

В. В. Гусев д-р техн. наук, проф., **Д. А. Моисеев** аспирант
Донецкий национальный технический университет
Тел./Факс: +38 (062) 3010807; E-mail: mc@mech.dgtu.donetsk.ua

ТЕХНИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ КЕРАМИКИ

В статье приведен анализ формирования эксплуатационных характеристик деталей из технической керамики при алмазном шлифовании. С увеличением интенсивности обработки керамики и длительности работы алмазного шлифовального круга возрастает сила резания, что приводит к росту размеров обработочных дефектов. Разработана методика определения вероятности безотказной работы по прочности изделия из конструкционной керамики, используя которую можно определять условия обработки и параметры управления состоянием рабочей поверхности алмазного шлифовального круга.

Ключевые слова: керамика, алмазный круг, структура дефектного слоя, вероятность безотказной работы

V. V. Gusev, D. A. Moiseenco

ENGINEERING CONSTRAINTS AT DIAMOND GRINDING OF CERAMICS

The analysis of formation of operational characteristics of partiss from technical ceramics at diamond grinding is provided in the paper. With increase in intensity of ceramics machining and running time of diamond grinding wheel the cutting force go up that invites to the growth of the sizes of machining defects. The technique of determination of probability of no-failure operation on strength of product from engineering ceramics is developed. Using this technique it is possible to determine the machining conditions and control parameters of working surface conditions of a diamond grinding wheel.

Keywords: ceramics, diamond wheel, defect layer structure, probability of no-failure operation

Введение. Все шире в различных областях техники применяются детали из технической керамики (ТК). В качестве примера можно привести детали для плунжерных насосов, шарового крана, торцового уплотнения, коагулятора крови. Применение керамических плунжеров позволило в 4-5 раз (в зависимости от применяемых материалов) повысить долговечность работы насосов в шахтных условиях. Керамический шаровой кран в системах перекачки перегретого пара по сравнению с кранами из металла повышает долговечность до 50 раз. Не менее перспективным является использование в горношахтном оборудовании торцовых керамических уплотнений, применение которых позволяет защитить узлы трения от попадания в них агрессивных сред и значительно повысить долговечность их работы. Алмазное шлифование является наиболее эффективным способом съема материала припуска в керамических заготовках вследствие их высокой твердости.

Основными требованиями, предъявляемыми на стадии производства к этим деталям, является обеспечение требований по точности обработки и микрорельефу поверхностного слоя. Требования к высотным параметрам микрорельефа связаны, прежде всего, с условиями их работы в узлах трения. Получение оптимального рабочего рельефа во всех случаях связано с исходным технологическим рельефом, который должен соответствовать равновесному состоянию поверхностных слоев в процессе эксплуатации. К другой группе относятся детали из ТК, работающие в условиях воздействия на них интенсивных тепловых и силовых нагрузок. Они вызывают в керамических деталях сложное неравномерное напряженно-деформированное состояние. Основным показате-

телем, характеризующим несущую способность детали из ТК, является коэффициент запаса прочности, равный отношению допустимой прочности на растяжения σ_p материала к максимальному напряжению σ_{\max} , возникающему в нем от воздействия на деталь тепловых и силовых нагрузок. К этой группе можно отнести керамические детали для высоконагруженных конструкций авиационного и космического назначения, газотурбинных двигателей, обтекатели антенн, автомобильных двигателей, режущего инструмента, металлургического производства.

Одной из основных причин отказов сложных систем авиационной и ракетно-космической техники является разрушение входящих в их состав высоконагруженных деталей из конструкционной керамики (КК), обусловленное повреждаемостью материала при формообразовании [1,2]. Все более широкое применение конструкционной керамики и ситаллов в различных областях машиностроения и приборостроения выдвигает как одну из важных проблем – повышение конструкционной прочности изделий из этих материалов [1,2]. Необходимо устранить причины, вызывающие снижение прочности КК. Хрупкий характер разрушения керамических материалов заставляет обращать основное внимание не на прочность химической связи, которая весьма высока, а на величину, количество и распределение микротрещин.

Необходимо, чтобы уровень напряжений в процессе эксплуатации был ниже прочности материала при заданном уровне вероятности разрушения. Обычно процессы повреждения и разрушения формируются в поверхностных слоях деталей и элементов машин и конструкций. Расчетное прогнозирование надежности работы на стадии проектирования является актуальным для разработки конкурентоспособных машин, расчета эксплуатационного ресурса детали для требуемой вероятности неразрушения.

Требования к физико-механическим свойствам (модуль упругости E , трещиностойкость K_{1c} , твердость по Виккерсу HV , коэффициент Пуассона μ и др.) и состоянию поверхностного слоя детали (высотные параметры микрорельефа R_a, R_z структура дефектного слоя), вытекают из ее назначения, места и условий эксплуатации. Исходные данные для решения задачи выбираются из технической и справочной литературы, опыта эксплуатации. При этом конструктор, как правило, не оговаривает требования к структуре дефектного слоя керамики, который оказывает непосредственное влияние на прочность детали.

Обычно в качестве набора параметров, которые подлежат определению и условно считаются непрерывными, принимают режимы резания. В основе выбора параметров процесса обработки лежат знания о физической природе протекающих при резании явлений и их влиянии на формирование поверхностного слоя изделий из керамики. Необходимо иметь набор зависимостей между параметрами, подлежащими определению, и параметрами качества поверхностного слоя изделий из керамики. Однако технолог не всегда учитывает изменения, происходящие в рабочей поверхности алмазного шлифовального круга при обработке керамики.

Целью работы является разработка методики выбора технологических условий обработки с учетом требований по вероятности безотказной работы по прочности изделия и требованиям по высотным параметрам микрорельефа поверхностного слоя деталей из керамики с учетом изменяющейся характеристики рабочей поверхности круга (РПК).

2. Основное содержание и результаты работы. По мере удаления припуска материала керамики на рабочей поверхности алмазного круга происходят изменения, алмазные зерна изнашиваются, раскалываются и вырываются из связи. Это приводит к

изменению их количества (уменьшению), формы (образованию площадок износа) и характера распределения вершин зерен по высоте РПК (от нормального к левостороннему распределению) [3].

Выбор начальных условий алмазного шлифования керамики (характеристики инструмента, режимов резания) осуществляется из условия обеспечения требований к детали по высотным параметрам микрорельефа. При эксплуатации алмазного круга по мере удаления материала припуска изменение характера распределения вершин зерен к левостороннему приводит к росту числа зерен, участвующих в удалении припуска, уменьшению сечения среза материала, что и приводит к уменьшению среднего арифметического отклонения профиля шероховатости Ra (рис. 1б). Разница в начальном значении параметра Ra для различных материалов связана с влиянием его индекса хрупкости на сколы в поверхностном слое [4]. С уменьшением сечения среза материала припуска на алмазном зерне среднее арифметическое отклонение уменьшается, а влияние сколов на формирование высотных параметров микрорельефа снижается. Вследствие этого выполнение требований по высотным параметрам микрорельефа с учетом изменяющейся характеристики рабочей поверхности круга не оказывает ограничивающего влияния на выбор режимов резания.

Изменение состояния РПК приводит к экспоненциальному росту силы резания в 2-3 раза (в зависимости от физико-механических свойств керамики), а режущая способность круга снижается [5]. Изменение нормальной составляющей силы резания при алмазном плоском продольном врезном шлифовании керамики кругом единичной ширины (рис. 1а) с учетом их физико-механических свойств можно записать

$$F_{ny} = A \left(\frac{k_{\phi} \cdot K_{1c}^4}{HV^3} \right)^{1.18} \cdot (b - \exp(-cQ)) \cdot V_{\delta}^{0,34} \cdot V_k^{-0,41} \cdot t^{0,79}, \quad (1)$$

где k_{ϕ} - постоянный коэффициент, зависящий от параметров индентора; Q - объем удаленного материала, в см^3 , V_{δ}, V_k, t - режимы резания; A, b, c - постоянные коэффициенты учитывающие изменение состояние РПК и определяемые экспериментально.

Нормальная составляющая силы резания на круге 1А1 200х76 единичной ширины при изменении режима резания с ($t=0,01\text{мм}$; $V_{\delta}=1\text{м/мин}$; $V_k=42\text{м/с}$) до ($t=0,1\text{мм}$; $V_{\delta}=6\text{м/мин}$; $V_k=24\text{м/с}$) при обработке оксида алюминия горячее прессованного (Al_2O_3 Гп) увеличивается с 0,4 Н до 5,5 Н, а после съема 10 см^3 материала припуска возрастают более чем в 2 раза соответственно до 1 Н и 13,6 Н. Таким образом, изменяя режим резания и состояние РПК можно существенно изменять силовое воздействие инструмента на обрабатываемую поверхность керамической заготовки.

Под воздействием нормальной составляющей силы резания в поверхностном слое формируется дефектный слой. Определяющими параметрами дефектов являются их поверхностная плотность n_o , линейные размеры (полудлина трещины l_o) и угол ориентации трещины (α_o). Вследствие изменения режущей способности круга в процессе шлифования, происходит увеличения силы резания, что приводит к росту размеров обработочных дефектов и как следствие к снижению прочности детали.

В подсистеме получения заготовки окончательно формируются микроструктура будущей детали и структурные дефекты, которые образуются под влиянием пор, возникающих вследствие перемешивания инородных тел (пластифицирующих добавок)

при формовании и усадочных явлений при сушке и обжиге. Дефекты, образующиеся в подсистеме получения заготовки, по местоположению являются объемными. На этой стадии необходимо уменьшить величину, разброс и обеспечить равномерное распределение дефектов в заготовке. В общем случае распределение структурных дефектов определяется плотностью вероятностей $f(l_c, \alpha_c)$ двумерного распределения двух случайных величин: полудлины трещины (l_c), ее углом ориентации (α_c). Если заготовка не подвергалась специальным видам технологического воздействия, можно считать, что α_c и l_c - независимые случайные величины. Тогда плотность вероятности их совместного распределения $f_c(\alpha_c, l_c) = f(\alpha_c) \cdot f(l_c)$. Можно также предположить, что заготовка является изотропным материалом, в котором ориентация дефектов по всем возможным направлениям распределена равномерно $|\alpha_c| \leq \pi/2$.

Таким образом, после механической обработки материал детали ослаблен дефектами двух видов, обусловленных технологией изготовления заготовок и воздействием (сило-

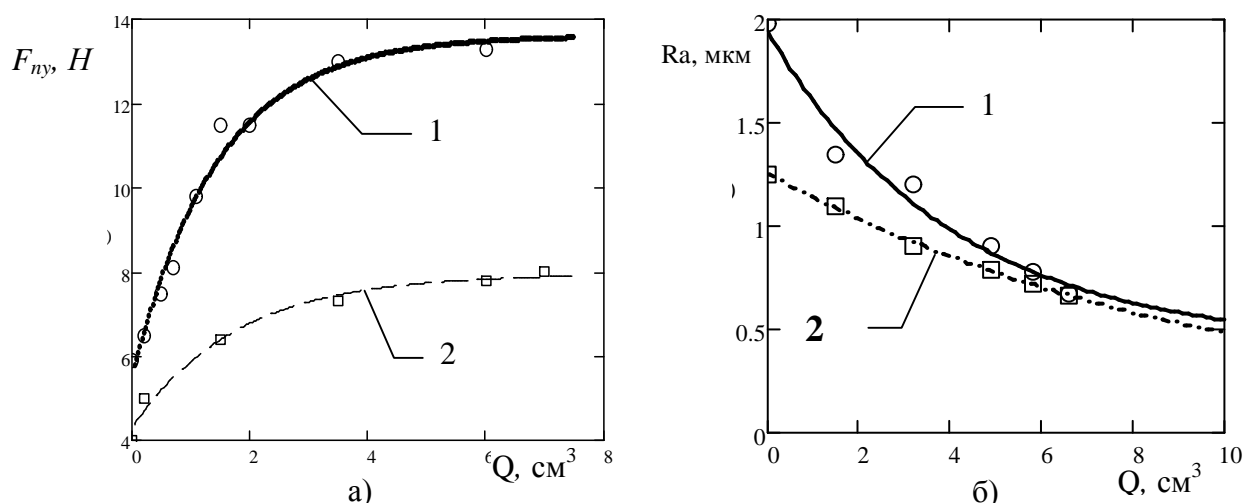


Рис. 1. Влияние объема удаленного материала припуска керамики на нормальную составляющую силы резания (а) и среднее арифметическое отклонение профиля микрорельефа на детали Ra (б) при обработке керамики: 1 – Al_2O_3 (Гп) и 2 - ситалла АС-370 кругом единичной ширины 1А1 200x20x32 АС6-4-М2-01-125/100 при плоском врезном шлифовании периферией круга с режимами резания: $V_k=24$ м/с; $V=6$ м/мин; $t=0,1$ мм.

вым и тепловым) режущего инструмента. Из условий формирования дефектов можно считать, что плотности вероятности распределения структурных и обработочных дефектов не зависят друг от друга. В этом случае совместная плотность вероятности распределения дефектов структуры и обработочных дефектов $f(\alpha_c, l_c, \alpha_o, l_o) = f(\alpha_c, l_c) \cdot f(\alpha_o, l_o)$. Плотность распределения дефектов по размерам (не зависимо от их происхождения) может быть описана упрощенным бета-распределением [6]

$$f(l_c) = \frac{r_{c(o)} + 1}{l_{c(o)\max}} \left(1 - \frac{l_{c(o)}}{l_{c(o)\max}} \right)^{r_{c(o)}}, \quad r_{c(o)} \geq 0, \quad 0 \leq l_{c(o)} \leq l_{c(o)\max}, \quad (2)$$

где $r_{c(o)}$ - характеризует трещиноватость структуры материала и дефектов обработки соответственно (чем больше $r_{c(o)}$, тем вероятнее малые трещины).

Был проведен корреляционный анализ зависимости параметра трещиноватость от нормальной составляющей силы резания. Он показал, что при отсутствии влияния теплового потока из зоны контакта на развитие дефектов и независимо от состояния режущей способности круга, параметр трещиноватости дефектов обработки определяется значением нормальной составляющей силы резания и индексом хрупкости обрабатываемого материала (HV/K_{1c})

$$r_o = 6.9 \cdot F_{ny}^{-0.5+0.07\{HV/K_{1c}\}} \quad (3)$$

С ростом радиальной нагрузки при шлифовании возрастает доля дефектов с большими размерами, и параметр трещиноватости снижается. Зависимость максимальной величины полудлины $l_{o\max}$ обработочных дефектов в поверхностном слое определяется индексом хрупкости керамики. Чем меньше индекс хрупкости материала, тем больше значение полудлины максимальной обработочной трещины в поверхностном слое.

На формирование дефектного слоя кроме силового воздействия оказывает влияние и тепловой поток из зоны контакта. Он формирует термоупругие напряжения в заготовке, которые могут вызвать рост трещины. Это происходит при предельной величине теплового потока, зависящей от K_{1c} , теплофизических свойств обрабатываемого материала (коэффициента теплопроводности λ), размера дефекта l_c , его ориентации α_c и расположения по глубине поверхностного слоя. Если нормальная составляющая силы резания превышает величину F_{ny}^{np} , то на развитие исходных трещин в поверхностном слое заготовки оказывает теплота, выделяющаяся в зоне контакта при шлифовании. тепловой поток из зоны контакта не будет вызывать роста структурных дефектов. Предельное значение нормальной составляющей силы резания будем определять из условия равновесия структурных максимальных дефектов материала и их наилучшей ориентации для развития, принимая $|\sin \alpha_c| = 1$ [6]

$$F_{ny}^{np} = \frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot \lambda_3 \cdot (1 - \mu) \cdot K_{1c} \cdot L \cdot \left(1,25 \cdot \frac{\lambda_k}{\lambda_3} \cdot \sqrt{\frac{a_3}{V_n \cdot L}} + 1 \right)}{\alpha_t \cdot E \cdot l_c \cdot \sqrt{l_c \cdot \pi \cdot V_k \cdot \beta_c \cdot K_a}} \quad (4)$$

где μ – коэффициент Пуассона; α_t – коэффициент температурного линейного расширения материала; λ_3 λ_k – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала и круга соответственно; a_3 – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала; L – длина дуги контакта ШК с заготовкой; β_c – коэффициент, учитывающий долю теплоты, уходящую в стружку; K_a – коэффициент абразивного резания, уменьшающийся по экспоненциальной зависимости от объема удаленного материала припуска.

С увеличением времени работы круга коэффициент абразивного резания уменьшается, что также вызывает при неизменных режимах обработки к уменьшению предельного значения нормальной составляющей силы резания, при которой не происходит развитие дефектов под действием теплового фактора.

Экспериментальные исследования структуры дефектного слоя показали, что дефекты в поверхностном слое керамики имеют преимущественную ориентацию в направлении движения зерна, и это необходимо учитывать при анализе влияния механической обработки на прочность деталей из КК. Для анализа взаимосвязи между полудлиной трещины и ее направлением был проведен корреляционный анализ. При уровне значимости 0,05 величина полудлин трещин и параметр трещиноватости статистически зависимы от направления движения зерна круга (вектора скорости резания) [7].

Вероятность разрушения $P_{\Sigma}(\sigma)$ детали из керамики при напряжении σ с учетом дефектов двух видов определяется по формуле [6]

$$P_{\Sigma}(\sigma) = 1 - [1 - P_c(\sigma)]^{n_c} \cdot [1 - P_o(\sigma)]^{n_o}, \quad (5)$$

где $P_c(\sigma)$ и $P_o(\sigma)$ - вероятности разрушения, соответственно, от объемных структурных и поверхностных обработочных дефектов.

Далее готовая деталь поступает для монтажа в готовое изделие, в котором и реализуется ее служебное назначение. Эксплуатационные требования определяются назначением детали, функциями, которые она выполняет, и условиями работы изделия. Среди факторов влияния внешней среды на изделие, наряду со случайными изменениями различных условий, важное место занимают случайные колебания нагрузки. Рассеивание значений воздействия внешней среды $\Omega(\tau)$ при эксплуатации изделия приводит к разбросу результатов ее функционирования и может привести к смещению их средних значений.

Основным показателем, характеризующим несущую способность детали из КК, является коэффициент запаса прочности, равный отношению допустимой прочности на растяжения σ_d материала к максимальному напряжению σ_{\max} , возникающему в нем от воздействия на деталь тепловых и силовых нагрузок. В случае нормального распределения напряжений при эксплуатации, они характеризуются математическим ожиданием $m(\sigma_{\max})$ и среднеквадратическим отклонением $S(\sigma_{\max})$. Максимальное напряжение характеризует вероятность безотказной работы по прочности изделия, которая определяется через функцию Лапласа

$$P(\sigma_{\max} < |\sigma_d|) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz, \quad (6)$$

где $z = (|\sigma_d| - m(\sigma_{\max})) / S(\sigma_{\max})$.

Для определения вероятности безотказной работы детали при заданных условиях работы необходимо найти допустимое значение прочности σ_d , которое обеспечивает с величиной вероятности 95% (99%) получения детали с гарантированной прочностью. Опираясь на работы Болотина В.В., Витвицкого П.М., была предложена зависимость [6] для определения средней прочности детали $m(\sigma_{po})$ и его среднеквадратическое отклонение $s(\sigma_{po})$. Были проведены исследования влияние структурных и обработочных дефектов на прочность деталей из конструкционной керамики. Они показали, что при равенстве по величине дефектов обработки структурным дефектам первые не оказывают влияния на прочностные свойства образцов из керамики, так как их плот-

ность в поверхностном слое на порядок ниже плотности структурных дефектов. Используя предложенные зависимости можно определить влияние состояние РПК на прочность изделия. И в случае, если рост обработочных дефектов в поверхностном слое детали приводит к изменению вероятности безотказной работы ниже требуемого уровня, устанавливается период правки алмазного ШК.

Общий алгоритм и рекомендации

Для расчета технологических условий обработки для обеспечения требуемых значений по прочности и износостойкости конструкционной керамики предлагается следующая последовательность выбора технологических условий обработки.

1. Определение на детали величину и место с максимальными напряжениями с помощью метода конечных элементов.

2. Определить математическое ожидание $m(\sigma_{max})$ максимального напряжения и его среднеквадратическое отклонение $s(\sigma_{max})$. Нагрузочный спектр, соответствующий условиям работы детали, может быть схематизирован одним из известных методов. С помощью метода статистических испытаний (нагрузка принимает случайные значения), производится многократный прочностной расчет.

3. Выбор начальных условий алмазного шлифования керамики (характеристики инструмента, режимов резания) осуществляем из условия обеспечения требований к детали по высотным параметрам микрорельфа.

4. Расчет параметров структуры дефектного слоя для принятых условий обработки пользуясь зависимостями (2,3,4)

5. Определить математическое ожидание значения прочности детали $m(\sigma_{po})$ и его среднеквадратическое отклонение $s(\sigma_{po})$ после механической обработки.

6. Определить допустимое значение прочности σ_d (), которое обеспечивает величиной вероятности 95% (99%) получения детали с гарантированной прочностью.

7. Определить вероятность безотказной работы детали $P(\sigma_{max} < \sigma_d)$ (6).

8. Определение влияния состояния рабочей поверхности круга при его работе на формирование структуры дефектного слоя и прочность детали. Если уменьшение прочности детали приводит к изменению вероятности безотказной работы ниже требуемого уровня, необходимо определить период правки ШК. Это позволит обеспечить требуемую структуру поверхностного слоя детали.

9. Проверяется возможность обеспечения эксплуатационных требований путем изменения режимов резания и характеристики ШК.

В случае невозможности обеспечения эксплуатационных требований за счет совершенствования механической обработки, то достижение поставленной конструктором цели осуществляется применением операции упрочнения и выбора (разработки нового) материала ТК.

Таким образом, предложенный подход по разработке операции механической обработки ТК, выбора схемы и характеристики ШК, назначения режимов обработки позволяет учесть конкретные условия работы изделий из конструкционной керамики и обеспечить качество их поверхностного слоя из условия требуемой вероятности безотказной работы по прочности.

4. Цифровые модели. В работе разработаны аналитические и эмпирические модели формирования показателей качества деталей из конструкционной керамики. Разработана структурно-логическая модель назначения режима алмазного шлифования

изделий из конструкционной керамики, которая позволяет учесть ее конкретные условия работы.

5. Заключение. Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. При механической обработке керамического материала с определенной структурной дефектностью можно подобрать такие режимы резания или выбрать технологический процесс, при которых влияние обработочной дефектности на прочностные свойства материала будет незначительным (например, не более 5-10%).

2. Предложенный подход назначения режимов обработки с учетом изменяющейся в процессе работы состояния рабочей поверхности круга позволяет учесть конкретные условия работы изделий из конструкционной керамики и обеспечить качество их поверхностного слоя из условия требуемой вероятности безотказной работы по прочности.

3. При обработке высокопористой керамики режимы обработки и состояние круга не оказывают влияние на прочность деталей из конструкционной керамики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баринов С. М. Трещиностойкость конструкционной машиностроительной керамики // Серия. Технология силикатных тугоплавких неметаллических материалов. – М.: ВИНТИ, 1988. – Том 1. – С. 72–132.
2. Ромашин А. Г., Викулин В. В. Опыт создания термонапряженных керамических элементов горячей зоны газотурбинных двигателей // Огнеупоры и техническая керамика. 2003. – №1. – С. 25–32.
3. Гусев В. В. Влияние состояния алмазного круга на качество поверхностного слоя изделий из керамики // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. - Краматорськ: ДДМА. 2002. – Вип. №12. – С. 234–241.
4. Гусев В. В. Влияние хрупкого разрушения материала припуска керамики на формирование микрорельефа поверхности детали при алмазном шлифовании // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Машинобудування і машинознавство”. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – Вип.71. – С. 22–27.
5. Гусев В. В. Закономерности изменения состояния рабочей поверхности алмазного круга при шлифовании керамики /В. В. Гусев, А. Л. Медведев, В. В. Савельев// Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Машинобудування і машинознавство». – Донецьк: ДонНТУ. 2007. – Вип. №4 (124). – С. 21–30.
6. Витвицкий П. М., Пожена С. Ю. Прочность и критерии хрупкого разрушения стохастически дефектных тел – Киев: Наукова думка, 1980. – 187 с.
7. Новоселов Ю. К., Гусев В. В. Влияние направления обработки керамики на ее прочность при изгибе // Вестник СевГТУ „Автоматизация процессов и управление”. - Севастополь: Издательство СевГТУ. 2002. – Вып.36. – С. 212–217.

Поступила в редколлегию 20.01.2016 г.