

УДК 621.9.048

**М.Г. КИСЕЛЕВ**, д-р техн. наук, профессор  
заведующий кафедрой «Конструирование и производство приборов»<sup>1</sup>  
E-mail: kiselev.maikl@gmail.com

**А.В. ДРОЗДОВ**, канд. техн. наук, доцент  
доцент кафедры «Конструирование и производство приборов»<sup>1</sup>  
E-mail: dav7@tut.by

**П.С. БОГДАН**  
аспирант кафедры «Конструирование и производство приборов»<sup>1</sup>  
E-mail: bpc@mail.ru

**Д.В. СЕНТЕМОВА**  
инженер 1-й категории ПИОИЭВ БелГИМ, магистрант кафедры «Конструирование и производство приборов»<sup>1</sup>  
E-mail: kiseliova@bk.ru

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 11.03.2016.

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТРЕЗНОГО ДИСКА В ПРОЦЕССЕ ЕЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА РЕЖУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ИНСТРУМЕНТА

*Статья посвящена экспериментальному исследованию особенностей формирования режущих элементов на рабочей поверхности отрезного диска методом электроэрозионной обработки (ЭЭО) непосредственно в процессе выполнения им операции распиливания и установлению взаимосвязи скорости перемещения рабочей поверхности инструмента при «заточке» с его режущей способностью. Приведено описание методики проведения экспериментальных исследований, включая методику осуществления электроэрозионной обработки рабочей поверхности отрезного диска при различной окружной скорости его вращения и методику оценки его режущей способности при последующем распиливании им образцов из текстолита. Представлены и проанализированы результаты экспериментальных исследований, отражающих влияние окружной скорости вращения диска при выполнении электроэрозионной обработки его поверхности на интенсивность последующего распиливания им образца из текстолита. Установлено, что с повышением окружной скорости вращения диска существенно снижается. На основании исследования параметров лунок, сформированных на поверхности диска при различной окружной скорости его вращения, дано объяснение полученным экспериментальным зависимостям. В результате проведенных исследований установлен диапазон значений скорости перемещения рабочей поверхности инструмента при ЭЭО, в пределах которого целесообразно использовать принцип постоянной перезаточки работающего отрезного инструмента.*

**Ключевые слова:** отрезной диск, распиливание, электроэрозионная обработка, модифицирование поверхности, режущая способность

**Введение.** Размерная электроэрозионная обработка (ЭЭО) нашла широкое применение в технологии машино- и приборостроения и в первую очередь при обработке заготовок из труднообрабатываемых металлов и сплавов [1]. С ее помощью в них получают (прошивают) различные полости и отверстия, осуществляют их резание, вырезание по контуру, прорезание пазов и канавок, выполняют шлифование наружных и внутренних поверхностей [2–3].

В основе ЭЭО лежит явление электрической эрозии — направленное разрушение электропроводных материалов в результате кратковременного теплового действия импульсных электрических разрядов между электродом-инструментом и заготовкой [4–5]. В результате на ее поверхности образуется углубление в виде сферической лунки. При воздействии серии

разрядов поверхность приобретает кратерообразную форму с четко выраженными углублениями в виде множества перекрывающихся друг друга лунок. Именно за счет перекрытия лунок в результате многократного повторения импульсов происходит удаление металла по всей обрабатываемой поверхности заготовки, т. е. ее размерная обработка.

Известно [6], что после ЭЭО поверхностный слой приобретает свойства, положительно влияющие на эксплуатационные показатели деталей. Так, увеличение твердости поверхности при сохранении вязкой сердцевины повышает износостойкость поверхности. Наличие на ней большого количества лунок благоприятно сказывается на условиях удержания смазки между трущимися поверхностями, особенно в условиях граничной смазки. Помимо указанных и до-

статочно глубоко изученных свойств поверхности, без должного внимания со стороны исследователей осталось то обстоятельство, что в результате ЭЭО она приобретает режущие свойства. Так, в работе [7] применительно к операции обкатки зубчатых колес для обработки кромок зубьев авторами экспериментально доказано, что применение инструмента (обкатника), рабочая поверхность которого подвергнута ЭЭО, сопровождается снятием микростружки с поверхности обрабатываемого зубчатого колеса. Режущие свойства поверхности придают перемычки (наплывы) застывшего металла, образовавшиеся по краям соседних лунок в результате их перекрытия в процессе ЭЭО.

С целью повышения режущей способности такой поверхности авторами [8] предложено осуществлять ее ЭЭО без перекрытия лунок, т. е. проводить только ее модифицирование, а не размерную обработку. В ходе последующих экспериментальных исследований [9] было подтверждено, что путем воздействия на металлическую поверхность электрическими разрядами ей можно придать режущую способность. Связано это с тем, что в результате электрической эрозии на ней образуются лунки, которые имеют по краям наплывы (валики) застывшего металла, выходящие за исходный контур поверхности.

Именно наличие этих элементов на модифицированной путем электроэрозионной обработки поверхности придают ей режущую способность. Установлено, что формой и размерами этих режущих элементов на модифицированной поверхности можно управлять путем изменения режимов и условий выполнения электроэрозионной обработки. В частности, с возрастанием энергии электрического разряда размеры лунки, а также высота наплывов металла по ее краю увеличиваются, что приводит к повышению режущей способности модифицированной поверхности. Показано, что процесс модифицирования исходной поверхности с использованием энергии электрических разрядов оправдано рассматривать как специфическую операцию ее заточки. При этом очевидным ее достоинством является простота реализации: не требуется применение специального режущего инструмента и приспособлений, которые используются при выполнении традиционной операции заточки нового и переточки затупившегося режущего инструмента. Кроме того, для восстановления режущей способности инструмента, в частности, отрезного диска появляется возможность осуществлять ЭЭО его рабочей поверхности без снятия инструмента со станка.

Учитывая весьма малую продолжительность протекания разряда (25–30 мкс), авторами [10] на уровне рабочей гипотезы высказано предположение о возможности восстановления режущей способности отрезного диска непосредственно при выполнении им операции распиливания, т. е. при его вращении с рабочей окружной скоростью (скоростью резания). В этой связи цель данной работы заключалась в экспериментальной проверке данного предположения.

**Методика проведения экспериментальных исследований.** В качестве объекта исследования использовались диски из стали У8А диаметром 75 и толщиной 0,3 мм с центральным посадочным отверстием 16 мм. Для выполнения экспериментов была создана специальная установка, схема которой приведена на рисунке 1.

На массивном основании 1 установлен электродвигатель 2 (ПЛ-062У4), на валу которого закрепляется испытуемый диск 7. Частота вращения вала регулируется в диапазоне от 0 до 1800 мин<sup>-1</sup> и контролируется с помощью стробоскопического тахометра Testo 465 (на схеме не показан).

Для осуществления электроэрозионной обработки рабочей поверхности (режущей кромки) диска установка была оснащена специальной электрической схемой, состоящей из источника питания постоянного тока ИП, токоограничивающего резистора R и накопительного конденсатора C. Электрод-инструмент в виде тонкой, толщиной 0,3 мм стальной пластины 6, подключался к отрицательному полюсу ИП, а диск с помощью токосъемного устройства — к положительному полюсу ИП, т. е. использовалась прямая полярность. Пластине вручную сообщалось колебательное движение с частотой  $f$ , при котором ее кромка периодически контактировала с обрабатываемой поверхностью диска. В процессе их сближения на расстоянии, соответствующем минимальному межэлектродному промежутку (МЭП) проходил его пробой и между поверхностями протекал электрический разряд, вызывающий электрическую эрозию поверхностей диска и электрода-инструмента. В результате расплавления и испарения металла на обрабатываемой поверхности диска образовывалась лунка, имеющая по краям наплывы застывшего металла (рисунок 2).

С целью определения влияния окружной скорости вращения диска в процессе выполнения ЭЭО его рабочей поверхности на режущую способность инструмента, эксперименты по модифицированию его рабочей поверхности проводились при различных значениях  $v_d$ , начиная с  $v_d = 0$  до  $v_d = 450$  м/мин. При  $v_d = 0$  ЭЭО поверхности диска осуществлялась путем его поворота вручную с равномерным нанесением на ней лунок на расстоянии 1,5–2 мм друг от друга.

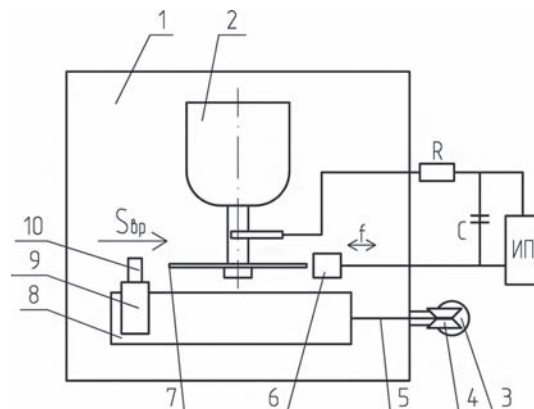


Рисунок 1 — Схема экспериментальной установки

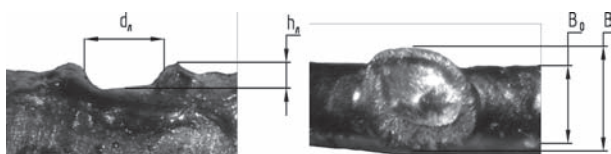


Рисунок 2 — Схема измерения параметров, сформированных на поверхности диска лунок

Во всех остальных случаях вращение диска обеспечивалось от электродвигателя при соответствующей частоте его вращения. При этом ЭЭО осуществлялось при постоянной частоте прерывания электрической цепи ( $f \approx 1$  Гц) и продолжалось до получения лунок по всей обрабатываемой поверхности диска. Напряжение накопительного конденсатора было постоянным и составляло 75 В при его емкости 400 мкФ, диэлектрическая жидкость не применялась, т. е. обработка осуществлялась на воздухе.

После завершения обработки диск снимался, и определялись параметры сформированных на его поверхности лунок. В частности, по полученным с помощью оптической микроскопии изображениям модифицированной поверхности диска (см. рисунок 2) определялась глубина лунки  $h_d$  и ее диаметр  $d_d$ , а с помощью микрометра МК-25-0,01 определялось приращение толщины режущей кромки диска  $\Delta B$  за счет образовавшихся по краю лунки наплывов металла ( $\Delta B = B - B_0$ , где  $B$  и  $B_0$  — соответственно измеренные значения толщины диска в месте расположения лунки и его толщина в исходном состоянии).

Затем диск вновь закреплялся на валу электродвигателя установки (см. рисунок 1) и проводились эксперименты по определению его режущей способности. Подлежащий распиливанию образец 10 из текстолита с прямоугольным поперечным сечением 15×8 мм зажимался в оправке 9, которая закреплялась на подвижной части 8 шариковых направляющих. Усилие прижатия образца к рабочей поверхности диска, определяющее врезную подачу  $S_{вр}$ , обеспечивалось посредством грузов 3, связанных с подвижной частью направляющих с помощью тонкой проволоки 5 и блока 4. При проведении экспериментов по распиливанию образца величина этого усилия была постоянной и составляла 2 Н. Частота вращения инструмента также была постоянной и составляла 1800 мин<sup>-1</sup>, что соответствовало скорости резания  $v_p = 450$  м/мин. Режущая способность инструмента оценивалась по значению интенсивности распиливания образца  $i$ , которая определялась отношением площади его распиленной поверхности  $F_k$  продолжительности обработки  $t$  ( $i = F_k / t$ , мм<sup>2</sup>/мин).

**Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение.** Влияние окружной скорости вращения диска при ЭЭО его рабочей поверхности на интенсивность последующего распиливания им текстолитового образца отражают данные, приведенные на рисунке 3.

Из них видно, что наибольшей режущей способностью ( $i = 240$  мм<sup>2</sup>/мин) обладает диск, рабочая по-

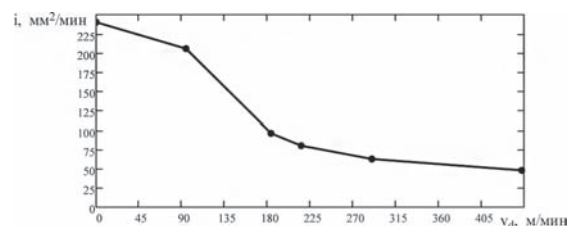


Рисунок 3 — Зависимость интенсивности распиливания текстолитового образца отрезным диском от окружной скорости его вращения при выполнении ЭЭО его рабочей поверхности

верхность которого модифицирована путем ЭЭО при  $v_d = 0$ , т. е. когда электрический разряд воздействовал на его неподвижную поверхность. С увеличением окружной скорости вращения диска в процессе ЭЭО значение  $i$  начинает снижаться, и наиболее интенсивно это снижение наблюдается в диапазоне изменения  $v_d$  от 90 до 200 м/мин. При дальнейшем увеличении  $v_d$  значение  $i$  существенно не изменяется, и при  $v_d = 450$  м/мин, что соответствует принятой скорости резания  $v_p$ , оно составляет  $i = 48$  мм<sup>2</sup>/мин, что более, чем в 5 раз ниже в сравнении с наибольшим его значением при  $v_d = 0$ .

Для объяснения характера полученной зависимости  $i(v_d)$  проанализируем влияние окружной скорости вращения диска в процессе выполнения ЭЭО на параметры формируемых на его рабочей поверхности лунок. На рисунке 4 представлены изображения поверхности диска с полученными на ней лунками при различной окружной скорости его вращения.

Из сравнения приведенных изображений видно, что с увеличением окружной скорости вращения диска при выполнении ЭЭО его рабочей поверхности форма и размеры получаемых на ней лунок изменяются. В частности, они приобретают более вытянутую форму с одновременным уменьшением их глубины и высоты наплывов металла по краям.

На рисунке 5 приведены данные, отражающие влияние скорости вращения диска на глубину полученной лунки  $h_d$ , ее диаметр  $d_d$  и приращение толщины режущей кромки диска  $\Delta B$ .

Как видно из приведенных экспериментальных данных, увеличение окружной скорости вращения диска при выполнении ЭЭО его рабочей поверхности сопровождается уменьшением глубины получаемой на ней лунки  $h_d$ , увеличением ее диаметра  $d_d$  и снижением приращения толщины режущей кромки диска  $\Delta B$ . Так, при  $v_d = 0$  значения  $h_d$ ,  $d_d$  и  $\Delta B$ , соответственно, составляют 110, 260 и 42 мкм, а при  $v_d = 450$  м/мин они приняли значение  $h_d = 5$  мкм,  $d_d = 600$  мкм и  $\Delta B = 10$  мкм. Очевидно, эти изменения геометрических параметров лунки связаны с влиянием окружной скорости вращения диска на условия воздействия электрического разряда на его рабочую поверхность, в частности, на характер распределения на ней энергии разряда, т. е. на степень локализации последнего на обрабатываемой поверхности. Если принять продолжительность разряда  $t_p$  между поверхностью диска и электрода-инструмента постоянной и равной 30 мкс, то перемещение за это



Рисунок 4 — Изображения поверхности диска при различной окружной скорости его вращения  $v_d$  в процессе ЭЭО:  $a - v_d = 0$ ;  $b - v_d = 215$  м/мин;  $c - v_d = 450$  м/мин

время поверхности вращающегося диска определится  $S = v_d \cdot t_p$  и составит  $S = 25$  мкм при  $v_d = 50$  м/мин и  $S = 225$  мкм при  $v_d = 450$  м/мин. Таким образом, с увеличением  $v_d$  величина  $S$  прямо пропорционально возрастает, соответственно, снижается степень локализации электрического разряда на обрабатываемой поверхности, вызывая указанные выше изменения геометрических параметров лунок.

В свою очередь, параметры лунки влияют на режущую способность диска. В частности она возрастает с увеличением высоты наплывов металла по краю лунки. С увеличением окружной скорости вращения диска в процессе ЭЭО его рабочей поверхности высота этих наплывов металла уменьшается, что приводит к снижению интенсивности распиливания им образца.

На основании полученных результатов можно констатировать, что осуществление ЭЭО рабочей поверхности отрезного диска с целью поддержания его высокой режущей способности непосредственно в процессе выполнения операции распиливания, т. е. при окружной скорости диска, равной скорости резания, малоэффективно. Вместе с тем, исходя из полученных данных, можно обоснованно рекомендовать использование ЭЭО для поддержания высокой режущей способности инструментов непосредственно в процессе выполнения операции распиливания при скоростях резания, не превышающих 90 м/мин, к примеру, при распиливании заготовок ленточными пилами.

**Выводы.** 1. Разработана методика проведения экспериментальных исследований, позволяющая оценить влияние окружной скорости вращения стального отрезного диска в процессе электроэрозионной обработки его рабочей поверхности на интенсивность последующего распиливания им образца из текстолита.

2. Установлено, что с повышением окружной скорости вращения диска от  $v_d = 0$  до  $v_d = 450$  м/мин

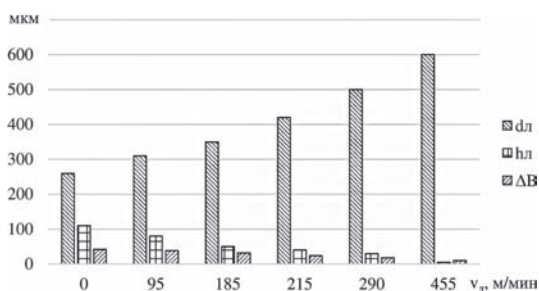


Рисунок 5 — Диаграмма зависимости геометрических параметров лунок, полученных на поверхности диска, от окружной скорости его вращения  $v_d$  при выполнении ЭЭО его рабочей поверхности

в процессе электроэрозионной обработки его рабочей поверхности интенсивность последующего распиливания им образца из текстолита снижается более чем в 5 раз (от  $i = 240$  мм<sup>2</sup>/мин при  $v_d = 0$  до  $i = 48$  мм<sup>2</sup>/мин при  $v_d = 450$  м/мин).

3. Установлено, что увеличение окружной скорости вращения диска при электроэрозионной обработке его рабочей поверхности сопровождается уменьшением глубины формируемых на ней лунок  $h_l$ , увеличением их диаметра  $d_l$  и снижением приращения толщины режущей кромки диска  $\Delta B$ . Так, при  $v_d = 0$  значения составляли  $h_l = 110$  мкм,  $d_l = 260$  мкм и  $\Delta B = 42$  мкм, а при  $v_d = 450$  м/мин они приняли значение  $h_l = 5$  мкм,  $d_l = 600$  мкм и  $\Delta B = 10$  мкм.

4. Показано, что изменения геометрических параметров лунок связаны с влиянием окружной скорости вращения диска на условия воздействия электрического разряда на его рабочую поверхность, в частности, на характер распределения на ней энергии разряда. С увеличением окружной скорости вращения диска степень локализации электрического разряда на его обрабатываемой поверхности снижается пропорционально величине ее перемещения за время прохождения разряда.

5. Показано, что режущая способность диска определяется высотой наплывов металла на краю лунки (аналог зуба инструмента), образовавшихся в процессе электроэрозионной обработки его рабочей поверхности. Установлено, что с увеличением окружной скорости вращения диска высота этих наплывов металла уменьшается, что обуславливает снижение интенсивности распиливания им образца.

6. Экспериментально доказано, что применение электроэрозионной обработки рабочей поверхности отрезного диска с целью поддержания его высокой режущей способности непосредственно в процессе выполнения операции распиливания при окружной скорости вращения диска, равной скорости резания, малоэффективно. Показано, что электроэрозионная обработка инструмента непосредственно в процессе распиливания для поддержания его высокой режущей способности может быть оправдана для инструментов, работающих со скоростями резания, не превышающими 90 м/мин, к примеру, при распиливании заготовок ленточными пилами, в частности штрипсами.

### Список литературы

1. Бирюков, Б.Н. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки / Б.Н. Бирюков. — М.: Машиностроение, 1981. — 128 с.
2. Артамонов, Б.А. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: в 2 т. / Б.А. Артамонов. — М.: Высш. шк., 1983. — Т. 1: Обработка материалов с применением инструмента. — 247 с.
3. Коваленко, В.С. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / В.С. Коваленко. — Киев: Вища шк., 1975. — 236 с.
4. Левинсон, Е.М. Справочное пособие по электротехнологии / Е.М. Левинсон. — Л.: Лениздат, 1972. — 328 с.
5. Попилов, Л.Я. Основы электротехнологии и ее новые возможности / Л.Я. Попилов. — Л.: Машиностроение, 1971. — 216 с.
6. Фотеев, Н.К. Технология электроэрозионной обработки / Н.К. Фотеев. — М.: Машиностроение, 1980. — 184 с.

7. Валиков, Е.Н. Обкатник для обработки кромок зубьев крупногабаритных зубчатых колес / Е. Н. Валиков, Ю.С. Тимофеев, А.С. Журина // Изв. ТулГУ. — 2013. — № 8. — С. 260–263.
8. Эффективность применения электроэрозионной обработки поверхности проволочного инструмента с целью придания ей режущей способности / М.Г. Киселев [и др.] // Вестн. ПГУ. — № 11. — 2013. — С. 73–77.
9. Экспериментальная оценка режущей способности штрипс с модифицированной путем электроэрозионной обработки рабочей поверхностью / М.Г. Киселев [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2014. — № 3. — С. 64–68.
10. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса формирования лунки на обрабатываемой поверхности при однократном электроэрозионном воздействии / М.Г. Киселев [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2014. — № 1. — С. 76–81.

KISELEV Mikhail G., Dr. Techn. Sc., Professor

Head of the Department “Device Design and Manufacture”<sup>1</sup>

E-mail: kiselev.maikl@gmail.com

DROZDOV Aleksey V., Cand. Techn. Sc., Associate Professor

Associate Professor of the Department “Device Design and Manufacture”<sup>1</sup>

E-mail: dav7@tut.by

BOHDAN Pavel S.

Graduate Student of the Department “Device Design and Manufacture”<sup>1</sup>

E-mail: bpc@mail.ru

SENTEMOVA Diana V.

Engineer 1-st Category MROMEV BelGIM, Undergraduate Student of the Department “Device Design and Manufacture”<sup>1</sup>

E-mail: kiseliova@bk.ru

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

Received 11 March 2016.

## INFLUENCE OF SPEED OF THE WORKING SURFACE CUTTING DISCS DURING ON EDM CUTTING ABILITY TOOL

*The article is devoted to the experimental study of the feasibility of restoring the cutting ability of the cutting disc by electrical discharge machining its surface directly in the performance of sawing operation. The description of the methodology of experimental research, including methodology of the electrical discharge machining (EDM) cutting disc working surface at different circumferential speed of rotation and a methodology to assess its cutting ability in the subsequent sawing them to samples from textolite. Presented and analyzed the results of experimental studies, reflecting the impact of the district disk rotation speed when the EDM surface on the intensity of the subsequent sawing them a sample of the PCB. It was found that with increasing peripheral speed of disc rotation during the electric discharge machining its surface, the cutting tool capacity plummets. Based on the research parameters holes formed on the surface of the disk at a different peripheral speed of rotation given to explain the experimental dependences. The studies proved that the use of electrical discharge machining the working surface of the cutting disc in order to maintain its high cutting capacity directly in the cutting operation, when the circumferential speed of the disc is equal to the cutting speed, is ineffective.*

**Keywords:** separating disc, sawing, EDM, surface modification, cutting ability

### References

1. Biryukov B.N. *Jeletrofizicheskie i jeletrohimicheskie metody razmernoj obrabotki* [Electro-physical and electrochemical machining techniques]. Moscow, Mashinostroenie, 1981. 128 p.
2. Artamonov B.A. *Jeletrofizicheskie i jeletrohimicheskie metody obrabotki materialov* [Electrophysical and electrochemical methods of processing materials]. Moscow, Vyssh. shk, 1983, vol. 1. 247 p.
3. Kovalenko V.S. *Jeletrofizicheskie i jeletrohimicheskie metody obrabotki materialov* [Electrophysical and electrochemical methods of processing materials]. Kiev, Vyssh. shk, 1975. 236 p.
4. Levinson E.M. *Spravochnoe posobie po jeletrotehnologii* [Handbook for electrotechnology]. Leningrad, Lenizdat, 1972. 328 p.
5. Popilov L.Ya. *Osnovy jeletrotehnologii i ee novye vozmozhnosti* [Fundamentals of electrotechnology and its new features]. Leningrad, Mashinostroenie, 1971. 216 p.
6. Foteev N.K. *Tehnologiya elektroerozionnoj obrabotki* [EDM Technology]. Moscow, Mashinostroenie, 1980. 184 p.
7. Valikov E.N., Timofeev Ju.S., Zhurina A.S. Obkatnik dlja obrabotki kromok zub'ev krupnogabaritnyh zubchatyh koles [Generating tool for machining of teeth edges in large-size gear wheels]. *Izvestija TulGU* [Journal of TylGU], 2013, no. 8, pp. 260–263.
8. Kiselev M.G., Drozdov A.V., Moskalenko A.V., Bogdan P.S. Jeftektivnost' primeneniya jelektrojerozionnoj obrabotki poverhnosti provolochnogo instrumenta s cel'ju pridaniya ej rezhushhej sposobnosti [Efficacy of treatment of the surface electric-wire tool to give it a cutting capacity]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta* [Journal of PGU], 2013, no. 11, pp. 73–77.
9. Kiselev M.G., Drozdov A.V., Gabets V.L., Bogdan P.S. Jeksperimental'naja ocenka rezhushhej sposobnosti shtrips s modifitsirovannoj putem jelektrojerozionnoj obrabotki rabochej poverhnost'ju [Experimental evaluation of cutting power strips with modified by treatment with electro worktop]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, tools and materials], 2014, no. 3, pp. 64–68.
10. Kiselev M.G., Drozdov A.V., Monich S.G., Moskalenko A.V., Bohdan P.S. Teoreticheskoe i jeksperimental'noe issledovanie processa formirovaniya lunki na obrabatyvaemoy poverhnosti pri odnokratnom jelektrojerozionnom vozdeystvii [Theoretical and experimental study of the formation of hole sin the surface to be treated with a single exposure electrocontact]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, tools and materials], 2014, no. 1, pp. 76–81.