

УДК 621.923

**В.В. ГУСЕВ** (д-р. техн. наук, проф., vladilgusev@mail.ru )  
**Л.П. КАЛАФАТОВА** (д-р. техн. наук, проф., lpk04nov@mail.ru)

**А.Л. МЕДВЕДЕВ** (ассистент)

**Д.Ю. СЕМЕНЮК** (аспирант)

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

## **УПРАВЛЕНИЕ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КЕРАМИКИ**

В статье рассмотрены закономерности изменения режущей способности алмазных кругов при шлифовании технической керамики и при их правке свободным абразивом. Скорость восстановления режущей способности определяется интенсивностью линейного износа шлифовального круга при правке, которая зависит от режима процесса правки.

**Ключевые слова:** Техническая керамика, шлифование, износ алмазных кругов, правка свободным абразивом, режим правки, режущая способность инструмента

### **Введение**

В настоящее время изделия из технической керамики (ТК) применяются практически во всех отраслях промышленности. В аэрокосмической технике, например, для производства обтекателей ракет используют такие виды материалов как кварцевая и алюмосиликатная керамики, ситаллы - разновидность стеклокерамики. Из различных видов керамики также производят тигли, муфели под электропечи, футеровки индукционных печей, лабораторную термостойкую и коррозионно-стойкую посуду, изоляторы, высоковольтные предохранители, износостойчивые элементы машин, узлы трения, мелющие тела, режущие инструменты и т.д. В связи с разнообразием изделий требования, предъявляемые к их эксплуатационным характеристикам, также различны. Это, прежде всего, устойчивость к большим нагрузкам, износостойчивость, высокие прочностные характеристики, стойкость к резким перепадам температур (вплоть до термоудара), высокие требования к аэродинамике и т.д.

Техническая керамика относится к категории труднообрабатываемых хрупких неметаллических материалов и механически обрабатывается преимущественно алмазным шлифованием. Технологические процессы механической обработки изделий из ТК предусматривают выполнение большого объема получистовых и чистовых операций – алмазного шлифования, полирования, алмазной доводки. Продолжительность финишных операций зависит от глубины и структуры дефектного слоя, который образуется на предыдущих технологических операциях и переходах и должен быть сведен к минимуму в готовом изделии, так как его наличие ухудшает эксплуатационные характеристики изделий. Таким образом, эффективность процессов механической обработки ТК связана с повышением производительности черновых операций при условиях обеспечения дефектного слоя такой глубины и структуры, которые гарантируют минимальную продолжительность финишных операций.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований [1] свидетельствуют о том, что при абразивной обработке хрупких материалов, такие параметры дефектности обработанной поверхности как размеры, плотность, глубина

проникновения дефектов, большие поверхностные напряжения в значительной степени определяются уровнем и направлением силового воздействия на материал при резании. Важным фактором, влияющим на ситуацию в зоне резания, является состояние рабочей поверхности алмазных кругов и их режущая способность, которая постоянно меняется во время обработки ТК [1, 2]. Так, например, при черновом шлифовании ситаллов алмазные круги через 5 – 10 минут эксплуатации теряют свою режущую способность, что связано с повышенными твердостью и прочностью обрабатываемого материала.

Состояние рабочей поверхности кругов (РПК) определяется геометрической формой вершин зерен и плотностью их распределения по глубине рабочего слоя инструмента. Износ зерен при обработке изделий из керамики и потеря режущей способности кругов сопровождается значительным ростом сил резания, особенно радиальной составляющей, которая может возрасти в 2-4 раза по сравнению с работой выправленным кругом. При этом увеличивается дефектность поверхностного слоя обрабатываемых изделий. Таким образом, при достижении силы резания (ее нормальной составляющей) предельного значения, определяемого из условий обеспечения требуемых параметров качества поверхностного слоя изделий, необходимо осуществлять управляющее воздействие на рабочую поверхность круга, восстанавливая его режущую способность, т.е., производить правку инструмента.

Вопросам правки алмазных шлифовальных кругов посвящено значительное количество исследований [3, 4]. В данное время наиболее известны следующие основные способы правки: электроэрозионные, электрохимические способы, основанные на электрическом и электрохимическом влиянии на связку алмазных кругов, способы механической правки кругов. Но, несмотря на общепризнанные достоинства, отмечаемые авторами, необходимо отметить и присущие им недостатки. Например, при правке способом электрической эрозии обязательна модернизация технологического оборудования, затруднена его реализация в производственных условиях, высока энергоемкость процесса, возникают сложности при соблюдении правил техники безопасности в условиях повышенной влажности в зоне работы станочника и наличия в ней же источника электрических разрядов большой силы тока, невозможность использования способа для кругов на неметаллической связке. Альтернативой электроэрозионному способу правки являются многочисленные механические способы правки, определяемые многообразием операций механического воздействия правящего инструмента на алмазный инструмент. Все эти способы направлены на исправление геометрии инструмента, который подвергается правке, и создание необходимого микропрофиля РПК.

Сотрудниками кафедры металлорежущих станков и инструментов ДонНТУ был разработан новый способ правки алмазных шлифовальных кругов (ШК) – правка свободным абразивом [5,6]. Главным отличием такой правки является целенаправленное внешнее воздействие абразивных зерен на связку ШК, осуществляющих как удаление изношенных и высвобождение острых алмазных зерен на режущей поверхности круга, так и исправление геометрии (макропрофиля) кругов.

Целью настоящего исследования является определение основных закономерностей изменения режущей способности алмазных шлифовальных кругов при правке свободным абразивом.

### **Основное содержание работы**

Для исследований использовался алмазный круг 1А1 200x76x10 250/200 А2 -4-М2-01, подвергавшийся периодической правке свободным абразивом [5], с

использованием специального устройства для правки. Правка осуществлялась следующим образом [6]. К шлифовальному кругу, который вращается на рабочей скорости, подводят до соприкосновения чугунный притир, повторяющий профиль правящегося круга. Притиру придается возвратно-поступательное движение вдоль образующей инструмента со скоростью 0,015-0,0175 мм/с. В зону контакта инструмента и притира подается абразив в условно свободном состоянии – в виде бруска, состоящего из 70% абразива и 30% гипса, который, разрушаясь обеспечивает подачу абразива в зону между притиром и РПК. В качестве правящего абразива использовался карбид кремния зеленого F 60 (размер зерна 250-315 мкм). Интенсивность вышлифовывания связки инструмента и материала притира определяется размером абразивных частиц, объемом подаваемого абразива и величиной зазора между инструментом и притиром. В свою очередь, зазор в процессе правки формируется автоматически при заданных значениях подачи притира, скорости вращения ШК и условий подачи абразива.

Для оценки изменений в состоянии РПК при правке производились измерения режущей способности круга  $W$  и его радиального износа  $\Delta L$ . Режущая способность ШК измерялась при реализации упругой схемы шлифования, путем поджатия образца из ситалла АС-370 ( $K_{1c}=2,1\pm 0,1$  МПа·м<sup>1/2</sup>) к поверхности ШК с постоянным усилием 41,5 Н. Измерения радиального износа ШК производились в 6-ти точках при помощи специального приспособления по разработанной методике [6]. Погрешность определения величины радиального износа не превышала 3 мкм.

При проведении экспериментальных исследований изучалось изменение режущей способности ШК  $W$  и его радиального износа  $\Delta L$  в зависимости от времени правки  $\tau$  (60-120 с) при определенных скоростях подачи притира и абразивного бруска.

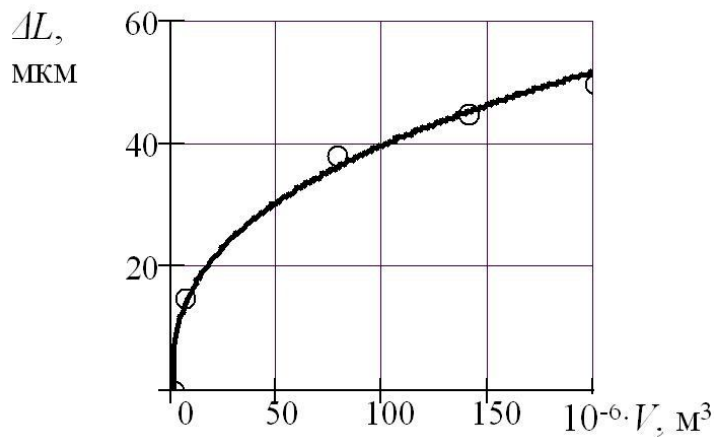


Рис. 1. Зависимость линейного износа  $\Delta L$  алмазного круга от объема удаленного материала при шлифовании ситалла АС-370

керамики  $V$ , удаленного с поверхности заготовки шлифовальным кругом, возрастает его линейный износ. При этом зависимость износа шлифовального круга от объема удаленного материала имеет нелинейный характер, который адекватно может быть описан степенной зависимостью. В начальный период работы круга ( $V=50\dots 100$  м<sup>3</sup>) интенсивность износа наибольшая. Это связано с активным разрушением зерен круга, наиболее выступающих из связки, на которые приходятся максимальные сечения

Степень износа алмазного абразивного инструмента при шлифовании керамики и уровень режущей способности РПК в значительной степени зависят от объема удаленного (сошлифованного) материала. На рис. 1 приведены зависимости линейного износа  $\Delta L$  алмазного круга от объема сошлифованного материала  $V$  при обработке образцов ситалла АС-370.

Как видно из представленного графика, при увеличении объема технической

единичного среза обрабатываемого материала, что сопровождается возникновением максимальных сил резания.

При работе алмазного круга имеют место четыре вида процессов, оказывающих влияние на его работоспособность и состояние РПК: истирание зерен об обрабатываемую поверхность с образованием площадок износа; хрупкое разрушение зерен микроскалыванием; вырывание зерен из связки; вышлифовывание связки стружкой, которая совместно с СОТС образует абразивный поток. С увеличением объема удаленного кругом обрабатываемого материала уменьшается глубина РПК, распределение вершин зерен по высоте рабочей поверхности изменяется и приобретает правостороннюю асимметрию, площадки износа на поверхности зерен возрастают [6], снижается уровень режущей способности круга (см. рис.2.а). Все это приводит к увеличению составляющих силы резания. Износ РПК приводит к уменьшению коэффициента абразивного резания (рис. 2, б), что может быть связано с ростом площадок износа на алмазных зернах. Нормальная составляющая силы резания  $P_y$  возрастает быстрее тангенциальной  $P_z$ , и как следствие, уменьшается коэффициент абразивного резания  $K_a = P_z/P_y$  (рис. 2, б). Уменьшение данного коэффициента сопровождается увеличением дефектов материала, образующихся в процессе шлифования.

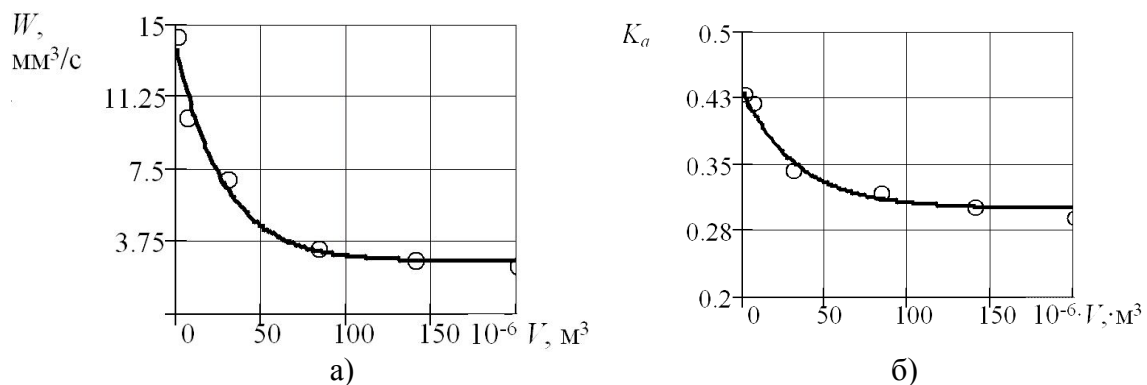


Рис. 2. Влияние объема удаленного материала припуска  $V$  при шлифовании ситалла АС-370 на изменение: а – режущей способности алмазного круга  $W$ ; б – коэффициента абразивного резания

Плотность  $f(l_o)$  распределения дефектов обработки по размерам  $l_o$  для ситаллов имеет вид:

$$f(l_o) = \frac{r_o + 1}{l_{o, \max}} \left( 1 - \frac{l_o}{l_{o, \max}} \right)^{r_o}, \quad 0 \leq l_o \leq l_{o, \max}, \quad (1)$$

$$l_{o, \max} = A_1 (HV/K_{1c})^2, \quad r_o = A_2 \cdot P_y \left( V_{\kappa, t}, V_{\partial}, S, H_V/K_{1c} \right)^{-0.5+0.07 \cdot (HV/K_{1c})},$$

где  $K_{1c}$  – трещиностойкость материала; Па·м<sup>1/2</sup>,  $HV$  – твердость по Виккерсу, Па;

$A_1$ ,  $A_2$  - коэффициенты пропорциональности, определяющие, соответственно, зависимость максимальной полудлины обработочной трещины  $l_{0max}$  и показатель степени  $r_0$ .

По мере удаления материала припуска на заготовке при шлифовании керамики происходит увеличение нормальной составляющей силы резания на зерне. Ее значения превышают критическую величину, при которой образуются медианные трещины, формирующие дефектный слой. Критическое значение силы резания на зерне  $P_{КЗ}$  можно определить из зависимости [7]:

$$P_{КЗ} = \kappa_{\phi} \cdot K_{1c}^4 / HV^3, \quad (2)$$

где  $\kappa_{\phi} = 2,17 \cdot 10^4$  – коэффициент, учитывающий вид обрабатываемого материала и условия обработки.

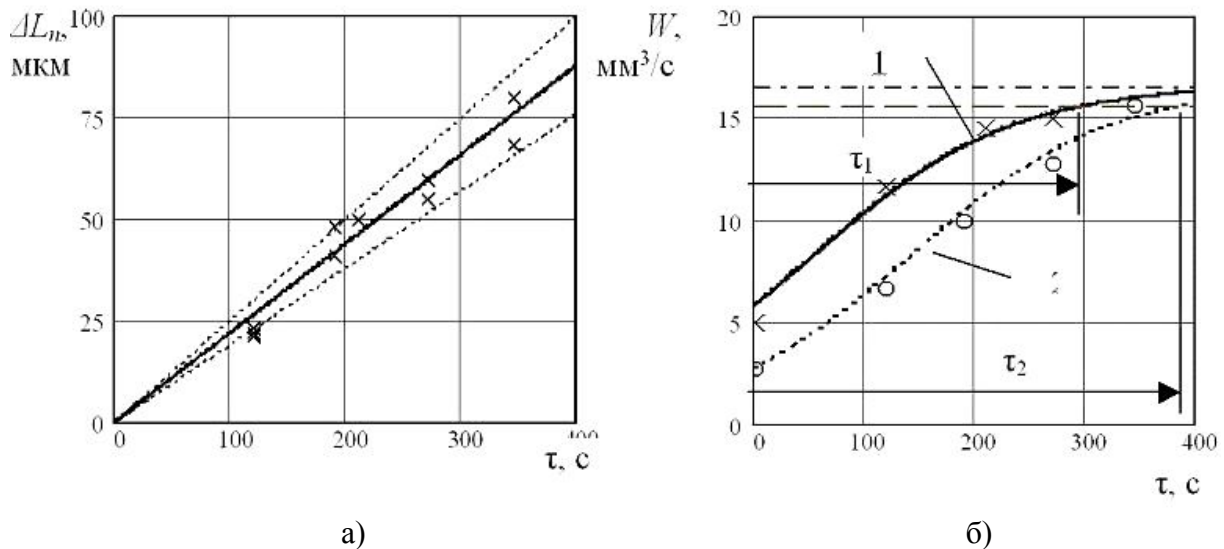


Рис.3. Влияние времени правки  $\tau$  свободным абразивом на: а – линейный износ ШК; б – текущую режущую способность ШК для его различной начальной режущей способности  $W_n$  перед правкой: 1 –  $W_n = 5 \text{ мм}^3/\text{с}$ ; 2 –  $W_n = 2,75 \text{ мм}^3/\text{с}$

Для восстановления режущей способности алмазного ШК был использован способ правки свободным абразивом. Как показали исследования, износ круга, сопровождающий процесс правки, адекватно описывается линейной зависимостью (рис. 3, а) при неизменных скоростях подачи притира и абразивной суспензии. На рисунке пунктирной линией показаны границы доверительного интервала при уровне значимости 0,1. По мере удаления алмазоносного слоя режущая способность ШК возрастает (рис. 3, б), достигая предельного значения  $W_{np}$  при времени правки ( $\tau_1$  или  $\tau_2$ ), зависящего от начального значения режущей способности круга перед правкой  $W_n$ , обусловленного степенью его износа.

Изменение режущей способности круга  $W_y$  от времени правки  $\tau$  может быть

адекватно описано следующей зависимостью:

$$W_y(\tau) = \frac{1}{a \cdot \exp(-b\tau - c)} + \frac{1}{W_{np}}, \quad (3)$$

где  $a$  - коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала и характеристики инструмента, определяет нижнюю границу режущей способности ШК при принятых условиях обработки;

$b$  - коэффициент, зависящий от технологического регламента правки, определяет интенсивность правки;

$c$  - коэффициент, зависящий от исходного состояния РПК перед правкой (степени его износа), определяет длительность времени правки, необходимую для достижения кругом предельной режущей способности;

$W_{np}$  - предельная режущая способность круга при принятых условиях ее определения, зависящая от характеристики круга и физико-механических свойств обрабатываемого материала.

Параметры  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $W_{np}$  определяются экспериментальным путем для конкретных условий обработки и правки.

Предельная режущая способность используемого ШК при обработке ситалла АС-370 и среднем давлении 0,4 МПа на площади контакта обрабатываемого образца с кругом (штрихпунктирная горизонтальная линия на рис. 3, б) составляет  $W_{np} = 16.4$  мм<sup>3</sup>/с. Примем в качестве критерия, ограничивающего продолжительность правки, время достижения режущей способности круга значения  $0,95 W_{np}$  (на рисунке горизонтальная штриховая линия). Назовем это значение граничным значением режущей способности круга.

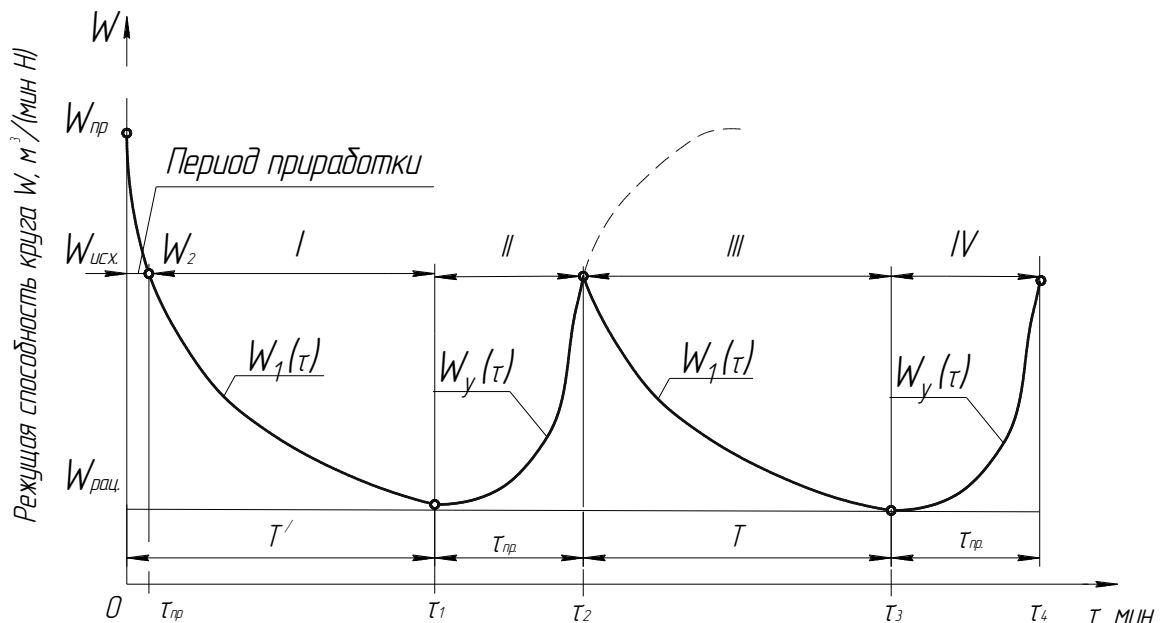


Рис. 4. Изменение режущей способности круга при шлифовании с периодическими управляющими воздействиями на РПК при правке способом свободного абразива

Таким образом, необходимо найти рациональный период времени между правками ШК при обработке технической керамики. Представим график, описывающий изменение режущей способности круга за исследуемое время обработки при шлифовании с периодическими воздействиями на РПК (правка свободным абразивом), осуществляемыми одновременно с обработкой детали, как чередование определенных периодов (рис. 4).

Промежуток времени  $0 - \tau_1$  представляет собой длительность работы предварительно заправленного круга  $T'$  до начала правки свободным абразивом с целью восстановления режущей способности РПК. Он содержит период приработки  $0 - \tau_{np}$ , характеризуемый быстрой потерей режущей способности кругом за счет выпадения из связки наиболее выступающих зерен, и период I длительностью  $T' - \tau_{np}$ . В этот период режущая способность круга продолжает уменьшаться, но с меньшей интенсивностью.

Изменения текущей режущей способности круга  $W_1(\tau)$  в периоды I и III на промежутках  $\tau_{np} - \tau_1$ ,  $\tau_2 - \tau_3$  описываются экспоненциальной зависимостью [8]:

$$W_1(\tau) = W_{рац} + \Delta W \cdot \exp(-\beta_g \cdot \tau), \quad (4)$$

где  $W_{рац}$  – уровень рациональной режущей способности круга,  $\text{мм}^3/\text{мин}$ , представляющая собой ее допустимое значение, исходя из обеспечения заданного качества изделия по параметрам дефектности, в соответствии с зависимостями 1 и 2;

$\Delta W$  – амплитуда снижения режущей способности круга,  $\text{мм}^3/\text{мин}$ ;

$\Delta W = W_n - W_{рац}$ , где  $W_n$  – исходная режущая способность круга,  $\text{мм}^3/\text{мин}$ ;

$\beta_g$  – эмпирический коэффициент,  $1/\text{мин}$ ;

$\tau$  – продолжительность шлифования, мин.

В промежутки времени  $\tau_1 - \tau_2$  и  $\tau_3 - \tau_4$  (периоды II и IV) режущая способность РПК увеличивается в результате воздействия на нее свободного абразива, что представлено зависимостью (3).

Это говорит о том, что объем удаленного алмазоносного слоя с круга при правке прямо пропорционален времени воздействия зерен свободного абразива на РПК. Для сокращения времени восстановления режущей способности воздействие свободного абразива на рабочую поверхность круга желательнее осуществлять при рациональных для данных условий параметрах режима правки (а именно, скоростей притира и абразива). Воздействие свободного абразива на РПК необходимо прекращать, когда режущая способность круга достигнет определенного, заданного уровня, что позволит исключить чрезмерный расход алмазов и нерациональный расход правящего абразива.

В качестве критерия выбора условий периодического воздействия на РПК, может быть использована удельная себестоимость обработки  $C_{уд}$ , представляющая собой отношение себестоимости процесса шлифования  $C_{шл}$  к количеству материала припуска  $V_m$ , удаленного с обрабатываемой заготовки за это же время  $C_{уд} = C_{шл}/V_m$ . В структуру  $C_{шл}$  помимо прочих расходов входят затраты на правку и расход алмазного инструмента, сопровождающий процесс управления режущей способностью РПК.

Эффективность предложенного способа может быть подтверждена следующим примером. Применение описанного способа правки, реализуемого на разработанном устройстве при шлифовании многогранных неперетачиваемых пластин из минералокерамики кругами на бакелитовой связке позволило при минимальном расходе алмазоносного слоя инструмента увеличить количество пластин, выпускаемых

между правками, по сравнению со способом правки кругов алмазными брусками на 50% при улучшении качества обрабатываемой поверхности в 1,5 раза при минимальных дополнительных затратах.

### Выводы

Высокоэффективные способы правки алмазного инструмента при шлифовании труднообрабатываемых материалов являются неотъемлемой частью технологического процесса их обработки. В качестве такого способа правки при шлифовании кругами с различными типами связок может быть эффективно использован способ на основе применения свободного абразива. Этот способ позволяет интенсифицировать процесс правки с минимальной затратой абразивного материала. Благодаря направленному и более щадящему воздействию абразивного порошка на режущие алмазные зерна, подаваемого в определенную зону контакта притира и круга, этот метод более продуктивен и эффективен по сравнению с другими видами правки абразивными инструментами и более универсален по сравнению с электроэрозионным способом правки, так как может быть использован для правки алмазных кругов на любой связке. Необходимы дальнейшие исследования по выбору рациональных условий правки, установления связи между режущей способностью круга и формированием структуры дефектного слоя.

### Список литературы

1. Калафатова Л.П. Особливості механічної обробки виробів із крихких неметалевих матеріалів / Л.П.Калафатова // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Зб. наук. праць: к 2-х ч. – 2007. – Ч. 1. – Вип. 5. – С. 72-87.
2. Гусев В.В., Калафатова Л.П. Обеспечение эксплуатационных характеристик изделий из конструкционной керамики на стадии их производства/В.В. Гусев, Л.П. Калафатова // Сучасні технології у машинобудуванні. Збірник наукових статей; за заг. ред. А.І. Грабченка. – Харків., 2006. – Том 2. – С. 334-346.
3. Чачин В.Н., Дорофеев В.Д. Профилирование алмазных шлифовальных кругов / В.Н. Чачин, В.Д. Дорофеев. – Мн: Наука и техника, 1974. – 160 с.
4. Матюха П.Г. Алмазне шліфування з електроерозійними керуючими діями на робочу поверхню круга/ П.Г. Матюха, В.В. Полтавець. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – 164 с.
5. Деклараційний патент на корисну модель 3838 UA, 7 B24B53/00 Спосіб правки абразивного інструмента / Калафатова Л.П., Поїзд С.А., Шевченко В.А. (Україна) – №2004032137/К. Заявлено 23.03.04; Опубл. 15.12.04, Бюл. №12, 2004. – 4 с.
6. Гусев В.В. Закономерности изменения режущей способности алмазных шлифовальных кругов при правке свободным и полусвязанным абразивом /В.В. Гусев, А.Л. Медведев // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2009. – Вип. 6 (154). – С.41-48.
7. Морозов Е.М. Контактные задачи механики разрушения/ Е.М. Морозов, М.В. Зернин. – М.: Машиностроение, 1999. – 544 с.
8. Матюха П.Г. Определение оптимального интервала времени между электроэрозионными воздействиями на рабочую поверхность круга при алмазном шлифовании твердого сплава/ П.Г. Матюха, В.В. Полтавец, В.Б. Стрелков // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наук. праць. – Донецьк, 2006. – Вип. 31. – С. 203-209.



Рецензент: Матюха П.Г.

Надійшла до редколегії: 15.04.2011р.

**ГУСЄВ В.В.  
Л.П. КАЛАФАТОВА  
А.Л. МЕДВЕДЄВ  
Д.Ю. СЕМЕНЮК**

Донецький національний технічний університет

**КЕРУВАННЯ РІЗАЛЬНОЮ ЗДАТНІСТЮ АЛМАЗНИХ КРУГІВ ЯК ФАКТОР  
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ШЛІФУВАННЯ ВИРОБІВ ІЗ КЕРАМІКИ**

У статті розглянуті закономірності зміни різальної здатності алмазних абразивних кругів при шліфуванні технічної кераміки і при їх правці вільним абразивом. Швидкість відновлення різальної здатності визначається інтенсивністю лінійного зносу шліфувального круга під час правки, яка залежить від режимів процесу правки.

**Технічна кераміка, шліфування, знос алмазних кругів, правка вільним абразивом, режим правки, різальна здатність інструменту**

**V.V. GUSEV  
L.P. KALAFATOVA  
A.L. MEDVEDEV  
D.Y. SEMENYUK**

Donetsk National Technical University

**CONTROL OF CUTTING CAPACITY OF DIAMOND WHEELS AS A FACTOR  
THAT INCREASING EFFICIENCY OF GRINDING OF CERAMICS PRODUCTS**

The article describes the regularity in cutting capacity of diamond wheels during grinding of technical ceramics and dressing by free abrasive. The rate of regeneration of cutting capacity is determined by intensity of linear wear of grinding wheel during dressing, which depends on dressing conditions.

**Technical ceramics, grinding, wear of diamond wheels, dressing by free abrasive, dressing mode, tool cutting capacity**