

УДК . 621.923.4:621.793.74

В.Г.Лебедев, Т.В.Чумаченко, Н.Н.Клименко  
Одесский национальный политехнический университет

### **РАЗРУШЕНИЕ ПОРИСТЫХ НАПЫЛЕННЫХ СЛОЕВ ИЗ МИНЕРАЛО И МЕТАЛЛОКЕРАМИКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ИХ КРУГАМИ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ СИЛАМИ РЕЗАНИЯ**

*Статья посвящена технологическому обеспечению качества и производительности обработки поверхностей деталей машин напыленных метало и минералокерамикой с пористой структурой.*

*Микроскопический анализ структуры напыленного керамического слоя свидетельствует о стохастическом распределении пор, поэтому при напряжениях, больших, чем предел прочности чистой керамики, происходит квазипластическое разрушение напыленного слоя. Теоретически установлено, что максимальные временные напряжения меньше допустимых. Если режущее зерно открывает пору, то нормальные напряжения уменьшаются больше чем в 10 раз и не превышают допустимых. Поэтому трещины под действием силового фактора не возникают, что подтверждено экспериментально.*

*Последнее обстоятельство позволяет обоснованно проектировать производительные режимы обработки.*

*Ключевые слова: напыленный керамический пористый слой, квазипластичное разрушение. Трещины.*

Современное развитие многих областей техники, предполагает жесткие эксплуатационные условия для многих деталей - высокая рабочая температура (до 700 °С), агрессивная среда, интенсивное трение . . В связи с этим на практике необходимо применять упрочнение рабочих поверхностей деталей машин, чтобы они надежно противостояли тяжелым условиям эксплуатации. Одним из наиболее эффективных способов упрочнения может быть напыление на рабочие поверхности износостойчивого поверхностного минералокерамического, металлокерамического или комплексного слоя.(В дальнейшем будем употреблять только термин "керамика")

Исследования и опыт эксплуатации керамических пар трения, которыми занимаются фирмы FIAT, Деста, Аспект модификатор, Универсальный модификатор, СУРМ, Гретерин, Римет, Fenom, ER, Хадо, FORSAN, Супротек и др., свидетельствуют о возможности получения аномально низких коэффициентов трения (0,003...0,007) и обеспечения долговечности рабочего состояния при высоких эксплуатационных температурах и агрессивных средах.

Необходимая точность (6 квалитет) и шероховатость поверхности  $Ra = 0,63 \dots 0,32$  (8в - 9а класс) достигается при шлифовании напыленной минералокерамики кругами из кубического нитрида бора (КНБ) или синтетического алмаза. Однако даже при малопроизводительных режимах обработки напыленный минералокерамический слой склонен к образованию трещин. [1,2]

Поэтому исследования, направленные на технологическое обеспечение качества и производительности обработки шлифованием поверхностей, напыленных износостойчивым и жаропрочным минералокерамическим слоем, являются актуальными для машиностроения.

Целью исследования, результаты которого изложены ниже, является исследование возможности разрушения напыленного керамического слоя силами резания.

**Некоторые свойства напыленных слоев.** Керамики обладают высокими температурами плавления, твёрдостью, износостойкостью, довольно высокой термостойкостью, другими традиционными характеристиками тугоплавких материалов в сочетании с огнеупорными, химическими свойствами, что позволяет использовать керамику во многих областях техники [3, 4, 5], используя плазменное напыление

Свойства напыленного керамического слоя, которые дают возможность детали выполнять своё служебное назначение в механизме или в машине в течение оптимального срока, можно условно разделить на три группы:

- геометрические свойства, т.е. точность размеров и геометрической формы, определяющие принципиальную возможность сопряжения данной детали с другими деталями и возможность установки данной детали в машину или механизм;
- микрогеометрические свойства, т.е. шероховатость и волнистость поверхности, в значительной степени, определяющие эксплуатационные характеристики детали, в частности показатели надежности и долговечности;
- физические свойства, т.е. напряженное состояние напыленного слоя, оказывающее большое влияние на эксплуатационные характеристики детали и на показатели надежности и долговечности.

Все эти три группы свойств, формируются при механической обработке. Наиболее эффективным методом обработки деталей с покрытиями на заключительном этапе является шлифование [2,6,7].

Во время шлифования деталей формирование геометрических и микрогеометрических свойств не встречает принципиальных трудностей и осуществляется за счет совершенных конструкций шлифовальных станков, соответствующих характеристик шлифовальных кругов и правильно выбранных СОТС. Это дает возможность обеспечивать стабильные геометрические характеристики напыленного слоя, а также ее микрогеометрические характеристики, обусловленные необходимыми допусками.

Формирование третьей группы свойств, т.е. формирование физических свойств, наталкивается на серьезные трудности как в плане достижения заданных свойств, так и в плане их стабильности. Известно, что интенсивное термомеханическое воздействие, оказываемое на поверхностный слой обрабатываемой детали в процессе шлифования, приводит к образованию дефектов – трещин, которые снижают общий уровень качества детали.

При шлифовании деталей с покрытиями возникают следующие виды дефектов: отслоение покрытия от основного металла; трещины; вырывы части покрытия (вследствие налипания на абразивный инструмент). Основные и наиболее опасные виды дефектов – это дефекты, связанные с образованием трещин, которые бывают следующих видов [8, 9]:

- поверхностные трещины, имеющие различную конфигурацию и глубину распространения;
- трещины отрыва, залегающие на границе раздела покрытия с основным металлом;
- сколы и глубокие вырывы на обработанной поверхности.

Поверхностные трещины – наиболее распространенный дефект при шлифовании деталей с покрытиями. Шлифовочные дефекты приводят к неоправданным экономическим потерям при производстве и эксплуатации машин.

Таким образом, основной характеристикой физико-механического состояния поверхностного слоя покрытия, обработанного по технологии, обеспечивающей отсутствие трещинообразования, является уровень остаточных напряжений, сформировавшихся под воздействием термомеханических явлений с учетом наследственных напряжений.

При выборе между алмазным шлифованием керамики и кругами из КНБ учитывалось следующее:

1. Режущие способности кругов примерно одинаковы.
2. При шлифовании зерна вследствие низкой теплопроводности керамики подвергаются интенсивному нагреву.
3. Теплостойкость алмазных зерен составляет приблизительно 600 °С. Выше этой температуры начинается процесс графитизации алмаза. Теплостойкость зерен из КНБ доходит до 2000 °С, поэтому можно утверждать, что износ алмазных кругов будет значительно выше (что доказано практикой). Поэтому экономически обосновано керамику и соответственно напыленные керамические покрытия шлифовать кругами из КНБ.

#### **Термомеханическое взаимодействие напыленного керамического слоя с металлом основания при шлифовании**

При шлифовании напыленного керамического слоя на каждое зерно круга действуют реакции сил резания, возникающие при срезании напыленного слоя и обрабатываемой заготовки, а также силы трения о зерно сходящего напыленного материала. В результате возникновения сил

различной природы образования в напыленном керамическом слое к существующим напряжениям структуры (пористости) могут присоединяться как силовые напряжения, так и температурные:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_T + \sigma_P + \sigma_{стр} , \quad (1)$$

где  $\sigma_T, \sigma_P, \sigma_{стр}$ , МПа – соответственно температурные, силовые, структурные напряжения.

Анализируя каждую из составляющих суммарного напряжения, возникающего при шлифовании напыленного керамического слоя, необходимо прийти к численным результатам составляющих суммарного напряжения.

При шлифовании керамики не происходят фазово-структурные превращения, поэтому составляющая  $\sigma_{стр}$  из анализа сразу исключается.

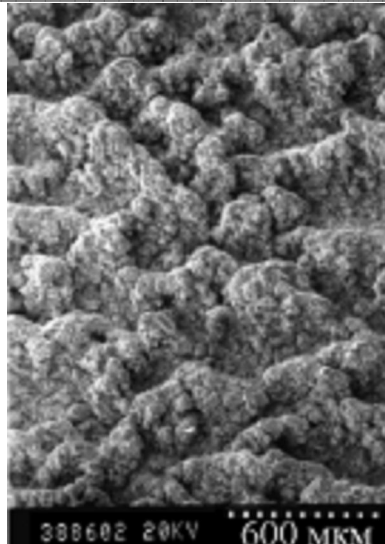
Авторы создавали трехслойную структуру керамического слоя, напыленного на рабочие поверхности деталей [10,11], что отличает его от обычной керамики. Это отличие вызвано требованиями, которые предъявляются к напыленному слою. С одной стороны, необходимо обеспечить максимальную прочность сцепления слоя с основой, а с другой – необходимо обеспечить достаточную пористость слоя для хорошего удержания смазки. Получить такие свойства, используя один режим напыления, невозможно. Поэтому керамический слой напыляется в три прохода. Первый проход осуществляется при достаточно высокой силе тока (320 А), в результате чего происходит напыление с оплавлением. У такого керамического слоя пористость незначительна или приближается к нулю. Этот слой обеспечивает повышенную прочность сцепления (50 МПа) напыленной керамики с основой и служит подслоем. Второй слой напыляется при более низких значениях силы тока (280 А). При этом образуется умеренная пористость напыленного слоя (7 - 10%). Третий слой – при достаточно низких значениях силы тока (260 А), что обеспечивает повышенную пористость (15% - 18%).

Такая технология напыления, с одной стороны, обеспечивает достаточно прочное сцепление напыленного слоя с основой, а с другой – максимально уменьшает его хрупкость и увеличивает способность удерживать смазку. Поэтому напыленный керамический слой имеет переменный коэффициент теплопроводности от поверхности в глубину, причем на поверхности напыленного слоя коэффициент теплопроводности имеет минимальные значения, а в нижней части – максимальные.

Таким образом, структура напыленного слоя обладает разной пористостью по глубине и соответственно, разной теплопроводностью, теплоемкостью и плотностью. При плазменном напылении поверхностный слой формируется не как единое целое, когда жидкая керамика превращается в твердую и одновременно идут процессы стеклования и кристаллизации, а из мельчайших капель жидкой керамики. В нашем случае образуется структура, похожая на зернистую структуру металла. На рис. 1 представлена растрово электронно-микроскопическая (РЭМ) фотография поверхности пористого керамического слоя, полученная с помощью программно-аппаратного комплекса, состоящего из РЭМ «Hitachi S-800», соединенного через интерфейсный блок с IBM современным персональным компьютером [12].

В задачу данного исследования входил анализ условия возможности образования трещин, исходя из динамики процесса шлифования, который дает ответы на следующие вопросы:

- могут ли образовываться трещины под действием единичных сил  $P_y$ , которые вызывают временные напряжения сжатия?
- как пористость меняет характер разрушения керамики?
- основные причины квазипластического разрушения напыленного минералокерамического слоя;
- может ли сферическая пора быть концентратором напряжения?
- как влияет пористость на развитие трещины?

Рис. 1. Структура поверхности керамики,  $\times 500$ 

Следует отметить, что как для оценки механического воздействия зерен абразивного круга на шлифуемый слой, так и для разработки тепловой математической модели, необходимо знать силы резания  $P_y$  и  $P_z$ . Первая нужна для сравнения напряжений сжатия, которые вызывает эта сила с допустимыми напряжениями на сжатие керамического слоя. Вторая сила  $P_z$  необходима для сравнения напряжений, вызываемых ею с пределом прочности на отрыв керамического слоя от основы. Кроме того, составляющая  $P_z$  необходима для определения мощности резания в  $[Н \cdot м/с] = [Вт]$  [13]:

$$Q = P_z \cdot V_k, \quad (2)$$

где  $P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания, Н;

$V_k$  – скорость круга, м/с.

В работах [14, 15, 16] аналитически исследовалась режущую часть зерна, которая может быть представлена в виде пирамидки, поверхности конуса или в виде поверхности шара. Эти модели дают возможность определять силу  $P_y$  по глубине вдавливания зерна, а затем по известным соотношениям между силами  $P_y$  и  $P_z$  с достаточной степенью точности определяется  $P_z$ .

Модель режущей части зерна в виде шара более адекватно отражает происходящий процесс, поскольку включает в себя радиус закругления режущей части зерна

/ Соответственно сила резания единичным зерном и временные напряжения сжатия описываются формулами (3) и (4)

$$P_{yed} = 3H \sqrt{2h^3 R_z}; \quad (3)$$

$$\sigma_{ed} = \frac{P_{yed}}{2\pi R_z h}, \quad (4)$$

где  $P_{yed}$  – составляющая силы резания (сила вдавливания), Ньютоны;  $H$  – микротвердость слоя, Н/м<sup>2</sup>;  $h$  – толщина стружки, снимаемая зерном, м;  $t$  – глубина резания, м;  $R_z$  – радиус закругления режущей части зерна, м.

Временные напряжения сжатия от единичных сил резания  $P_{yed}$  показаны на рис.2.

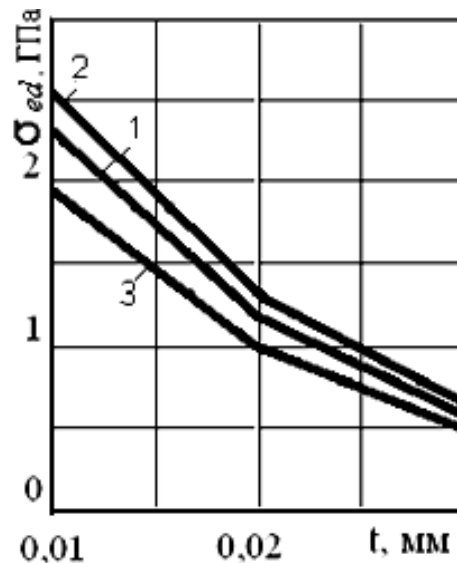


Рис. 2. Зависимость напряжений  $\sigma_{ed}$  от глубины шлифования  $t$  кругами с зернистостью: 1 – 160/100; 2 – 50/160; 3 – 400/250

Как видно из приведенных расчетов, максимальное напряжение составляет величину порядка 2 ГПа (рис. 2). Прослеживается увеличение значений напряжений с уменьшением зернистости круга и глубины резания. Однако эти напряжения являются меньшими, чем допустимые на сжатие керамики, которые по данным работ Н.А. Малининой, С.Н. Кулькова, С.П. Буякова [17] составляют 3 ГПа. Временные напряжения вызываемые суммарными силами резания составляют величину порядка 150 МПа, т.е. на несколько порядков ниже предела прочности керамики на сжатие. Следовательно, при шлифовании разрушений керамического слоя под действием временных сжимающих напряжений произойти не может.

#### **Влияние пористости напыленного слоя на его прочностные и деформационные характеристики**

В напыленном керамическом слое (рис.1) просматривается стохастическое распределение пор, из-за чего он проявляет существенно иную динамику накопления повреждений, чем металл. Доказывается [31] что в образцах со стохастической пористостью может отсутствовать фаза быстрого распространения магистральной трещины и резкого падения несущей способности, характерной для хрупкого разрушения. Это позволяет говорить о возможности квазивязкого разрушения хрупких материалов, обусловленного исключительно структурой порового пространства. Исследовано деформационное поведение керамики с разной морфологией порового пространства. Обнаружен эффект механической неустойчивости, что наряду с чисто упругим поведением керамики и процессом накопления микрповреждений при активной деформации сжатием обеспечивает существенную деформацию пористой структуры без разрушения материала и соответственно более широкий спектр применения пористых керамических материалов.

На рис. 3 представлены диаграммы напряжение-деформация керамики с разным уровнем пористости, где  $\sigma$  – возникающее напряжение, а  $\epsilon$  – деформация [17].

Как видно на диаграмме нагружения беспористой керамики (пористость менее 2 %) материал разрушается практически из упругой области.

Увеличение пористости приводит к появлению множества микрповреждений в процессе деформирования, причем тем больше, чем больше величина пористости. Этот процесс проявляется на диаграмме нагружения в виде резких падений напряжения вследствие микрорастрескивания. При этом микротрещины останавливаются на порах и материал восстанавливает способность к упругому деформированию.

Процесс микрорезания сопровождается перемещением локальных объемов материала в поровое пространство, поэтому увеличение пористости приводит к появлению квазипластичности вследствие фактически дополнительного уплотнения (компактирования) материала.

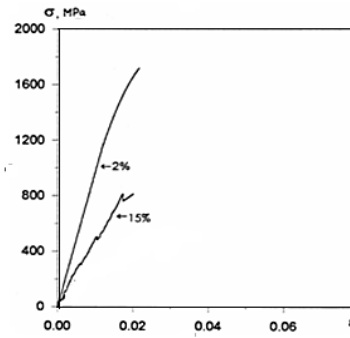


Рис. 3. Кривые деформирования керамики с разным уровнем пористости

Таким образом, в материале наблюдается одновременно три механизма макродеформации: упругая деформация, характерная для компактного материала, микрорастрескивание с накоплением микрповреждений и перемещении локальных объемов материала в поровое пространство. При этом область появления микрорастрескивания, проявляющаяся на диаграмме нагружения в виде резких падений напряжений, с увеличением пористости смещается в область меньших относительных деформаций и становится более протяженной. Величина относительных деформаций, при которой напряжения достигают максимальных значений, линейно уменьшается с ростом пористости.

Способность к трансформационным превращениям в поле напряжений распространяющейся трещины сохраняется в керамике с пористостью не более 20 %.

После раскрытия в пору энергия в объеме поры релаксирует, стекая к вершинам трещины, и превращается в поверхностную. Из-за этого энергия системы понижается. Поэтому длина трещины достигает максимальной величины порядка 200...400 мкм (одинарное или двойное расстояние между порами). Когда вершины трещин раскрываются в поры, радиус которых значительно больше радиуса вершины трещины, то это приводит к резкому падению напряжения в устье трещины и последняя дальше не развивается (рис. 4). Данное обстоятельство хорошо согласуется с теорией развития трещин Гриффитса.[18]

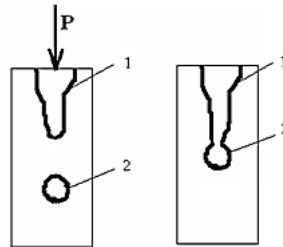


Рис. 4.. Возможный механизм развития трещины в напыленном пористом керамическом слое  
1 – трещина, 2 – пора

Наличие пор в напыленном керамическом слое в количестве 15% приводит к «гашению» возникающих напряжений [17]. Если режущее зерно вскрывает пору (рис.5), то ее можно рассматривать как некоторую толстостенную сферу, которая в результате разложения силы  $P_y$  подвергается внутреннему давлению  $p$ .

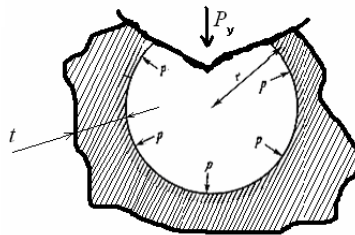


Рис. 5. Схема вскрытия поры режущим зерном:

$P$  – сила вдавливания;  $r$  – радиус поры;  $t$  – расстояние между порами;  
 $p$  – внутреннее давление

Принимая внутреннюю поверхность поры в виде сферы, внутреннее давление на стенки сферы определится по формуле

$$P = \frac{P_{ed}}{2 \cdot 4\pi R_n^2} \quad (5)$$

Величина напряжения на стенки сферы определяется по формуле [16]

$$\sigma = \frac{\pi r^2 p_{yed}}{2\pi r t} = \frac{r p_{yed}}{2t} \quad (6)$$

где  $r$  – радиус поры, м;

$p$  – внутреннее давление, Н;

$t$  – расстояние между порами, м.

Диаметры пор в нашем случае колеблются от 10-100 мкм и подчиняются закону нормального распределения (рис. 2.10), причем мелкая пористость составляет величины порядка 10-15 мкм, основная – 30-50 мкм, крупная – порядка 60-80 мкм и предельная – 90-100 мкм.

При 15% пористости (если взять размер основной пористости) площадь ( $S_\Sigma$ ), занимаемая порами на 1 м<sup>2</sup> керамики, составляет 0,15 м<sup>2</sup>.

Для разного диаметра пор и разной зернистости круга получены следующие зависимости напряжений на стенках пор:

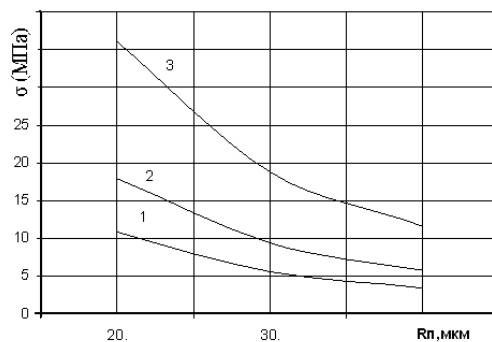


Рис. 6. Распределение напряжений на стенках пор под действием режущих зерен, вскрывающих пору при разной пористости.

1- зернистость 160/100; 2- зернистость 250/160; 3- зернистость 400/250

Напряжение, вызванное этим давлением, меньше допустимого напряжения на сжатие, и разрушить стенки вскрытой поры не могут. Это явление отмечается в ряде работ по исследованию прочности пористых керамик, где указывается, что поры гасят напряжения и обеспечивают квазипластичный характер разрушения керамики [12].

Учитывая материал, изложенный в данной статье и то, что процесс шлифования происходит без ударов, можно утверждать, что динамика процесса шлифования не оказывает существенного влияния на образование трещин напыленного пористого керамического слоя. Известно, что керамика плохо переносит быстрый нагрев и быстрое охлаждение. Следовательно, необходимо тщательно изучить процесс теплообразования при шлифовании керамики и температуру шлифования, возникающую во всем диапазоне применяемых режимов.

1. Гусев В.В. Наукові основи технологічного забезпечення експлуатаційних характеристик виробів з технічної кераміки. // Авт.дис. д.т.н. Донецьк 2006 37 с
2. Гусев В. В. Использование керамических материалов в подшипниковых узлах / В. В. Гусев, А. В. Кондрашов // Современные металлорежущие системы машиностроения : материалы Всеукраинской студенческой конференции, Донецк: ДонГТУ, 2000. – 100 с.
3. Борисов Ю. С. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю. С. Борисов, Ю. Ф. Харламов, Е. А. Ардатовская. – К. : Наук. думка, 1987. – 283 с.

4. Рыкалин Н. Н. Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов / Н. Н. Рыкалин, М. Х. Шоршоров, В. В. Кудинов. – М. : Наука, 1973. – С. 187 - 196.
5. . Irving R. R. NASA. Lewis Research Center Studying Plasma-Sprayed Ceramic Coatings / R. R. Irving. // Metalwork. News, 21 Sept., 1987. – p. 18 - 20.
6. Готлиб Л.И. Жаростойкие и теплостойкие покрытия / Л.И. Готлиб. – Л.: Наука, 1969. – С. 286-288.
7. Гукасян Л.Е. Напряжения и деформация в композиционных материалах при термоциклировании / Л.Е. Гукасян, В.В. Белов, М.М. Рыбальченко // Физика и химия обработки материалов. – 1975. – № 4. – С. 114 - 117.
8. Анельчик Д. Е. Основы технологии шлифования покрытий (на примере деталей криогенной техники): автореф. дисс. на получение науч. степени доктора техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / Д. Е. Анельчик. – Тула, 1990. – 42 с.
9. Кутков А. А. Износостойкие и антифрикционные покрытия / А. А. Кутков. – М. : Машиностроение, 1976. – 152 с.
10. Хрульков В. А. Механическая обработка деталей из керамики и ситаллов / В. А. Хрульков, В. А. Городецкий, А.Я. Головань. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 185
11. Шевченко В. Я. Введение в техническую керамику / В. Я. Шевченко. – М. : Наука, 1993. – 112 с.
12. Калита В. И. Трехмерные капиллярно-пористые покрытия / В. И. Калита, В. Н. Соколов, В. А. Парамонов // Физика и химия обработки материалов. – 2000. – № 4. – С. 55 – 61.
13. Евсеев Д. Г. Физические основы процесса шлифования / Д. Г. Евсеев, А. Н. Сальников. – Саратов : изд-ва Саратов. ун-та, 1978. – 128 с.
14. Лебедев В. Г. Технологические основы управления качеством поверхностного слоя при шлифовании: дис. ... д-р техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / В.Г. Лебедев. – Одесса., 1991. – 268 с.
15. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов / Е. Н. Маслов. – М. : Машиностроение, 1984. – 320 с.
16. Редько С. Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов / С. Г. Редько. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1986. – 231 с.
17. Кульков С. Н. Негуковское поведение пористого диоксида циркония при активной деформации сжатием / С. Н. Кульков, В.И. Калита, С.П. Буйкова // Журн. техн. физики. – 2002. – Т. 72, № 3. – С. 38 –42.
18. Гуляев А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. – М. : Металлургия, 1986. – 544 с.