

Ю.Г. Гуцаленко, Харьков, Украина

ОСОБЕННОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОГЕОМЕТРИИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ АЛМАЗНО-ИСКРОВОМ ШЛИФОВАНИЕМ

Представлена розробка геометричної моделі формування шорсткості поверхні в присутності ерозійних мікроруїнувань оброблюваної поверхні під дією електричних розрядів в умовах алмазно-іскрового шліфування. Показані можливості використання ерозійних ефектів видалення мікрооб'ємів матеріалу з оброблюваної поверхні в згладжуванні її мікрорельєфу.

Представлена разработка геометрической модели формирования шероховатости поверхности в присутствии эрозийных микроразрушений обрабатываемой поверхности под действием электрических разрядов в условиях алмазно-искрового шлифования. Показаны возможности использования эрозийных эффектов удаления микрообъемов материала с обрабатываемой поверхности в сглаживании ее микрорельефа.

It is presented the development of the geometric model of the formation of surface roughness in the presence of erosive microfracture treated surface under the action of electrical discharges in terms of a diamond-spark grinding. The possibilities of using the erosive effects of microvolume material removing from the treated surface in its microrelief smoothing are shown.

Введение. Предшествующий опыт и задача развития. Экспериментальные исследования прогрессивного технологического метода алмазно-искрового шлифования (АИШ), разработка которого основана в НТУ «ХПИ» и выполняется в нем более 40 лет [1], свидетельствуют, как правило, о некотором повышении шероховатости обработанной поверхности по сравнению с обычной алмазной обработкой [2-4]. Как отмечается в [2], причины этого явления заключаются в таких присущих АИШ достоинствах и особенностях, как "увеличение высоты выступания зёрен, уменьшение удельной работы связи в процессе шлифования и наличие микролунок, образованных электрическими разрядами".

Вместе с тем опыт микроскопических исследований поверхностей после электроэрозионного воздействия в процессе АИШ позволил предложить модель сглаживания шероховатости поверхности при участии электрической эрозии в формировании окончательного рельефа обработанной поверхности в усовершенствованных циклах обработки [5-6].

Эта модель исходит из того, что, во-первых, в условиях АИШ объемно-геометрические характеристики рабочей зоны обработки достаточно стабильны и их изменения прогнозируемы, а электрические режимы

ожидаемо определяют величину критического зазора электрического пробоя между металлами связки шлифовального круга и обрабатываемой поверхности. Во-вторых, в заданных кинематико-геометрических и электрических условиях АИШ данного материала эрозионный след электрического разряда на его поверхности может рассматриваться в виде вытянутого полуэллипсоида вращения с вполне определенной глубиной H [7], рис. 1.

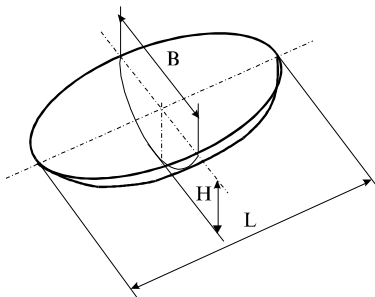


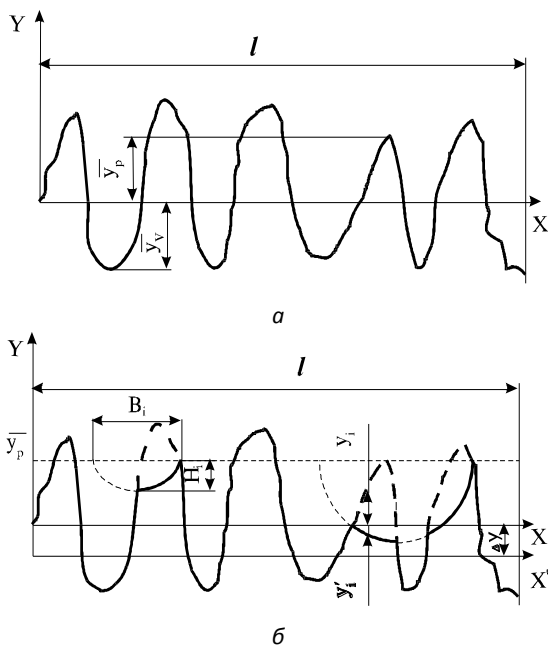
Рисунок 1 – Модель эрозионной лунки

Тогда возможны относительно малые по высотным характеристикам электроэрозионные вмешательства в картину микропрофиля шлифованной поверхности ($H < R_z$, R_z по [8]), которые сглаживают её рельеф и, если и не приводят к уменьшению R_z (при неполном перекрытии эрозионными пятнами обработанной поверхности), то наверняка снижают величину среднего арифметического отклонения профиля R_a [8], как это показано в работе [5], рис. 2.

Рис. 2 отображает микропрофиль поверхности, сформированный в отсутствие электрических разрядов (после обычного алмазного шлифования, рис. 2, а) и с их участием (после АИШ, рис. 2, б).

При алмазной обработке кругом после предварительной электроэрозионной правки или с одновременной основному рабочему процессу автономной правкой (непрерывной, периодической), осуществляемой вне зоны резания, микропрофиль шлифованной поверхности (рис. 2, а) идентичен участкам микропрофиля после АИШ, не испытавшим электроэрозионных вмешательств. Следы этих вмешательств глубиной H_i и шириной B_i показаны на рис. 2, б. Учитывая, что в процессе АИШ имеет место скольжение электрических контактов (пятен каналов электрических разрядов) по обработанной поверхности, модель – полушар или шаровой сегмент высотой (глубиной лунки) H , какими описывалась бы эрозия в неподвижных точечных электрических контактах, трансформируется в модель – полуэллипсоид с размерами полуосей H (глубина лунки), $B/2$ (B – ширина лунки) и $L/2$ (L – длина лунки), рис. 1. Согласно с теорией и

практикой электроэрозионных явлений в движущихся электрических контактах вообще [9] и возникающих в зоне АИШ в особенности [2-4], модель эрозионной лунки по рисунку 1 представляет полуэллипсоид, вытянутый в направлении скольжения электроэрозионного контакта (в направлении шлифования). При $H = \frac{B}{2} < \frac{L}{2}$ модель эрозионной лунки является вытянутым полуэллипсоидом вращения.



a – незерозированной, b – зерозированной

Рисунок 2 – Микропрофиль поверхности

По модели [5] (рис. 2) величины высот \bar{y}_p и \bar{y}_v [8] соответствуют средним значениям пяти наибольших выступов (\bar{y}_p) и впадин (\bar{y}_v) профиля, по которым рассчитывается параметр R_z шероховатости поверхности [8], т. е.

$$|\bar{y}_p| = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pi}|}{5}, \quad (1)$$

$$|\bar{y}_v| = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{vi}|}{5}. \quad (2)$$

Принимается также [5], что линии высот и впадин со средними значениями \bar{y}_p и \bar{y}_v симметричны средней линии профиля (оси абсцисс X , рис. 2, б), т.е.

$$|\bar{y}_p| = |\bar{y}_v|, \quad (3)$$

$$|\bar{y}_p| = \frac{R_z}{2}. \quad (4)$$

Геометрическая логистика модели [5] опирается на физическое ожидание того, что эрозионные следы движущихся пятен каналов разрядов (электрических контактов) занимают энергетически наиболее выгодные положения, с возможно минимальным зазором (сопротивлением в контакте), и потому, во-первых, не пересекаются (каждая последующая лунка формируется вне уже состоявшихся, если такая ситуация возможна) и, во-вторых, эрозия начинается с наибольших выступов профиля (т.е. среднестатистично с уровня \bar{y}_p , рис. 2, б).

Рассмотрение [5] пренебрегает во многих случаях характерными эрозионным лункам-кратерам "лавообразования", когда расплавленный материал образует навалы по краям лунок и (или) заполняет попавшие в зону эрозионного лункообразования впадины микрорельефа поверхности. Последнее в большей степени присуще обработке пластичных материалов, особенно электроэрозионным процессам с относительно малыми энергиями единичных импульсов, когда $H < R_a$ или хотя бы $H < R_z$, как это могло бы иметь место в геометрическом представлении по рис. 2, б.

Модель [5] вовлекает в рассмотрение исключительно ситуации с относительно малыми по высотным характеристикам электроэрозионные вмешательства в картину микропрофиля шлифованной поверхности сглаживают её рельеф и, если и не приводят к уменьшению R_z (при весьма малой плотности N эрозионных пятен на обработанной поверхности), то наверняка снижают величину среднего арифметического отклонения профиля R_a . При этом положение средней линии профиля меняется (понижается на некоторую величину Δb , рис. 2, б).

Однако покажем, что иллюстрированное рис. 2, б введение в модель сглаживания шероховатости поверхности при АИШ является таковым и в ситуациях, когда $H \geq R_z$ в рассмотрении R_z при работе без тока. Эти ситуации являют предпосылку использования эрозионного лункообразования в сглаживании шероховатости поверхности в цикле АИШ, включающем завершающий цикл технологический переход выхаживания без тока.

Основная часть. Итак, рассмотрим, как проявится возникновение эрозионных разрушений микропрофиля поверхности в результате электроразрядных процессов, протекающих в зоне резания при АИШ, при их использовании в сглаживании основных высотных характеристик шероховатости обработанной поверхности, а именно R_a и R_z [8], в контексте обозначенной задачи развития предшествующего опыта, т.е. ситуациях, когда $H \geq R_z$.

Исследуем на применимость в рассматриваемой задаче расчетной схемы [5], рис. 3.

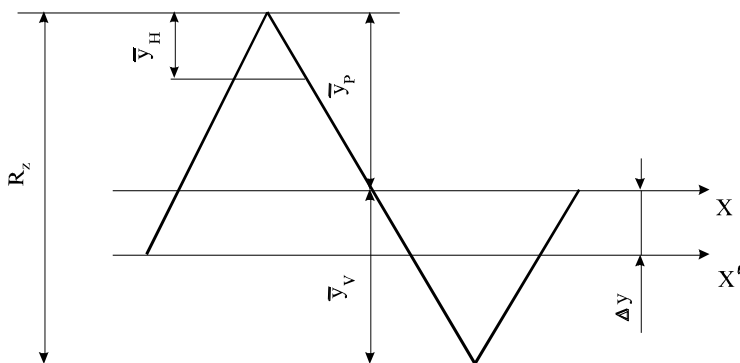


Рисунок 3 – Расчетная схема сглаживания шероховатости

Аналогично [5] сразу заметим, что из расчетной схемы (рис. 3) с учётом (3) и (4) следует:

$$R_z = 4 \cdot R_a. \quad (5)$$

Тогда, если \bar{y}_n – известная величина линейного электроэрозионного съёма (при однопроходном шлифовании с продольной подачей на ширину круга $\bar{y}_n < H$), установленная расчетным или экспериментальным путём, или их комбинацией, и являющаяся величиной приведенной (т.е. средневзвешенной в объёме поверхностного слоя), отсчитываемой от уровня выступов \bar{y}_p , то можно определить и понижение Δy средней линии профиля поверхности от уровня X к уровню X', и значение параметра шероховатости R'_a , пониженное по сравнению с формируемым алмазным кругом той же остроты в технологиях без возбуждения электрических разрядов в зоне обработки:

$$\Delta y = 0,5 \bar{y}_i, \quad (6)$$

$$R'_a = R_a - 0,25 \bar{y}_i. \quad (7)$$

Соответственно, с увеличением отношения \bar{y}_i/R_a в диапазоне соответствующей полноте R_a четверти R_z , т. е. от 0 (обычное алмазное шлифование) до 1, расчетное значение R'_a снижается до 75 % от R_a , полученного при обработке с наложением эрозионного лункообразования, при этом понижение Δu составляет $0,5R_a$; и так далее с дальнейшей интенсификацией электроэрозионных процессов на обрабатываемой поверхности, по глубине геометрической наследственности соизмеримых с шероховатостью поверхности при шлифовании в отсутствие эрозионного воздействия на нее.

Тогда в общем случае, как это следует из основанных на анализе экспериментальных данных модельных представлениях [5] и изложенного здесь, достижимый сглаживающий эффект массы единичных электроэрозионных вмешательств в картину формирования шероховатости обработанной поверхности (в том числе, как это рассматривается [5], относительно малых по высотным характеристикам, $H < R_z$) является наследственностью действия электрических импульсов, возбуждающих электрические разряды. В том числе как это рассматривается [5], относительно маломощные высокочастотные, правящее действие которых на анодную поверхность металлической связки круга в высокопроизводительных процессах из опытной практики недостаточно для поддержания стабильно высокой развитости режущего рельефа алмазно-абразивного инструмента, обеспечивающей основные организационно-технические, технологические и экономические преимущества АИШ. Поэтому подтвердим здесь рекомендацию [5] об использовании в цикле АИШ электрических режимов, щающих обрабатываемое твердое тело в зоне его непрерывной сплошности ниже линии впадин шероховатости поверхности, в заключительной фазе обработки, непосредственно перед выхаживанием или в его начале.

В циклах же АИШ с $H \geq R_z$, т.е. без целенаправленного, для формирования сглаживающей микрорельеф обрабатываемой поверхности технологической наследственности, включения в завершающий их структуру этап щающих электрических режимов, завершение циклов для получения сглаженного микрорельефа обработанной поверхности с использованием эрозионного лункообразования следует проводить без тока. В том числе применяя выхаживание, и притом на глубину внедрения режущего рельефа алмазного круга в бестоковой обработке, при которой номинальный микрорельеф (рис. 2, а) все еще пересекается с эрозионным лункообразованием (рис. 2, б).

Если уровень шероховатости в выполняемой операции нормируется некоторым ограничением сверху $[R_a]$, а $R_a > [R_a]$, и притом желательно

минимизировать электрофизическую технологическую наследственность АИШ в структуре поверхностного слоя обработанной поверхности, то выхаживание в комбинации с электроразрядным воздействием на нее следует проводить в пределах $\bar{y}_i \leq [\bar{y}_i]$, $[\bar{y}_i] = 4(R_a - [R_a])$. Ситуация $\bar{y}_i < [\bar{y}_i]$ предполагает обязательное дополнительное понижение шероховатости выхаживанием после отключения технологического тока.

Теоретические исследования [10] и обширная экспериментальная практика указывают на высокую технологическую рациональность выхаживания, в особенности в технологиях АИШ [2, 3, 11]. Помимо размерно-геометрических аспектов примем здесь во внимание, что выдающимся исследователем и практиком шлифования акад. П. И. Ящерицыным с функциональных позиций упрочнения обрабатываемой поверхности выхаживание рассматривается в одном ряду с такими специальными операциями как обкатка и дорнование [12].

Эрозионное сглаживание шероховатости при АИШ, проводимое с выхаживанием при минимальном внедрении следов электрических разрядов в обрабатываемую поверхность, предполагает выполнение соотношения $H \leq [\bar{y}_i]$. Поскольку величина $[\bar{y}_i]$ предопределена R_a и заданием $[R_a]$ или $[R_z]$, то осуществимость этого соотношения обеспечивается необходимым понижением H . Частотное регулирование импульсного действия электрического тока в зоне АИШ предоставляет большие возможности для этого. Об этом свидетельствует и опыт исследования локальной объемной эрозионной деструкции металлической связки шлифовальных кругов, работающих в режиме АИШ [13].

Существенные возможности понижения H предоставляет также реализация кинематико-геометрической схемы АИШ с повышенной скоростью перемещения обрабатываемой поверхности относительно инструментальной, когда энергия электрических разрядов реализуется с удлинными и потому менее глубокими эрозионными следами. Характерным примером в этом направлении является технологическая практика внутришлифовального станка-полуавтомата модели 3М227ВРФ2 (3М227ВЭРФ2) с конструктивно обеспечиваемой частотой вращения изделия до 1200 об/мин.

Заключение. Практическая ценность. Эрозионные образования (лунки) на поверхности, обрабатываемой АИШ, существенно изменяют общую картину и показатели шероховатости по сравнению с обычным шлифованием. При этом возможен эффект эрозионного сглаживания окончательного (шлифованного) микрорельефа.

В идентичных режимных условиях алмазного шлифования, в отсутствие электроэрозионного разрушения стружек в процессе их отделения от шлифуемой поверхности и после него, в случае развитого режущего рельефа

(после правки), межзеренное пространство, по-видимому, является своего рода галтовочной миникамерой, в которой роль шлифовально-полировального инструмента, непрерывно частично удаляемого и возобновляемого, играют сколы сверхтвердого абразива и, главным образом, заторможенные стружки и продукты их диспергирования. Рабочей зоне АИШ эти явления также присущи, но в гораздо меньшей степени, что и проявляется, как правило, менее сглаженным микрорельефом обработанной поверхности.

В случае же постепенной потери остроты режущего рельефа при алмазном шлифовании без правки инструмента и затупленным кругом, зерна его рабочей поверхности с привершинными площадками износа все менее режут и все более выглаживают, связка круга все более втягивается в выглаживающий контакт с обрабатываемой поверхностью.

С практической реализацией предложенной модели, помимо собственно расширенных здесь технологических возможностей сглаживания шероховатости обрабатываемой АИШ поверхности, связывается, во-первых, сокращение времени выхаживания и всего операционного цикла АИШ до достижения заданной шероховатости, и, во-вторых, минимизация потерь развитости режущего рельефа шлифовальных кругов по сравнению с конвенциональными подходами к организации рабочих циклов АИШ.

Список использованных источников: 1. *Гуцаленко, Ю. Г.* Алмазно-искровое шлифование : обзор сорокалетия разработки харьковской научной школы физики процессов резания / *Ю. Г. Гуцаленко* // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве : Тр. 18-й междунар. науч.-практ. конф., 5-6 дек. 2012 г. – Харьков : ГП ХМЗ «ФЭД», 2012. – С. 79-88. 2. *Кобзарь, Л. Е.* Прогрессивное алмазно-искровое шлифование / *Л. Е. Кобзарь, В. А. Фадеев, Н. К. Беззубенко* // Харьков : Харьк. гос. политехн. ун-т, Харьк. науч.-производств. об-ние ФЭД, 1995. – 153 с. 3. *Беззубенко, Н. К.* Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов : Дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты / *Н. К. Беззубенко*; Харьк. гос. политехн. ун-т. – Харьков, 1996. – 468 с. 4. *Беззубенко, Н. К.* Качество поверхности деталей и инструмента при алмазно-искровом шлифовании / *Н. К. Беззубенко, Ю. Г. Гуцаленко, Н. Н. Серова* // Технологическое управление качеством поверхности деталей : Сб. науч. тр. – Киев : Асоц. технологгов-машиностроителей Украины, 1998. – С. 108-114. 5. *Гуцаленко, Ю. Г.* Влияние микроэрозионных явлений на шероховатость поверхности / *Ю. Г. Гуцаленко* // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та : Сб. науч. тр. – Вып. 65. – Харьков : ХГПУ, 1999. – С. 145-152. 6. *Гуцаленко, Ю. Г.* Модель сглаживания шероховатости поверхности при алмазно-искровом шлифовании / *Ю. Г. Гуцаленко* // Современные инновации в науке и технике : Сб. науч. тр. 4-ой междунар. науч.-практ. конф. 17 апр. 2014 г. – В 4-х т. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. – Т. 1. – С. 325-328. 7. *Гуцаленко, Ю. Г.* Расчет электроэрозии при алмазно-искровом шлифовании по данным микроскопической визуализации / *Ю. Г. Гуцаленко* // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та : Сб. науч. тр. – Вып. 66 : Новые решения в соврем. технологиях. – Харьков : ХГПУ, 1999. – С. 54-58. 8. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. Введ. 01.01.1975. Переизд. – М. : Стандартинформ, 2006. – 7 с. 9. *Намиотов, К. К.* Электроэрозионные явления : Монография / *К. К. Намиотов*. – М. : Энергия, 1978. – 456 с. 10. *Новиков, Ф. В.* Оптимизация структуры и параметров операций круглого наружного продольного глубинного шлифования / *Ф. В. Новиков, Ю. Г. Гуцаленко, С. А. Дитиненко* // Високі технології в машинобудуванні : Зб. наук. пр. НТУ «ХПІ». – 2005. –

Вип. 2 (11). – С. 262-267. **11.** Погребной, Н. А. Формирование упрочненного поверхностного слоя сталей после предварительной термофрикционной обработки и алмазно-искрового шлифования / Н. А. Погребной, Ю. А. Сизый, Ю. Г. Гуцаленко, О. А. Волков // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2007. – Вып. 73. – С. 244-250. **12.** Яцерицин, П. І. Технологічне спадкування експлуатаційних параметрів деталей машин / П. І. Яцерицин // Вісник ЖДТУ. – 2003. – № 2 (26). – С. 206-209. **13.** Гуцаленко, Ю. Г. Особенности влияния скорости резания и электрических импульсов на инструмент алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : Сб. науч. тр. XI-ой междунар. науч.-техн. конф. 19-21 мар. 2014 г.; в 4-х т. – Т. 1. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. – С. 386-390.

Bibliography (transliterated): **1.** Gutsalenko, Yu. G. "Almazno-iskrovoe shlifovanie: obzor sorokaletija razrabotki har'kovskoj nauchnoj shkoly fiziki processov rezanija". *Fizicheskie i komp'yuternye tehnologii v narodnom hozjajstve: Tr. 18-j mezhdunar. nauch.-prakt. konf. 5th-6th Dec. 2012.* Kharkov: GP HMZ "FED", 2012. Print. **2.** Kobzar', L. E., V. A. Fadeev and N. K. Bezzubenko. *Progressivnoe almazno-iskrovoe shlifovanie.* Kharkov: Kharkov State Polytech.Univ., Kharkov R&D Prod. Assoc. FED, 1995. Print. **3.** Bezzubenko, N. K. *Povyshenie jeffektivnosti almaznogo shlifovanija putem vvedenija v zonu obrabotki dopolnitel'noj jenerгии v forme jelektricheskikh razjadov. Dys. ... d-ra tehn. nauk.* Kharkov, 1996. Print. **4.** Bezzubenko, N. K., Yu. G. Gutsalenko and N. N. Serova. "Kachestvo poverhnosti detalej i instrumenta pri almazno-iskrovom shlifovanii." *Tehnologicheskoe upravlenie kachestvom poverhnosti detail: Sb. nauch. tr.* Kiev: ATMU, 1998. 108-114. Print. **5.** Gutsalenko, Yu. G. "Vlijanie mikrojerostionnyh yavlehiy na sherohovatost' poverhnosti." *Vestn. Kharkov State Polytech.Univ.* 1999. Iss. 65: 145-152. Print. **6.** Gutsalenko, Yu. G. "Model' sglajzhivaniya sherohovatosti poverhnosti pri almazno-iskrovom shlifovanii." *Sovremennye innovacii v nauke i tehnike. Sb. nauch. tr. 4th mezhdunar. nauch.-tehn. konf.* 17th Apr. 2014. Kursk: Southwest State Univ., 2014. Vol. 1. 325-328. Print. **7.** Gutsalenko, Yu. G. "Raschet jelektrojerostii pri almazno-iskrovom shlifovanii po dannym mikroskopicheskoy vizualizacii." *Vestn. Kharkov State Polytech.Univ.* 1999. Iss. 66: 54-58. Print. **8.** GOST 2789-73. *Sherohovatost' poverhnosti. Parametry i harakteristiki.* Moscow: Standartinform, 2006. Reprint. **9.** Namitkov, K. K. *Jelektrojerostionnye javlenija: Monografija.* Moscow: Энергия, 1978. Print. **10.** Novikov, F. V., Yu. G. Gutsalenko and S. A. Ditinenko. "Optimizacija struktury i parametrov operacij kruglogo naruzhnogo prodol'nogo glubinnogo shlifovanija." *Vysoki tehnologii v mashinobuduvanni: Zb. nauk. pr. NTU "KhPI".* 2005. Iss. 2: 262-267. Print. **11.** Pogrebnoj, N. A., et al. "Formirovanie uprochnennogo poverhnostnogo sloja staley posle predvaritel'noj termofrikcionnoj obrabotki i almazno-iskrovoe shlifovanija." *Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb.* Kharkov: NTU "KhPI", 2007. Iss. 73: 244-250. Print. **12.** Jazhericyn, P. I. "Tehnologichne spadkuvannja ekspluatacijnyh parametriv detalej mashin." *Visnyk ZhSTU.* 2003. No. 2: 206-209. Print. **13.** Gutsalenko, Yu. G. "Osobennosti vlijanija skorosti rezanija I jelektricheskikh impul'sov na instrument almazno-iskrovogo shlifovanija." *Sovremennye instrumental'nye sistemy, informacionnye tehnologii i innovacii. Sb. nauch. tr. XI-oy mezhdunar. nauch.-tehn. konf.* 19th -21th Mar. 2014. Kursk: Southwest State Univ., 2014. Vol. 1. 386-390. Print.