

скоростей главного движения от 100 до 400 м/мин, при одинаковой подаче и глубине резания, описанных ранее.

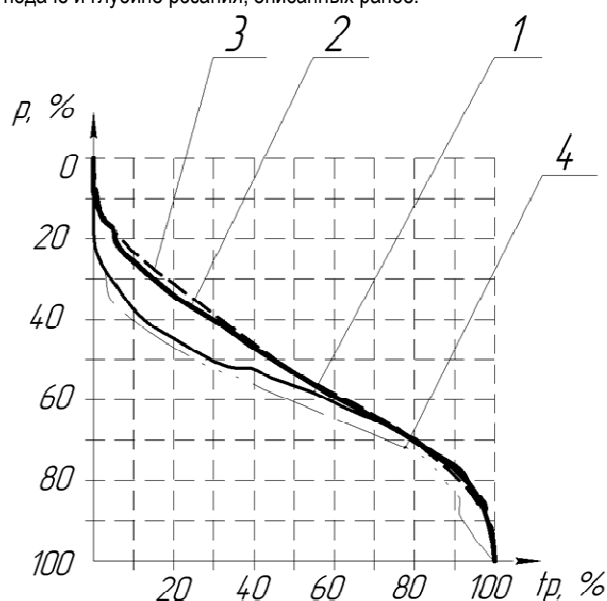


Рис. 3. Опорные кривые профилей неровностей обработанных поверхностей резцом с пластиной из алмаза со скоростями резания: 1-126 м/мин; 2-251 м/мин; 3-314 м/мин; 4-393 м/мин

Из результатов опытов видно, что при изменении скорости резания шероховатость поверхности изменяется незначительно, это может объясняться тем, что даже при наличии нароста скорость резания не влияет на механизм образования микронеровностей.

LIAUDANSKI A.M., LIAUDANSKI S.A. Processing cutter with mechanical fastening inserts artificial diamond aluminum-magnesium-silicon alloys

This article describes the experimental treatment cutter with a progressive method of securing the inserts of synthetic diamonds aluminum-magnesium-silicon alloys.

УДК 621.9.048

Нерода М.В.

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ И ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ РАЗРЯДОВ В ЗОНЕ ОБРАБОТКИ ПРИ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ШЛИФОВАНИИ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА

**Введение.** Повышение надежности изделий, работающих в сложных условиях, при воздействии высоких нагрузок, температур в условиях абразивного изнашивания, а также других видов воздействия, потребовало разработки и создания технологических процессов упрочнения и восстановления. Повысить износостойкость рабочих поверхностей изделий можно изменением химического состава материала поверхности путем внедрения легирующих компонентов для образования структур, хорошо сопротивляющихся процессам изнашивания; механическим и тепловым воздействием на поверхность металла, приводящим к структурным изменениям в поверхностном слое детали; нанесением на поверхности деталей машин износостойких покрытий [1]. Для увеличения износостойкости деталей методами плазменного и газопламенного напыления применяются самофлюсующиеся порошковые материалы на основе никеля и хрома, легированные бором и кремнием [2].

Данные материалы покрытий являются распространенными на

Этот вывод имеет большое практическое значение, так как что бы получить малую шероховатость поверхности нет необходимости применять высокие частоты вращения и соответственно придавать шпинделю специализированных алмазных станков очень большие числа оборотов, что связано со значительным усложнением конструкции станка.

В результате исследований приходим к выводу, что обработка точением при скоростях резания, равных  $v=251$  м/мин и  $v=314$  м/мин, позволяет получить поверхности, не только с низкой высотой микронеровностей, но и обеспечить сравнительно большую опорную длину профиля, которая сопоставима, а иногда и превышает, полученную при точении на скоростях  $v=126$  м/мин и  $v=393$  м/мин. Применение скоростей резания равных  $v=251$  м/мин и  $v=314$  м/мин, перспективно для получения деталей с высокими эксплуатационными свойствами. Таким образом, скорость резания при алмазной обработке должна быть выбрана такой, чтобы обеспечивала должный уровень производительности процесса обработки и простоту конструкции шпинделя станка, а также минимальную вибрацию системы.

Также были сделаны и другие выводы, в частности о характере действия сил в зоне обработки. Величины были получены расчетным путем с использованием специально написанной для этой цели компьютерной программой, поскольку точность имеющегося в распоряжении оборудования (СУР-600) не позволила снять показания из-за малости результатов ( $P_z$  в диапазоне 10-30Н;  $P_y$  в диапазоне 1-3Н).

### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Левданский, А.М. Модернизация резца с механическим креплением вставок из сверхтвердых материалов / А.М. Левданский, И.А. Левданский // Вестник БрГТУ. – 2010. – №4 (144): Машиностроение. – С. 40.

Материал поступил в редакцию 29.10.13

машиностроительных предприятиях, использующих технологию газопламенного напыления, однако из-за высоких физико-механических свойств покрытий (вязкости и твердости) существует сложность в их последующей механической обработке. Эта проблема требует проведения дальнейших работ разработки методов высокопроизводительной обработки упрочняющих покрытий.

Особый интерес представляет интенсификация процесса шлифования упрочняющих покрытий путем комбинированного воздействия на обрабатываемую поверхность механической, электрической и магнитной энергий с целью повышения качества и производительности обработки.

Наиболее эффективными в ряде случаев являются комбинированные методы обработки, к числу которых относится магнитно-электрическое шлифование [3]. В его основе лежат процессы, связанные с механическим резанием зернами абразива, электроэрозионным и термическим воздействием технологического тока на по-

Нерода Михаил Владимирович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения инженерного факультета Барановичского государственного университета.

Беларусь, БарГУ, 225404, Брестская обл-ть, г. Барановичи, ул. Войкова, 21.

верхность упрочняющего покрытия под влиянием внешнего магнитного поля. МЭШ является высокопроизводительным способом обработки токопроводящих материалов с высокими физико-механическими свойствами. Производительность обработки МЭШ может достигать 3000 мм<sup>3</sup>/мин. Шероховатость обработанной поверхности находится в пределах Ra 0,32–1,25 мкм.

Особенностью способа является возможность изменения свойств поверхностного слоя обрабатываемого материала в заданном направлении за счет действия технологического тока и внешнего магнитного поля.

Однако недостаточно изучены механизмы явлений, происходящих в зоне обработки при МЭШ упрочняющих покрытий, оказывающие влияние на производительность обработки и качество поверхности.

**Обработка образцов проводилась на опытно-промышленной установке** на базе универсально-заточного станка 3Е642Е.

В качестве инструмента применялся абразивный токопроводящий круг марки ПП250×25×32 – 5С25СТ6КАЛ.

Влияние режимов МЭШ на шероховатость поверхности упрочняющих покрытий изучали по профилограммам, полученным с помощью профилографа-профилометра модели АБРИС-ПМ7.

Структура поверхностного слоя упрочняющих покрытий изучалась с помощью оптических микроскопов моделей *Stemi 2000С* и *МЕТАМ ЛВ-32* (Ю-33.25.416), максимальное увеличение которых составляет 250 и 1 000 соответственно.

Для исследования влияния режимов МЭШ на поверхность упрочняющего покрытия изучались физические закономерности, лежащие в его основе.

Влияние технологического тока на поверхностный слой упрочняющего покрытия может проявляться за счет электроискровых разрядов, происходящих в зоне обработки МЭШ, при стружечном замыкании цепи «абразивный круг-поверхность упрочняющего покрытия» и при скольжении токопроводящей связки абразивного круга по обрабатываемой поверхности.

При развитой рабочей поверхности токопроводящего абразивного инструмента электроискровые разряды происходят преимущественно за счет стружечного замыкания и через микровыступы на поверхности упрочняющего покрытия электродов, которыми являются абразивный круг и заготовка [4]. При сближении вращающегося инструмента и поверхности детали абразивные зерна вступают в механический контакт с поверхностью упрочняющего покрытия и осуществляют процесс резания. Каждое режущее зерно инструмента снимает стружку, которая сходит по направлению к металлической связке круга и замыкает электрическую цепь «абразивный круг – заготовка». В месте касания стружки и металлической связки абразивного круга при прохождении тока высокой плотности интенсивно выделяется теплота. При этом стружка и/или микровыступ нагревается до температуры плавления, в результате чего между электродами образуется жидкий мостик, который разрушается при температуре кипения металла. При разрушении жидкого мостика возникает электрический разряд, вызывающий электроэрозионное разрушение поверхности упрочняющего покрытия, оплавление микровыступов поверхности упрочняющего покрытия и металлической связки абразивного круга.

Согласно классификации У. Чейса [5], при коротком замыкании наблюдается четыре ситуации разрушения стружки:

плавление, когда подводимая энергия не достигает уровня, требуемого для полного испарения материала;

медленный взрыв, при этом время, необходимое для испарения замыкающего элемента, велико по сравнению со временем развития нестабильностей в расплавленном элементе;

быстрый взрыв, при котором время испарения мало по сравнению с постоянной неустойчивостью;

взрывная абляция, когда время испарения мало по сравнению с электротермической временной постоянной.

В результате этих явлений в зоне обработки МЭШ выделяется значительная тепловая энергия, которая влияет на сьем материала упрочняющего покрытия и качество поверхностного слоя защитного покрытия.

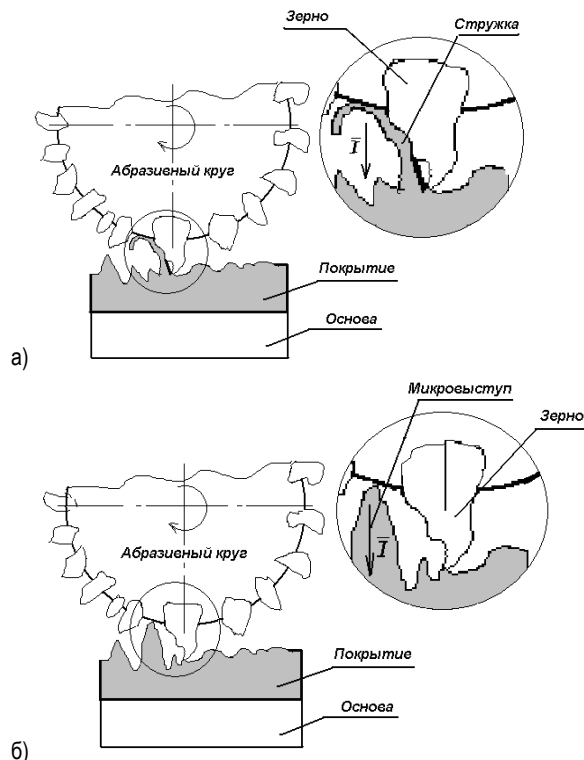
Скользкий контакт возникает в том случае, когда на взаимодействующей поверхности абразивного круга отсутствует или ограничено количество абразивных зерен, что происходит, например,

при засаливании режущей поверхности инструмента продуктами шлифования, при износе зерен.

Отмеченные формы электродконтактных процессов при скольжении и стружечном замыкании могут возникнуть одновременно или с последовательным чередованием, что зависит от состояния режущей поверхности абразивного круга, микрогеометрии поверхностного слоя упрочняющего покрытия и значений режимов МЭШ. При больших значениях технологического тока, в случае пробоя межэлектродного промежутка (МЭП), могут возникать процессы электроэрозии при контакте зерен абразивного круга с поверхностью детали. Процесс электроэрозии приводит к разрушению поверхностного слоя упрочняющего покрытия и образованию электроэрозионных лунок на поверхности детали и токопроводящей связке круга. Этот процесс влияет на формирование шероховатости поверхности и производительность обработки [6, 7].

При больших значениях технологического тока ( $I = 20-25$  А) увеличивается плотность тока, вследствие этого значительно возрастает температура в зоне обработки, происходит плавление материала упрочняющего покрытия, повышается его пластичность, что способствует уменьшению главных сил резания. При этом электроискровые процессы переходят в электродуговые, что приводит к выделению значительной тепловой энергии в зоне обработки. В результате этого поверхностный слой покрытия оплавляется на заданную глубину. Короткое замыкание цепи «абразивный круг-поверхность упрочняющего покрытия» может происходить по двум схемам, показанным на рисунке 1.

В первом случае короткое замыкание происходит через стружку, снимаемую абразивными зернами, во втором – через микровыступы поверхностного слоя покрытия. Известно, что процессы электрической эрозии протекают при значительных, порядка 100–200 А, значениях технологического тока. При МЭШ площадь сечения стружки  $S_f$  является малой величиной, значение плотности тока, проходящего через стружку  $J_f$ , возрастает до значений 1000 А/мм<sup>2</sup>, при этом возникает условие процесса электроэрозионного разрушения поверхности упрочняющего покрытия.



а) через стружки, снимаемые абразивными зернами;  
б) через микровыступы поверхностного слоя защитного покрытия  
**Рис. 1.** Схемы короткого замыкания цепи «токопроводящая связка абразивного круга – поверхность упрочняющего покрытия»

Для установления влияния технологического тока на производительность обработки рассмотрим процесс удаления материала упрочняющего покрытия только за счет электрической эрозии, происходящей при стружечном замыкании, (рисунок 1, а).

Производительность обработки  $Q$  (мм<sup>3</sup>/мин) при МЭШ от электроэрозионного разрушения упрочняющего покрытия можно определить по зависимости [6]

$$Q = k'V_3 / t_0, \quad (1)$$

где  $k'$  – коэффициент, учитывающий условия протекания процесса МЭШ;

$V_3$  – объем материала покрытия, удаляемого за счет эрозионного разрушения единичным искровым разрядом, мм<sup>3</sup>;

$t_0$  – время действия электрического разряда, мин.

Коэффициент  $k'$  равен количеству стружек, снимаемых периферией круга за один проход и замыкающих цепь «абразивный круг – поверхность упрочняющего покрытия» [8]

$$k' = \pi D_k H n_k i_p L / S_{пр}, \quad (2)$$

где  $D_k$  – диаметр абразивного круга, мм;

$H$  – высота абразивного круга, мм;

$n_k$  – частота вращения абразивного круга, мин<sup>-1</sup>;

$i_p$  – количество режущих зерен на единице площади периферии абразивного круга, шт/мм<sup>2</sup>;

$L$  – длина обрабатываемой поверхности, мм;

$S_{пр}$  – продольная подача, мм/мин.

Подставляя численные значения величин для процесса МЭШ упрочняющих покрытий ( $D_k=250$  мм,  $H=25$  мм,  $n=2000$  мин<sup>-1</sup>,  $i_p=3$ ,  $L=20$  мм,  $S_{пр}=936$  мм/мин), имеем

$$k' = 3,14 \cdot 250 \cdot 25 \cdot 2000 \cdot 3 \cdot 20 / 936 = 2516025.$$

Принимая количество стружек, замыкающих цепь «абразивный круг-поверхность упрочняющего покрытия», за количество электрических разрядов, при которых возникает процесс электрической эрозии, определим среднюю мощность  $P_{cp}$  каждого из них по закону Джоуля-Ленца

$$P_{cp} = I^2 R_c, \quad (3)$$

где  $I$  – величина технологического тока ( $I=20-25$  А);

$R_c$  – электрическое сопротивление стружки, Ом.

Электрическое сопротивление стружки зависит от ее формы, размеров и свойств обрабатываемого материала, и определяется по формуле [2]

$$R_c = \rho \frac{l}{S}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление стружки (для никеля  $\rho=7,3 \cdot 10^{-8}$  Ом·м);

$l$  – длина стружки, м;

$S$  – площадь поперечного сечения стружки, м<sup>2</sup>.

Для расчета электрического сопротивления стружки примем следующие допущения. Длину стружки  $l$  примем из условия, что размер части зерна, находящейся в связке круга, составляет  $2/3 a_0$ , где  $a_0$  – размер зерна, ( $a_0=0,25$  мм), тогда  $l = 0,25 \cdot 2/3 \cdot 0,25 = 0,083$  мм.

Площадь поперечного сечения рассчитаем для принятой идеализированной формы стружки, представленной в виде полуцилиндра с радиусом  $R$  и высотой  $h$ , равной длине стружки  $l$  и замыкающей цепь между поверхностью покрытия и связкой круга (рисунок 2).

Тогда площадь поперечного сечения стружки определяется по формуле

$$S = \pi \cdot R^2 / 2, \quad (5)$$

где  $R$  – радиус сечения полуцилиндра, м.

Для расчета площади поперечного сечения стружки значение  $R$  выберем исходя из зернистости круга, предполагая, что стружка в

процессе резания сходит по всей ширине зерна (для зернистости 25 примем  $R = 0,00025$  м).

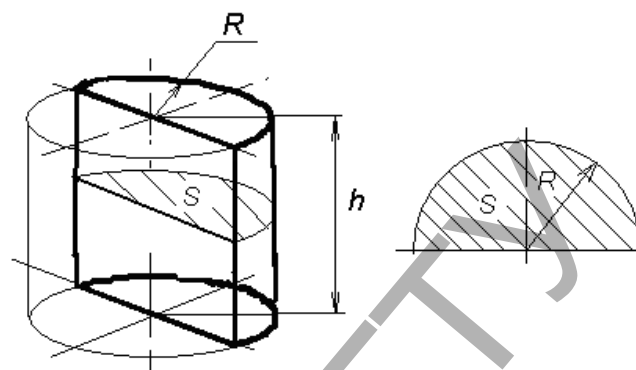


Рис. 2. Идеализированная форма стружки, принятая для расчета площади поперечного сечения

Подставляя формулу (5) в (4), получим зависимость, по которой можно приближено определить значение электрического сопротивления стружки

$$R_c = \rho \frac{l}{\pi \cdot R^2 / 2}. \quad (6)$$

Подставляя численные значения режимов для процесса МЭШ упрочняющего покрытия из материала марки ПГ-СР4 ( $\rho=7,3 \cdot 10^{-8}$  Ом,  $R=0,00025$  м), получим значение сопротивления стружки

$$R_c = 7,3 \cdot 10^{-8} \frac{8,3 \cdot 10^{-5}}{3,14 \cdot 0,00025^2 / 2} = 6,17 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

Подставляя формулу (6) в (3), получим зависимость, по которой можно определить мощность  $P_{cp}$  Вт единичного разряда

$$P_{cp} = \frac{I_c^2 \rho l}{\pi R^2 / 2}. \quad (7)$$

Для вышеприведенных численных значений получим

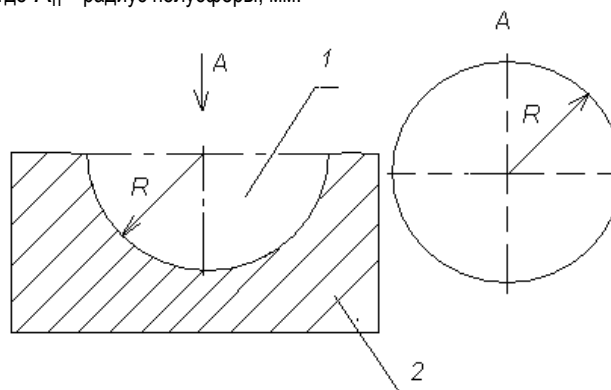
$$P_{cp} = 20^2 \cdot 6,17 \cdot 10^{-5} = 0,024 \text{ Вт}.$$

Объем материала  $V_3$  покрытия, удаляемого за счет эрозионного разрушения единичным искровым разрядом, рассчитываем из условия, что идеальная форма электроэрозионной лунки представляет собой полусферу с геометрическими размерами, показанными на рисунке 3.

Тогда объем полусферы равен

$$V_3 = \frac{2}{3} \cdot \pi R_n^3, \quad (8)$$

где  $R_n$  – радиус полусферы, мм.



1 – полусфера (электроэрозионная лунка); 2 – упрочняющее покрытие  
Рис. 3. Геометрические размеры полусферы ( $\times 1000$ )

Среднее численное значение диаметра электроэрозионной лунки определим из анализа топографии поверхности упрочняющего покрытия из материала ПГ-СР4, показанного на рисунке 4.

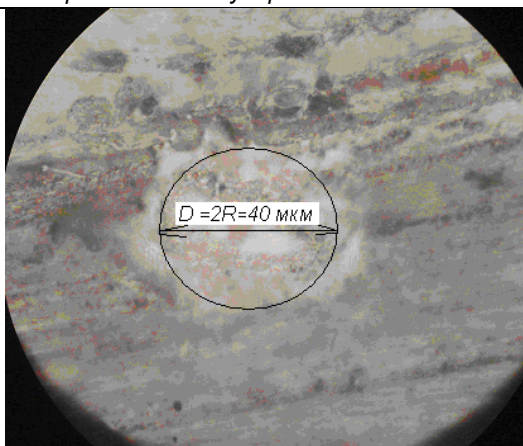


Рис. 4. Среднее значение диаметра электроэрозионной лунки ( $\times 1000$ )

Из анализа микрошлифа покрытия с электроэрозионной лункой, показанного на рисунке 5, видно, что средняя глубина лунки составляет  $h = 1/4R_p$ . Это связано с тем, что не вся энергия единичного искрового разряда расходуется на электроэрозионное разрушение материала покрытия.

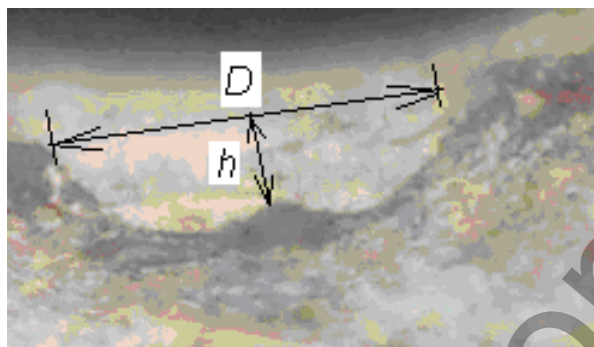


Рис. 5. Поперечные размеры электроэрозионной лунки,  $D=2R=40$  мкм (микрошлиф  $\times 1000$ )

Поэтому формулу (8) представим в виде

$$V_s = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot R_p^3 - \frac{2}{3} \pi \cdot h = \frac{1}{6} \pi R^3, \quad (9)$$

где  $R$  – радиус электроэрозионной лунки, мм.

Подставляя численные значения в формулу (9), получим объем удаляемого материала с поверхности покрытия за счет электроэрозионного разрушения единичным электрическим разрядом.

$$V_s = \frac{1}{6} \cdot 3,14 \cdot 0,02^3 = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3.$$

Время действия электрических разрядов равно времени обработки поверхности упрочняющего покрытия  $T_0$  и определяется из скорости продольной подачи  $S_{пр}$  по формуле

$$t_0 = \frac{L}{S_{пр}}, \quad (10)$$

где  $L$  – длина обрабатываемой поверхности, мм;

$S_{пр}$  – продольная подача, мм/мин.

Подставляя значения в формулу (10) для режимов МЭШ, получим

$$t_0 = \frac{20}{936} = 0,021 \text{ мин}.$$

Подставляя формулы (2), (9) и (10) в формулу (1), получим формулу, по которой можно рассчитать производительность обработки  $Q_{эп}$  ( $\text{мм}^3/\text{мин}$ ), происходящей за счет электроэрозионного разрушения поверхности упрочняющих покрытий при МЭШ

$$Q_{эп} = \frac{\pi D_k H n i_p R^3}{6}, \quad (11)$$

где  $D_k$  – диаметр абразивного круга, мм;

$H$  – высота абразивного круга, мм;

$n$  – частота вращения абразивного круга,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$i_p$  – количество режущих зерен на единице площади периферии абразивного круга,  $\text{шт}/\text{мм}^2$ ;

$R$  – радиус электроэрозионной лунки, мм.

Подставляя численные значения режимов МЭШ в формулу (11), получим значение производительности обработки упрочняющего покрытия из материала марки ПГ-СР4 за счет электроэрозионного разрушения, происходящего при стружечном замыкании цепи «абразивный круг – поверхность упрочняющего покрытия».

$$Q_{эп} = 2516025 \cdot 1,3 \cdot 10^{-6} / 0,021 = 155,7 \text{ мм}^3/\text{мин}.$$

Рассчитанное значение производительности обработки является приближенным, т.к. в процессе МЭШ размеры лунок не одинаковые, их количество при различных режимах разное, следовательно, и объем материала, удаляемого за счет эрозионного разрушения, также не одинаков. В представленных выше расчетах приняты усредненные значения геометрических размеров электроэрозионных лунок.

**Заключение.** Рассчитано максимальное значение производительности обработки за счет электроэрозионного разрушения поверхности с газотермическим упрочняющим покрытием из самофлюсующегося порошкового материала ПГ-СР2 для исследуемых режимов МЭШ, которое составляет  $Q_{эп} = 205,8 \text{ мм}^3/\text{мин}$ .

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Исследование триботехнических характеристик электромагнитных покрытий из легированных порошков на железной основе / Ж.А. Мрочек. [и др.] // Вести НАНБ сер. физ.-тех. наук. – Минск, 2000. – С. 150.
2. Константинов, В.М. Ресурс-энергосбережение при восстановлении и упрочнении деталей диффузионно-легированными сплавами / В.М. Константинов // Мир технологий – Минск: Технопринт, 2003. – № 1. – 83 с.
3. Дмитриченко, Э.И. Разработка и исследование процесса магнитно-электрического шлифования деталей машин: автореф. дис. – канд. тех. наук: 05.02.08. / Э.И. Дмитриченко; Моск. автомобилестроит. ин-т. – 1991. – 17 с.
4. Чачин, В.Д. Профилирование алмазных шлифовальных кругов / В.Д. Чачин, В.Д. Дорощев. – Минск: Наука и техника, 1974. – 160 с.
5. Чейс, У. Электрический взрыв проводников (пер. с англ.) / У. Чейс. – М.: Мир, 1965. – С. 7-11.
6. Артамонов, Б.А. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / Б.А. Артамонов // Обработка материалов с использованием высококонцентрированных источников энергии; под ред. В.П. Смоленцева. – М.: Высш. школа, 1983. – Т. 2. – 208 с.
7. Бирюков, Б.Н. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки / Б.Н. Бирюков. – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с.
8. Ящерицын, П.И. Теория резания: учебник / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – Мн.: Новое знание, 2005. – 512 с.

Материал поступил в редакцию 02.04.14

#### NIARODA M.V. Effect of electric and electric-spark discharge treatment zone by magnetic electric grinding process performance

This article discusses issues relating to the impact of electro physical processes in the treatment zone by magnetic electric grinding performance of the grinding process of hardening coatings materials brands PG- PG- CP4 and CP2 obtained gas-thermal method. Found that the maximum processing performance by breaking the surface with a spark- gas-thermal -resistant coating of self-fluxing powder material PG- CP2 for study modes MEG, which is  $Q = 205.8 \text{ мм}^3/\text{мин}$ .