

В.В. Максаров, А.Д. Халимоненко

# ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖУЩЕЙ КЕРАМИКИ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ГОРНЫХ МАШИН

Рассмотрены вопросы прогнозирования работоспособности режущего инструмента, оснащенного сменными многогранными пластинами из оксидно-карбидной «черной» керамики, которые применяются для тонкой обработки прецизионных поверхностей деталей горных машин. Прогнозирование проводилось за счет определения микроструктурных параметров и пористости керамического инструментального материала, влияющих на его режущие свойства. Параметры определялись на основе корреляционной зависимости от удельного электрического сопротивления сменных керамических пластин. Предложен способ выбора режущих керамических пластин для заданных условий обработки. Средний размер зерен и величина пористости керамического инструментального материала непосредственно влияет на прочность инструмента. По результатам проведенных исследований сделан вывод, что чем больше величина удельного электрического сопротивления у режущей керамики, тем больше прочность и зависящая от нее работоспособность инструмента, оснащенного керамикой. Предложенный способ позволяет определить ресурс работоспособности режущего инструмента, оснащенного режущей керамикой, методом неразрушающего контроля и, соответственно, гарантировать проведение обработки прецизионных поверхностей деталей горных машин без брака.

Ключевые слова: режущая керамика, микроструктурные параметры, прочность, пористость материала, работоспособность инструмента, удельное электрическое сопротивление.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-56-64

## Введение

Одним из значимых факторов в современном машиностроении является совершенствование технологии производства, заключающееся в широком применении новых технологий механической обработки, обеспечивающих многократное повышение производительности труда, качества, точности и экономично-

сти изготовления деталей машин, в том числе и для горной техники.

Технология изготовления точных деталей горных машин, таких как валы, оси, штоки, обусловлена требованиями к точности детали по всем их параметрам, включая точность размеров, формы и взаимного расположения поверхностей, а так же шероховатость поверхности.

Обеспечение заданного качества прецизионных поверхностей деталей машин решается в типовых технологических процессах механической обработки заготовок при помощи процесса шлифования. Шлифование является одной из наиболее эффективных операций при обработке деталей машин. Однако, наряду со многими положительными факторами, шлифование, как процесс, имеет ряд существенных недостатков, которые необходимо учитывать при дальнейшей эксплуатации деталей в составе узлов или агрегатов горных машин. К таким недостаткам относятся шлифовальные прижоги (участки с пониженной твердостью) и микротрешины, возникающие в результате перегрева детали в процессе обработки. В некоторых случаях при шлифовании возможно образование зон вторичной закалки, под которыми располагаются слои отпущеного металла. В поверхностном слое повышается вероятность возникновения напряжений растяжения, которые могут вызвать ускоренный износ и разрушение деталей в процессе их эксплуатации.

Одним из решений данной проблемы является введение в технологию обработки заготовок деталей новых инструментальных материалов, позволяющих заменить шлифование лезвийной обработкой и обеспечивающих заданные параметры качества деталей при высокой производительности. Таким образом, можно сделать вывод, что особенностью современного производства является применение новых инструментальных материалов, обладающих высокими режущими свойствами. К таким материалам относится режущая керамика.

Главными причинами применения режущей керамики при изготовлении прецизионных элементов деталей горных машин, являются высокая эффективность обработки, увеличение ресурса работы инструмента, уменьшение затрат за счет

замены шлифовальных операций обработкой резанием и сокращение времени обработки за счет значительного увеличения скорости резания. Кроме этого с помощью режущего инструмента, оснащенного керамикой, можно обрабатывать как закаленные стали, так и другие труднообрабатываемые материалы.

Имеется достаточно большое количество керамических материалов, применяемых в качестве инструментальных. В данной работе внимание акцентировано на оксидно-карбидной «черной» керамике — материале, которой достаточно широко применяется на предприятиях машиностроительного комплекса и поэтому может служить отправной точкой для исследования работоспособности прочих керамических режущих материалов.

На работоспособность керамического инструмента, зависящую, прежде всего, от прочности, помимо прочих факторов, большое влияние оказывают микроструктурные параметры и пористость керамического материала. Известно, что чем меньше размер зерен и пористость инструментального материала, тем лучше режущие свойства и работоспособность инструмента, полученного при помощи порошковой металлургии [3, 4]. Причем данный фактор практически не зависит от того, каким из методов был получен инструментальный материал — горячим прессованием, спеканием и т.п. — процент пористости материала можно уменьшить, но полностью избавиться от пор не удается. Это в полной мере относится ко всем инструментам, изготовленным из керамики, вне зависимости от ее компонентов и структурного состава.

Таким образом, одним из решений проблемы прогнозирования работоспособности керамического инструмента является определение функциональной зависимости режущих свойств керамики, например, прочности, от пористости

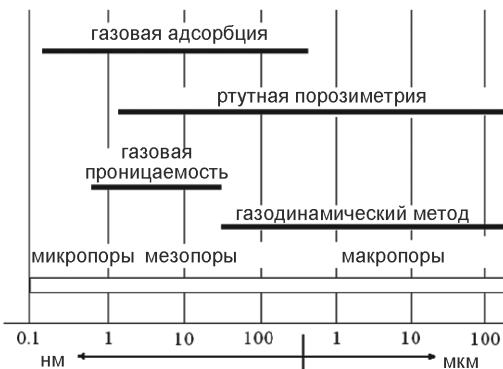


Рис. 1. Методы измерения пористости материалов в зависимости от типа и размеров пор

материала и его микроструктурных параметров.

Любой керамический материал, в том числе и режущая оксидно-карбидная керамика — это, как правило, сочетание твердого вещества с пустотами (порами). Объем пор, их характер распределения и размеры оказывает значительное влияние на ряд свойств керамических материалов. Так, например, прочность керамики зависит не только от общей пористости, но и от размера пор и равномерности их распределения по площади поверхности.

С увеличением пористости прочность керамики уменьшается за счет увеличения дефектности структуры и снижения прочности связей. Поры в керамике имеют разнообразную форму, очертания, могут быть неравномерно распределены по объему, поэтому полную характеристику пористости получить чрезвычайно трудно. Несмотря на разнообразие форм, поры можно подразделить на закрытые (недоступные для проникновения в них жидкости и газа) и открытые, которые в свою очередь делятся на тупиковые (заполняемые жидкостью и газом, но не влияющие на проницаемость керамики) и канaloобразующие (открытые с обоих концов поры, создающие поровые каналы).

Существует несколько основных подходов к измерению пористости и анали-

зу структуры поверхности исследуемого материала. Основными из них являются метод газовой адсорбции (физической и химической), метод ртутной проникающей порозиметрии, газодинамический метод и др.

Каждый из этих методов показывает максимальную эффективность при измерении пористости материала в строго определенном диапазоне (рис. 1). Поэтому выбор способа определения пористости зависит от структуры материала, а также от типа и формы пор.

Поскольку прямые методы измерения пористости керамических материалов чрезвычайно сложны, измерительное оборудование достаточно дорого, то этот показатель часто оценивают путем определения других свойств, непосредственно связанных с пористостью. В качестве такого метода предлагается оценка пористости керамического материала, по корреляционной зависимости от величины удельного электрического сопротивления пластин из режущей керамики.

### **Методика исследований и обсуждение результатов**

В начале исследований, проводимых для определения прочности оксидно-карбидной керамики, необходимо было выполнить металлографические исследования, которые позволили бы выявить

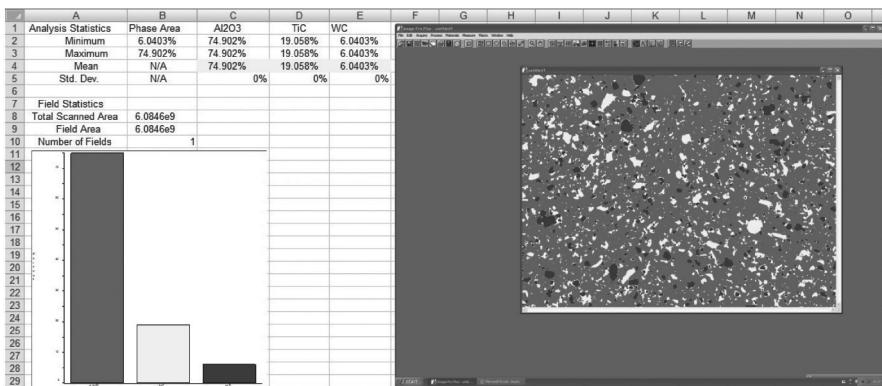


Рис. 2. Процентное соотношение фаз оксидно-карбидной керамики

микроструктурный состав керамики, определить наличие пор и их количество.

Полученные при металлографических исследованиях данные (рис. 2) позволили установить, что современная оксидно-карбидная керамика марки ВОК63 содержит  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 75\% + (\text{Ti}, \text{W}, \text{Mo})\text{C} - 25\%$  [1, 6].

Для подтверждения наличия пористости структура режущей керамики исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа (рис. 3). Как видно из данного изображения, у исследуемого образца имеются поры различного размера и структуры. Известно, что более пористая керамика имеет больший размер зерен (порядка 3...4 мкм) по сравнению с обычной (без пор) керамикой (порядка 1...2 мкм). Данные для исследуемого образца керамики совпадают с рядом литературных данных [3, 4].

В лабораторных условиях для определения количества и размеров пор керамического материала, размер которых составляет 0,1...10 нм, используются методы, применение которых в производственных условиях затруднено. Пористость керамики можно оценить при помощи электронного микроскопа, а саму керамическую пластину для исследования следует предварительно особым образом тщательно подготовить, что занимает длительное время. Для решения

поставленной проблемы предлагается использовать корреляционную зависимость пористости режущей керамики от прочности, определяемую через величину удельного электрического сопротивления материала керамической пластины.

Для определения прочности режущих керамических пластин, обладающих определенным процентом пористости, было отобрано несколько образцов сменных многогранных пластин из режущей керамики одной марки (ВОК63), каждый из которых обладал различным значением удельного электрического сопротивления. Образцы керамических пластин были разделены на две группы. В первую группу попали образцы, которые имели параметры удельного электрического сопротивления  $R \approx 10 \text{ Ом}$ , во вторую группу был отобраны образцы, которые имели параметры удельного элект-

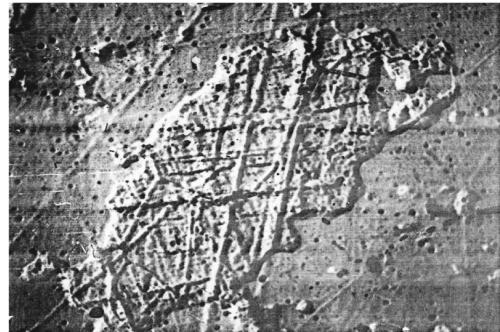


Рис. 3. Поры оксидно-карбидной керамики

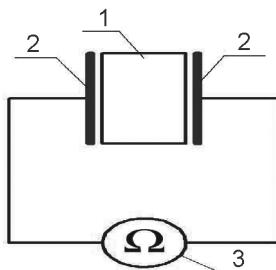


Рис. 4. Схема определения удельного электрического сопротивления керамических пластин

рического сопротивления  $R \approx 100$  Ом. Параметры удельного электрического сопротивления керамических пластин были определены с высокой степенью точности при помощи ртутно-контактного метода (рис. 4) [6, 7].

Удельное электрическое сопротивление керамической пластины (1) определялось при помощи измерительного прибора — омметра (3), соединенного с пластиной при помощи ртутных контактов (2).

Для определения прочностных характеристик режущих керамических пластин каждый из образцов был подвергнут воздействию, имитирующему процессы, сопровождающие обработку металлов резанием. Образцы керамических пластин подвергли механическому воздействию под нагрузкой равной  $P = 3 \cdot 10^3$  кг, что позволило смоделировать состояние режущей пластины, подвергнутой процессу деформации при сжатии, возникающему при обработке заготовок деталей машин. После воздействия нагрузки образцы пластин из режущей керамики были подвергнуты температурному воздействию равному  $T = 600$  °C, моделирующему нагрев режущей керамики при обработ-

ке заготовок. Нагрев керамических образцов производился в термошубе, на граничном контакте с которой была установлена хромель-копелевая термопара, позволяющая с достаточной степенью точности произвести оценку температурного воздействия на материал исследуемой режущей пластины.

Прочность керамических пластин оценивалась при помощи ее зависимости от пористости по формуле, предложенной известным специалистом в области порошковой металлургии М.Ю. Бальшиным [3, 4]:

$$\sigma = \sigma_c (1 - \Pi)^T, \quad (1)$$

где  $\sigma_c$  — прочность бесспористого или малопористого тела, для режущей оксидно-карбидной керамики марки ВОК63 величина  $\sigma_c = 322$  кг/м<sup>2</sup>,  $T$  — показатель степени, для данных условий  $T = 3$ ,  $\Pi$  — пористость, %.

Полученные при проведении моделирования процесса резания керамическим инструментом результаты, приведены в табл. 1.

Полученные результаты позволили построить графические зависимости, связывающие параметры удельного электрического сопротивления керамических режущих пластин с пористостью ( $\Pi$ ) и прочностью ( $\sigma$ ) керамического материала. Графические зависимости удельного электрического сопротивления оксидно-карбидной режущей керамики, у которой значения удельного электрического сопротивления приближаются к величине 100 Ом, от пористости и прочности этого материала в исходном состоянии  $R_0 = f(\Pi, \sigma)$ , после воздействия нагрузки  $R_p = f(\Pi, \sigma)$  и после температурного воз-

Таблица 1

Исходное состояние образца			Состояние образца под воздействием нагрузки				Состояние образца под воздействием температуры			
$R$ , Ом	$\Pi$ , %	$\sigma$ , кг/м <sup>2</sup>	$R$ , Ом	$P$ , кг	$\Pi$ , %	$\sigma$ , кг/м <sup>2</sup>	$R$ , Ом	$T$ , °C	$\Pi$ , %	$\sigma$ , кг/м <sup>2</sup>
10	12	218	12	$3 \cdot 10^3$	16	190	11	600	14	202
100	8	240	103	$3 \cdot 10^3$	11	236	102	600	10	238

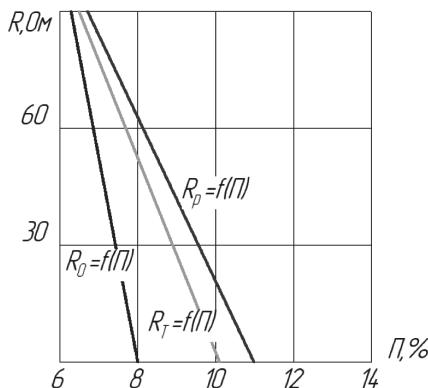


Рис. 5. Графические зависимости удельного электрического сопротивления керамики от пористости в исходном состоянии  $R_0 = f(\Pi)$ , после воздействия нагрузки  $R_p = f(\Pi)$  и после температурного воздействия  $R_T = f(\Pi)$

действия  $R_T = f(\Pi, \sigma)$  представлены на рис. 5 и 6.

Силовые воздействия, возникающие в процессе резания, приводят к увеличению значений удельного электрического сопротивления керамического материала и возрастанию процента его пористости. Изменения, сопровождающие процесс резания, в виде температурного нагрева также приводят к незначительному увеличению значений удельного электрического сопротивления керамического материала и возрастанию процента его пористости, но в меньшей степени, чем под нагрузкой.

Аналогичные изменения по прочности и пористости претерпевали все образцы пластин из режущей керамики, вне зависимости от величины их удельного электрического сопротивления, од-

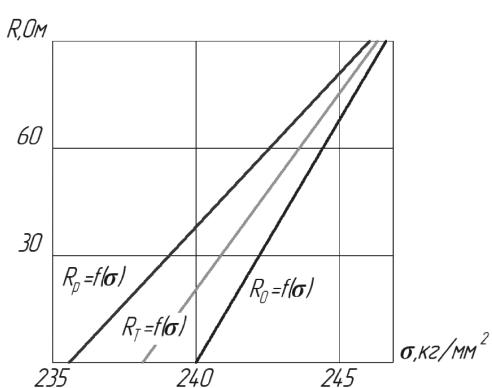


Рис. 6. Графические зависимости удельного электрического сопротивления керамики от прочности в исходном состоянии  $R_0 = f(\sigma)$ , после воздействия нагрузки  $R_p = f(\sigma)$  и после температурного воздействия  $R_T = f(\sigma)$

нако, при одних и тех идентичных внешних воздействиях большим количественным отличиям были подвержены образцы керамических пластин, у которых значения удельного электрического сопротивления приближались к 10 Ом. Керамические пластины, обладающие значениями удельного электрического сопротивления близкими к 100 Ом, имеют относительно малую пористость, а в случае температурного и силового воздействий, сопровождающих процесс резания, их прочность оказывается больше, чем у керамических пластин с относительно малыми значениями удельного электрического сопротивления, приближающимися к значениям 10 Ом.

Для определения прочностных параметров керамики одной марки, но с различными величинами удельного

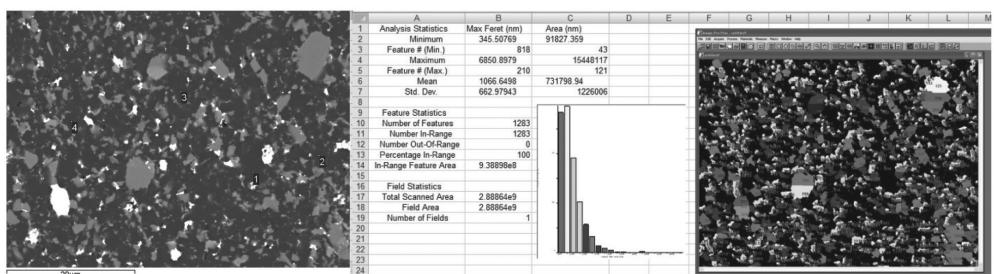


Рис. 7. Определение структурных компонентов оксидно-карбидной керамики

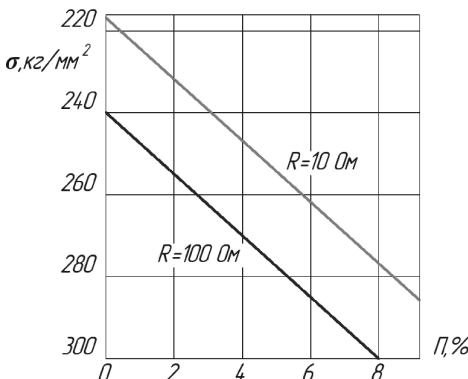


Рис. 8. Графическая зависимость изменения пористости от прочностных показателей и равномерные изменения карбидного зерна в зависимости от относительной частоты и величины прочности

электрического сопротивления, была детально исследована микроструктура образцов керамических режущих пластин (рис. 7) [5].

Затем при помощи программы Image-Pro Plus, позволяющей определить параметры выбранных в поле зрения окуляра микроскопа структурных компонентов исследуемого керамического материала, был определен средний диаметр карбидных зерен. За величину признака брали поперечный размер зерна  $L$  с определенными интервалами 0...1 мкм, 1...2 мкм, 2...3 мкм и т.д. В свою очередь, количество зерен каждого размера в заданном интервале дает значения относительной частоты, то есть числа случаев каждого варианта признака.

Относительная частота находилась по формуле [6]:

$$F = \frac{A}{200}, \%, \quad (2)$$

где  $A$  — абсолютная частота, то есть количество карбидных зерен данного размера для определенного интервала; 200 — общее количество исследуемых зерен в выбранном интервале.

Метод математической статистики позволил получить данные, результаты которых послужили для определения дру-

гих величин. Средний диаметр карбидного зерна вычислялся по формуле [6]:

$$D_{CP} = \frac{\sum m \cdot x}{\sum m}, \text{ мкм}, \quad (3)$$

где  $x$  — размер диаметра карбидного зерна в каждой группе,  $m$  — частота группы.

Абсолютное значение диаметра карбидного зерна получали умножением полученного значения среднего диаметра карбидных зерен на цену деления используемого программой окуляра микроскопа  $E$ :

$$D_{CP,ABC} = D_{CP} \cdot E, \quad (4)$$

Прочностные характеристики, имеющие зависимость от величины зерна  $\sigma = f(L)$ , были определены по формуле [6]:

$$\sigma = 0,37L^{\frac{1}{2}}, \text{ кг}/\text{мм}^2, \quad (5)$$

где  $L$  — средний размер зерна.

По формуле (1) были определены значения, которые позволили построить графические зависимости для керамики с различным удельным электрическим сопротивлением — изменения пористости от прочностных показателей и равномерные изменения зерна в зависимости от относительной частоты и величины прочности (рис. 8).

Найденные значения прочности керамического материала с различными параметрами удельного электрического сопротивления, зависящие от размеров зерен карбидов, показали, что плотность распределения зерен карбидов оказалась сравнительно одинаковой у всех исследуемых образцов режущей керамики, но наряду с этим наблюдалось различие интервала колебания размера зерна, который был больше у керамических пластин с величиной удельного электрического сопротивления  $R \approx 10 \text{ Ом}$ .

Показатели прочности исследованных керамических пластин от среднеквадратичных значений, полученных математическим методом, сведены в табл. 2.

Таблица 2

$R$ , Ом	$D_{cp}$ , мкм	$\sigma = 0,37L^{1/2}$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\Pi$ , %
10	2,2	171	12
100	1,5	232	8

Полученные зависимости вновь подтвердили, что с уменьшением пористости прочностные свойства керамики возрастают, причем керамика с удельным электрическим сопротивлением  $R \approx 100$  Ом, имеющая более мелкодисперсную структуру и меньшую величину пористости, оказалась значительно прочнее керамики с удельным электрическим сопротивлением  $R \approx 10$  Ом.

### Выводы по работе

Проведенные исследования показали, что оксидно-карбидные керамические материалы, предназначенные для оснащения режущих инструментов, обладают пористостью в пределах 8...12%. Удалось установить, что пористость керамики можно определить по корреляционной зависимости от удельного электрического сопротивления керамического материала. У керамических пластин с величиной удельного электрического сопротивления  $R \approx 100$  Ом, процент пористости достаточно небольшой и составляет 8%. У образцов керамических пластин с величиной удельного электри-

ческого сопротивления  $R \approx 10$  Ом, процент пористости оказался больше и составил 12%.

Поскольку известно, что величина пористости керамического инструментального материала непосредственно влияет на прочность инструмента, то можно сделать вывод, что чем большей окажется величина удельного электрического сопротивления у режущей керамики, тем большей окажется прочность и зависящая от нее работоспособность инструмента, оснащенного керамикой.

Режущий инструмент с большими значениями удельного электрического сопротивления ( $R \approx 100$  Ом) и, соответственно, меньшей пористостью и большей прочностью рекомендуется применять для обработки наиболее точных элементов заготовок деталей машин, так как его работоспособность будет больше, чем у инструмента с керамическими пластинами с малыми значениями удельного электрического сопротивления ( $R \approx \approx 10$  Ом), что гарантирует получение обработанных поверхностей деталей машин с заданной точностью и качеством.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maksarov V., Khalimonenko A., Timofeev D. Machining quality when lathing blanks with ceramic cutting tools // Agronomy Research. – 2014. – Vol. 12. – № 1. – Pp. 269–278.
2. Маргулес А. У. Резание металлов керметами. – М.: Машиностроение, 1980. – 160 с.
3. Бальшин М. Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. – М.: Металлургия, 1972. – 336 с.
4. Бальшин М.Ю., Кипарисов С.С. Основы порошковой металлургии. – М.: Металлургия, 1978. – 184 с.
5. Халимоненко А.Д., Вьюшин Р.В. Точность обработки при точении заготовок режущим инструментом, оснащенным сменными керамическими пластинами // Записки Горного института. – 2014. – т. 209. – С. 99–103.
6. Максаров В.В., Халимоненко А.Д., Ольт Ю., Лаатсит Т. Управление работоспособностью режущего инструмента, оснащенного сменными пластинами из режущей керамики // Металлообработка. – 2008. – № 6 (48). – С. 50–58.
7. Максаров В.В., Халимоненко А.Д., Ольт Ю., Лаатсит Т. Исследование работоспособности инструмента, оснащенного сменными пластинами из режущей керамики // Инструмент и технологии. – 2008. – № 30–31. – С. 132–136. ГИАБ

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

**Максаров Вячеслав Викторович<sup>1</sup>** – доктор технических наук, профессор, декан Электромеханического факультета, зав. кафедрой, e-mail: maks78.54@mail.ru,  
**Халимоненко Алексей Дмитриевич<sup>1</sup>** – кандидат технических наук, доцент, e-mail: khalim76@rambler.ru,

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет.

---

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 8, pp. 56–64.

UDC 621.9.014.8; 621.9.015

**V.V. Maksarov, A.D. Khalimonenko**

## **EFFECT OF STRUCTURAL PARAMETERS OF CUTTING CERAMICS ON TOOL EFFICIENCY IN PRECISION PROCESSING OF SURFACES OF MINING MACHINE PARTS**

The article examines the question about forecasting performance of cutting tools equipped with replaceable indexable inserts made of oxide-carbide "black" ceramics, which are used for fine finishing precision parts of mining machines. To predict the performance of ceramic tool is expected due to the determination of microstructural parameters and porosity of ceramic tool material, which are affecting its cutting properties. Microstructural parameters and the porosity of the ceramic material of the cutting tool is proposed to determine correlation depends on the basis of specific electrical resistance replaceable ceramic plates. It is proposed the selection method of cutting ceramic plates for given processing conditions. Since it is knowing that the average grain size and the porosity of the ceramic tool material are directly affects the strength of the tool, the results of the conducted research it can be concluded that the larger will be the value of specific electrical resistance in the cutting of ceramics, the greater will be the strength and its depend on the performance of the instrument equipped with ceramics. The proposed method allows to determine the resource of working capacity cutting tool equipped with cutting ceramics, which made of non-destructive testing method and, accordingly, to ensure accurate processing of carrying out elements of mining machinery parts billet without marriage.

Key words: cutting ceramics, microstructural parameters, material strength, porosity of the material, instrumental performance, electrical resistivity.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-56-64

## **AUTHORS**

**Maksarov V.V.<sup>1</sup>**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean, Head of Chair, e-mail: maks78.54@mail.ru,

**Khalimonenko A.D.<sup>1</sup>**, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: khalim76@rambler.ru,

<sup>1</sup> Saint Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

## **REFERENCES**

1. Maksarov V., Khalimonenko A., Timofeev D. Machining quality when lathing blanks with ceramic cutting tools. *Agronomy Research*. 2014. Vol. 12, no 1. Pp. 269–278.
2. Margules A.U. *Rezanie metallov kermetami* (Cutting metal cermet), Moscow, Mashinostroenie, 1980, 160 p.
3. Bal'shin M.Yu. *Nauchnye osnovy poroshkovoy metallurgii i metallurgii volokna* (Scientific foundations of powder metallurgy and fiber metallurgy), Moscow, Metallurgiya, 1972, 336 p.
4. Bal'shin M.Yu., Kiparisov S.S. *Osnovy poroshkovoy metallurgii* (Fundamentals of powder metallurgy), Moscow, Metallurgiya, 1978, 184 p.
5. Khalimonenko A.D., V'yushin R.V. *Zapiski Gornogo instituta*. 2014, vol. 209, pp. 99–103.
6. Maksarov V.V., Khalimonenko A.D., Ol't Yu., Laatsit T. *Metalloobrabotka*. 2008, no 6 (48), pp. 50–58.
7. Maksarov V.V., Khalimonenko A.D., Ol't Yu., Laatsit T. *Instrument i tekhnologii*. 2008, no 30–31, pp. 132–136.