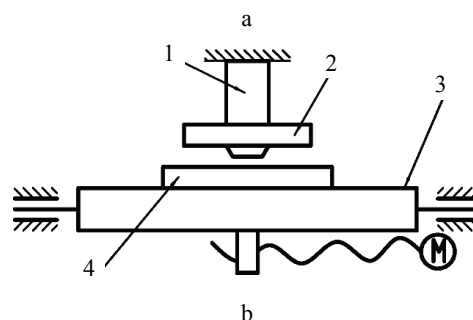


Рис. 4. Принципиальная схема (а) и фотография общего вида (б) устройства для исследования условий взаимодействия наплывов металла на поверхности пластины с обрабатываемым материалом

Fig. 4. Principle diagram (а) and general view photo (б) of device for studying conditions of metal deposit interaction with processed material on plate surface

Образцы изготавливались из парафина и гипса, т. е. материалов, уступающих по твердости стальной шайбе и отличающихся между собой упругопластическими свойствами.

## Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Покадровое исследование процесса взаимодействия шайбы с образцами показало следующее. При использовании шайбы со скругленной кромкой начало процесса ее взаимодействия с образцом из парафина (рис. 5а) характеризуется пластическим оттеснением материала с образованием на передней поверхности шайбы корня стружки.

В процессе последующего перемещения шайбы размеры оттесненного материала увеличиваются (рис. 5б). А при дальнейшем движении шайбы этот материал, при своем движении

будучи ограниченной поверхностью пластины, разделяется на отдельные фрагменты, которые перемещаются главным образом впереди кромки шайбы (рис. 5с), т. е. образуется стружка скалывания.

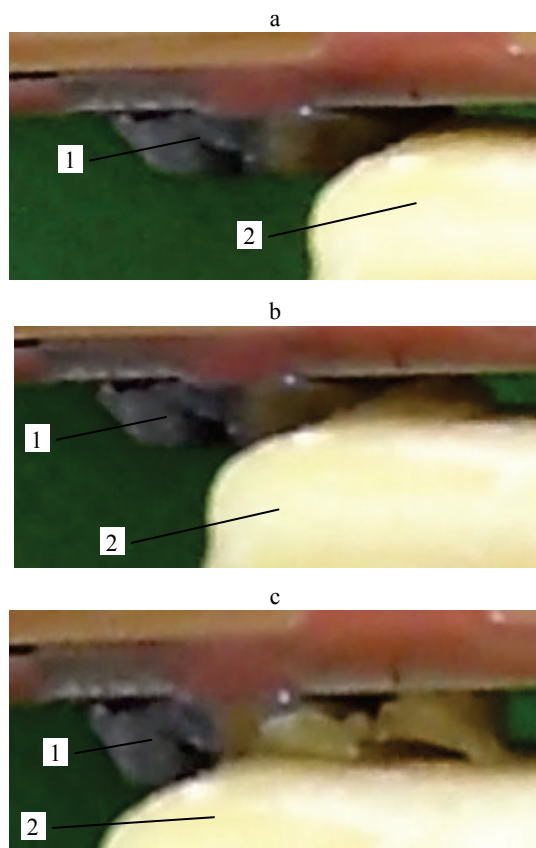


Рис. 5. Фотографии зоны взаимодействия шайбы со скругленной кромкой с образцом из парафина на различных стадиях протекания процесса:  
1 – шайба; 2 – образец

Fig. 5. Photos for zone of rounded edge washer interaction with paraffin specimen at various stages of process behavior:  
1 – washer; 2 – specimen

При использовании шайбы с острой режущей кромкой на стадии врезания (рис. 6а) также образуется элемент стружки, который по мере перемещения шайбы увеличивается (рис. 6б) и перемещается по передней поверхности шайбы в направлении, обратном ее движению, с формированием сливной стружки (рис. 6с).

Отмеченные отличия во взаимодействии шайбы со скругленной и острой режущими кромками подтверждаются характером следов обработки, полученных на поверхности парафинового образца (рис. 7).

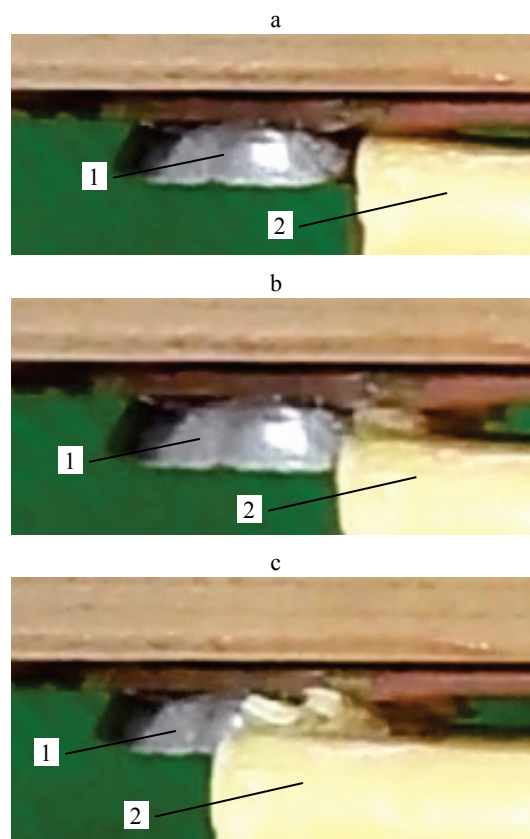


Рис. 6. Фотографии зоны взаимодействия шайбы с острой кромкой с образцом из парафина на различных стадиях протекания процесса:  
1 – шайба; 2 – образец

Fig. 6. Photo for zone of sharp edge washer interaction with paraffin specimen at various stages of process behavior:  
1 – washer; 2 – specimen



Рис. 7. Фотографии следов на поверхности парафинового образца, полученных при взаимодействии со скругленной (а) и с острой (б) кромками шайбы

Fig. 7 Photos of traces on paraffin specimen surface obtained due to interaction with rounded (a) and sharp (b) edge washer

При использовании шайбы со скругленной режущей кромкой получаемый на поверхности



образца след характеризуется наличием значительного количества отесненного материала, расположенного как впереди режущей кромки, так и по ее сторонам.

В случае применения шайбы с острой режущей кромкой срезаемый материал в виде сливной стружки располагается главным образом впереди.

Процесс взаимодействия шайбы с образцом из гипса, т. е. с хрупким материалом, отмечен следующими особенностями. В случае применения шайбы со скругленной кромкой начало ее взаимодействия с образцом (рис. 8а) характеризуется смещением (сдвигом) слоя гипса с образованием продуктов разрушения в виде мелкодисперсных частиц.

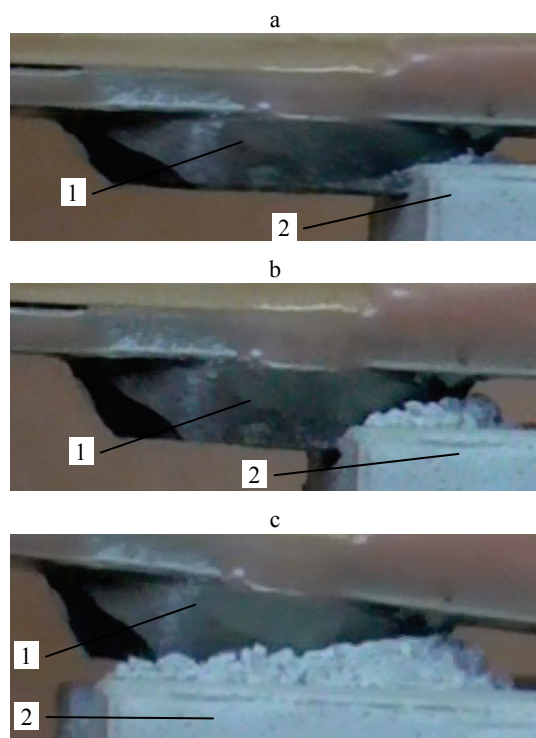


Рис. 8. Фотографии зоны взаимодействия шайбы со скругленной кромкой с образцом из гипса на различных стадиях протекания процесса: 1 – шайба; 2 – образец

Fig. 8. . Photos for zone of rounded edge washer interaction with gypsum specimen at various stages of process behavior: 1 – washer; 2 – specimen

По мере дальнейшего относительного движения шайбы (рис. 8б) отколовшиеся частицы перемещаются в сторону по передней поверхности кромки, образуя на поверхности образца

характерные навалы из мелкодисперсных частиц гипса. Аналогичная картина наблюдается при дальнейшем движении шайбы (рис. 8с).

При использовании шайбы с острой кромкой процесс ее взаимодействия с образцом несколько изменяется. В начальный момент (рис. 9а) происходит врезание кромки в образец с формированием элемента стружки.

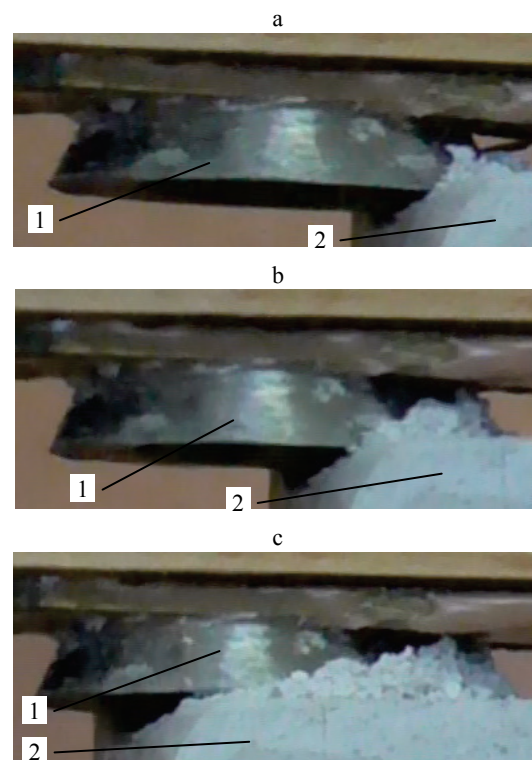


Рис. 9. Фотографии зоны взаимодействия шайбы с острой кромкой с образцом из гипса на различных стадиях протекания процесса: 1 – шайба; 2 – образец

Fig. 9. Photo for zone of sharp edge washer interaction with gypsum specimen at various stages of process behavior: 1 – washer; 2 – specimen

При дальнейшем движении (рис. 9б) ее размеры увеличиваются, и она начинает перемещаться в сторону по передней поверхности кромки с образованием фрагментов стружки скалывания в виде отдельных конгломератов гипса. Такой характер взаимодействия и образования продуктов разрушения сохраняется при дальнейшем врезании кромки в образец (рис. 9с).

Отмеченные особенности разрушения гипсового образца при взаимодействии с шайбой со скругленной и с острой кромками подтверждаются характером полученных на его поверхности следов (рис. 10).



Рис. 10. Фотографии следа обработки на поверхности гипсового образца при взаимодействии с острой (а) и со скругленной (б) кромками шайбы

Fig. 10. Photos of processing traces on gypsum specimen surface obtained due to interaction with rounded (a) and sharp (b) edge washer

Как видно из рис. 10, в первом случае след на поверхности образца формируется в результате резания с образованием стружки скалывания в виде разноразмерных фрагментов гипса, а во втором – за счет его деформирования с образованием продуктов разрушения в виде мелкодисперсных частиц гипса.

Таким образом, результатами проведенных исследований экспериментально подтверждено, что наплывы металла по краю лунки, полученной при воздействии на металлическую поверхность электрического разряда, представляют собой режуще-деформирующие элементы, способные разрушать материал, уступающий по твердости металлу наплывов. При этом соотношение между резанием и деформированием материала в процессе его разрушения при прочих равных условиях зависит от радиуса скругления наплывов металла, с уменьшением которого доля резания возрастает.

## ВЫВОДЫ

1. На основе экспериментально полученных данных о форме и размерах единичной лунки, полученной на поверхности стальной штрипсы в результате воздействия электрического разряда, разработан ее макет в виде латунной полосы, на поверхности которой закреплена стальная шайба, моделирующая наплывы металла по краю лунки, размеры которой в масштабе 50:1 соответствуют размерам наплывов металла на поверхности штрипсы.

2. Разработано устройство для физического моделирования условий взаимодействия созданного макета штрипсы с обрабатываемым материалом, позволяющее визуализировать процесс его

разрушения шайбой (модель наплывов металла), имеющей в одном случае скругленную форму наружной поверхности, а во-втором – заостренную.

3. На основании обобщенного анализа результатов физического моделирования процесса взаимодействия шайбы на макете штрипсы с обрабатываемыми образцами из парафина и гипса установлено следующее:

- разрушение образца из парафина (пластического материала) при использовании шайбы со скругленной кромкой происходит за счет ее пластического отеснения (сдвига) с формированием стружки скалывания, отдельные фрагменты которой располагаются главным образом впереди рабочей кромки шайбы. При использовании шайбы с острой кромкой парафин разрушается за счет его резания с образованием сливной стружки, располагаемой как впереди рабочей кромки шайбы, так и по ее сторонам;

- разрушение образца из гипса (хрупкого материала) при использовании шайбы со скругленной кромкой происходит за счет смещения (сдвига) слоя гипса с образованием продуктов разрушения в виде мелкодисперсных частиц, которые располагаются в виде навалов по всей поверхности рабочей кромки шайбы. При использовании шайбы с острой кромкой гипс разрушается в результате его резания с образованием стружки скалывания в виде отдельных конгломератов, располагаемых как на передней, так и на боковых поверхностях рабочей кромки шайбы.

4. Экспериментально подтверждено, что образовавшиеся по краю лунки наплывы металла, выходящие за исходный контур поверхности, представляют собой режуще-деформирующие элементы, способные разрушать материал,

уступающий по твердости металлу наплавов. При этом показано, что с целью повышения их режущей способности необходимо в процессе формирования единичной лунки обеспечить такие условия воздействия электрического разряда, при которых наплавы металла по ее краю будут иметь более заостренную форму, т. е. положительный передний угол.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Валиков, Е. Н. Обкатник для обработки кромок зубьев крупногабаритных зубчатых колес / Е. Н. Валиков, Ю. С. Тимофеев, А. С. Журина // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. № 8. С. 260–263.
2. Валиков, Е. Н. Финишная отделка зубчатых колес с использованием режущих свойств поверхностей после электроэрозионной обработки. Ч. 1 / Е. Н. Валиков, Ю. С. Тимофеева, А. С. Журина // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. № 12. С. 17–20.
3. Влияние электроконтактной обработки поверхности самореза на условия его вкручивания в образцы из различных материалов и выкручивания из них / М. Г. Киселев [и др.] // Наука и техника. 2015. № 5. С. 3–9.
4. Влияние электроэрозионной обработки изношенной поверхности рабочей части стального зубного бора на восстановление его режущей способности / М. Г. Киселев [и др.] // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 3. С. 189–195. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-189-195>.
5. Эффективность применения электроконтактной обработки поверхности проволоочного инструмента с целью придания ей режущей способности / М. Г. Киселев [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В: Промышленность. Прикладные науки. 2013. № 11. С. 73–77.
6. Экспериментальная оценка режущей способности штрипс с модифицированной путем электроконтактной обработки рабочей поверхностью / М. Г. Киселев [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. 2014. Т. 28, № 3. С. 64–68.
7. Влияние скорости вращения рабочей поверхности отрезного диска в процессе ее электроэрозионной обработки на режущую способность инструмента / М. Г. Киселев [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. 2016. Т. 35, № 2. С. 58–62.
8. Влияние энергии и условий воздействия электрических разрядов в процессе модификации рабочей поверхности стального отрезного диска на его режущую способность / М. Г. Киселев [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. 2015. Т. 31, № 2. С. 53–58.
9. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: в 2 т. / Б. А. Артамонов [и др.]. М.: Высш. шк., 1983. Т. 1: Обработка материалов с применением инструмента. 247 с.
10. Елисеев, Ю. С. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / Ю. С. Елисеев, Б. П. Саушкин; под ред. Б. П. Саушкина. М.: Изд-во МГТУ имени Баумана, 2010. 437 с.

## REFERENCES

1. Valikov E. N., Timofeev Yu. S., Zhurina A. S. (2013) Running Unit for Chamfering Gear Edges of Large-Size Gear Wheels. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki = Izvestiya Tula State University. Engineering Sciences*, (8), 260–263 (in Russian).
2. Valikov E. N., Timofeev Yu. S., Zhurina A. S. (2013) Finishing Process of Gear Wheels while Using Surface Cutting Properties after Electro-Erosion Machining. Part 1. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki = Izvestiya Tula State University. Engineering Sciences*, (12), 17–20 (in Russian).
3. Kiselev M. G., Drozdov A. V., Monich S. G., Bogdan P. S. (2015) Influence of Self-Tapping Screw Electro-Arc Machining on its Twisting-In in Specimens Made of Various Materials and Twisting-Out Procedure. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, (5), 3–9 (in Russian).
4. Kiselev M. G., Bohdan P. S., Kryshnev M. M., Semenov V. P. (2017) Influence of Edm Worn Surface of the Working Part of Steel Boron Tooth to Restore its Cutting Ability. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 16 (3), 189–195 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-189-195>.
5. Kiselev M. G., Drozdov A. V., Moskalenko A. V., Bohdan P. S. (2013) Application Efficiency in Electrical Discharge Machining of Wire Tool Surface with the Purpose to Impart it a Cutting Ability *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye Nauki* [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied sciences], (11), 73–77 (in Russian).
6. Kiselev M. G., Drozdov A. V., Gabets V. L., Bogdan P. S. (2014) Experimental Evaluation of Strip Cutting Ability with Operational Surface Modified by Electrical Discharge Machining. *Mekhanika Mashine, Mekhanizmov i Materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 28 (3), 64–68 (in Russian).
7. Kiselev M. G., Drozdov A. V., Bogdan P. S., Sentemova D. V. (2016) Influence of Rotation Velocity of Operational Cutoff Disk Surface on Tool Cutting Ability in the Process of its Electro-Erosion Machining. *Mekhanika Mashine, Mekhanizmov i Materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 35 (2), 58–62 (in Russian).
8. Kiselev M. G., Drozdov A. V., Gabets V. L., Bogdan P. S. (2015) Influence of Energy and Impact Conditions of Electric Discharges on Cutoff Disk Cutting Ability in the Process of its Operational Surface Modification. *Mekhanika Mashine, Mekhanizmov i Materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 31 (2), 53–58 (in Russian).
9. Artamonov B. A., Volkov Yu. S., Drozhalova V. I., Sedykin F. V., Smolentsev V. P., Yampol'skii V. M. (1983) *Electrophysical and Electrochemical Methods for Material Processing. Vol. 1: Processing of Materials while Using a Tool*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 247 (in Russian).
10. Eliseev Yu. S., Saushkin B. P. (2010) *Electroerosive Machining of Products for Aviation and Space Equipment*. Moscow, Bauman State Technical University. 437 (in Russian).

Поступила 09.02.2018

Подписана в печать 16.03.2018

Опубликована онлайн 29.05.2018

Received: 09.02.2018

Accepted: 16.03.2018

Published online: 29.05.2018