

## **ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ КЕРАМИКИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Гусев В.В., Калафатова Л.П., Фомченко В.А.  
Донецкий национальный технический университет,  
ООО «Керамики»

*Наведені приклади ефективного використання конструкційної кераміки в промисловості при виготовленні елементів виробів, які експлуатуються в напружених умовах. Доведено, що надійність експлуатації деталей із кераміки за ознакою міцності наперед за все залежить від технології їх механічної обробки та якості створеного поверхневого шару деталей.*

В настоящее время в мире наблюдается тенденция увеличения производства изделий из хрупких неметаллических и композиционных материалов, которые, обладая комплексом требуемых свойств, все более интенсивно заменяют металлы во многих отраслях народного хозяйства. Физико-механические свойства конструкционной керамики (КК) по сравнению со всеми видами металлов, которые в настоящее время применяются в качестве главных материалов для изготовления деталей машин, имеют преимущества по уровню жаростойкости, износостойкости, коррозионной стойкости, стойкости к воздействию химикатов. Сегодня многие научные организации Украины и Донецкой области работают над проблемами изготовления и применения изделий из КК в промышленности.

Однако результативность научных исследований и прикладных разработок по использованию керамики до сих пор сдерживается в связи с отсутствием эффективных технологий их обработки. Проблема обеспечения заданных эксплуатационных свойств деталей из керамики при их изготовлении так и осталась до конца не решенной. Обойтись без окончательной механической обработки при производстве высокоточных деталей из керамики невозможно. Главным препятствием является высокая твердость и хрупкость материала. Несмотря на наличие большого числа высокоточных способов обработки, таких как ультразвуковая, лазерная и другие, наиболее используемым и производительным методом при изготовлении деталей из керамики остается алмазное шлифование.

Изделия из керамики имеют разнообразные формы и габариты – от 1,5 – 2-х метров до нескольких миллиметров. На рис. 1 представлены примеры малогабаритных деталей из керамики и узлов трения, в которых они частично используются.



Рис. 1. Примеры малогабаритных деталей из керамики

В Донецком техническом университете на кафедре “Металлорежущие станки и инструменты” длительное время занимаются вопросами обеспечения качества изделий из технической керамики, ситаллов, разработкой перспективных способов алмазного шлифования. Механизм формирования поверхностного слоя керамики отличается от механизмов и процессов, происходящих при алмазном шлифовании металлов – пластичных материалов. При шлифовании хрупких неметаллических материалов (ХНМ), к которым относится и керамика, имеют место: упругопластическая деформация без разрушения, диспергирование припуска при пластической деформации и хрупкое разрушение со скалыванием частиц. Вероятность тех или иных механизмов разрушения припуска определяется как физико-механическими свойствами материала, так и нагрузкой на зерна (режимами обработки). Процессы, происходящие при разрушении припуска, в дальнейшем оказывают влияние на эксплуатационные характеристики изделия.

К ответственным изделиям из ХНМ (детали приборов, элементы конструкций аэрокосмической техники и др.) предъявляются повышенные требования по точности механической

обработке и качеству формируемой поверхности - шероховатость не более  $R_a = 0,08-0,04$  мкм и практически полное отсутствие дефектного слоя, сформированного при обработке. Поэтому в технологических процессах обработки изделий после операций предварительного шлифования, во время которых происходит формообразование изделий, предусмотрены финишные операции в виде доводки или полирования, назначением которых является обеспечение требуемого уровня шероховатости и минимальной дефектности поверхностного слоя детали.

Особо сложной задачей при обработке заготовок из ХНМ является получение бездефектной поверхности. При их шлифовании возникающие под воздействием абразивных зерен инструмента трещины, неоднократно пересекаясь, обуславливают удаление мелких частиц материала и распространяются на некоторое расстояние вглубь, образуя так называемый дефектный или нарушенный обработкой слой. В результате поверхность снаружи приобретает рельеф, состоящий из выступов и впадин, а под ним в массе материала остаются трещины. В связи с высокой трудоемкостью финишных операций достичь высокой эффективности процесса обработки и снижения ее себестоимости можно путем обеспечения минимальной дефектности обработанной поверхности в сочетании с высокой производительностью шлифования.

Основными положениями эффективных технологических процессов обработки изделий из керамики являются: выбор схемы обработки, исходя из критерия минимального силового воздействия на обрабатываемую поверхность; многостадийность процесса механической обработки с тенденцией уменьшения напряженно-деформированного состояния в зоне резания и интенсивности процесса диспергирования обрабатываемого материала на заключительных операциях за счет назначения определенных режимов, выбора технологических сред, характеристик режущего инструмента, способов поддержания его режущей способности с целью сведения к минимуму дефектности формируемой поверхности изделий в сочетании с высокой производительностью процессов обработки. При выполнении всех перечисленных условий возможно эффективное использование керамических деталей в промышленности.

В качестве примера эффективной замены металла на керамику можно привести ее использование в корпусе гидросбива окалины в качестве наиболее ответственной детали корпуса – сопла. Рабочая поверхность сопла гидросбива, которое работает в условиях

повышенного абразивного воздействия, при значительных механических нагрузках, в случае изготовления корпуса как цельнометаллического изделия сильно изнашивается, что приводит к необходимости его частой замены вследствие потери геометрической формы сопла. Нормативный срок эксплуатации изделия при таких условиях составляет 10 дней. Разработка конструкций изделий с использованием деталей из конструкционной керамики предполагает необходимость согласования свойств керамики (прежде всего ее прочности) и технологии изготовления этих деталей.

В литературе указывается на необходимость обеспечения более чем четырехкратного запаса прочности при использовании в качестве ответственных деталей машин таких хрупких материалов как конструкционная керамика. Это связано с тем, что разрушение изделий из КК инициируется развитием магистральной трещины из дефектов, которые подразделяются на внутренние, объемные (собственные структурные дефекты обрабатываемого материала, обусловленные технологией получения заготовок) и наведенные в результате воздействия механической обработки.

Использование статических и динамических номинальных и локальных напряжений  $\sigma^э$  и деформаций  $e^э$ , возникающих от действия эксплуатационных нагрузок  $P^э$ , при расчетах на прочность должны учитывать размеры дефектов  $l^э$ , коэффициенты интенсивности напряжений  $K_{1c}$ , в материале детали и температурные условия нагружения  $T^э$ . Это позволяет использовать для расчета зависимости вида

$$\left\{ \sigma^э, e^э, K_{1c}^э \right\} = f(P^э, T^э, l^э) \leq \left\{ \frac{\sigma_p}{n_p}, \frac{K_{1c}}{n_k} \right\}, \quad (1)$$

где  $n_p$  и  $n_k$  - коэффициенты запаса по прочности и интенсивности напряжений.

Требования к физико-механическим свойствам и структуре поверхностного слоя детали вытекают из ее назначения, места и условий эксплуатации. Под термином «качество поверхности» подразумевается совокупность свойств поверхностного слоя обрабатываемого материала (точность деталей, шероховатость, плотность дислокаций, дефектность структуры и другие характеристики), прежде всего определяющие прочность изделия. Поэтому для обеспечения надежности работы деталей из керамических материалов необходимо уменьшать разброс показателей качества обработанного поверхностного слоя изделий.

Если в качестве показателя эффективности изделия, в состав которого входит деталь из керамики, выбран функционал  $\Phi$ , то значения этого показателя зависят не только от параметров идеального изделия  $\Phi^0$ , но и от значений характеристик надежности  $\Phi_{\text{над}}$  ее элементов (в том числе и по прочности). В качестве показателя надежности работы изделия может быть выбрана величина  $\Delta\Phi_{\text{над}} = |\Phi^0 - \Phi_{\text{над}}|$ , показывающая насколько снижается эффективность изделия вследствие возможных отказов ее элементов из керамики по сравнению с эффективностью идеального изделия, элементы которого абсолютно надежны. Таким образом, вероятность безотказной работы изделия (детали) из керамики может характеризовать качество ее функционирования и является показателем эффективности.

Экстремальные условия работы корпуса гидросбива окаины, сложность его формы и трудоемкость изготовления делают исключительно трудным и дорогим осуществление натурного эксперимента, связанных с установлением предельных (разрушающих) нагрузок. Поэтому для исследования процессов, происходящих в материале сопла под действием рабочей нагрузки использовался метод конечных элементов (МКЭ), реализуемый с помощью программного пакета ANSYS. Его программы сертифицированы на получение максимально точных решений поставленных задач.

Характер распределения напряжений в керамической вставке (сопле) без дефектов представлен на рис. 2. Как видно из рисунка, напряжения в образце распределены симметрично. Наиболее нагруженной областью сопла является зона в непосредственной близости от овального выходного отверстия. При алмазно-абразивной обработке в поверхностном слое деталей возможно появление дефектов различной формы и размеров на поверхности. Появление даже одного дефекта в поверхностном слое детали способно сильно повлиять на картину распределения напряжений и предел прочности, характерных для данного изделия. Поверхностные дефекты приводят к снижению предела прочности исследуемого материала.

Разрушение элемента конструкции из КК происходит при достижении в некотором объеме предельного значения энергии упругих деформаций растяжения  $\sigma_p$ . В случае нормального распределения напряжений при эксплуатации они характеризуются математическим ожиданием  $m(\sigma_{\text{max}})$  и среднеквадратическим отклонением  $s(\sigma_{\text{max}})$ . Максимальное напряжение определяет

вероятность безотказной работы по прочности изделия, которая может быть найдена через функцию Лапласа

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

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

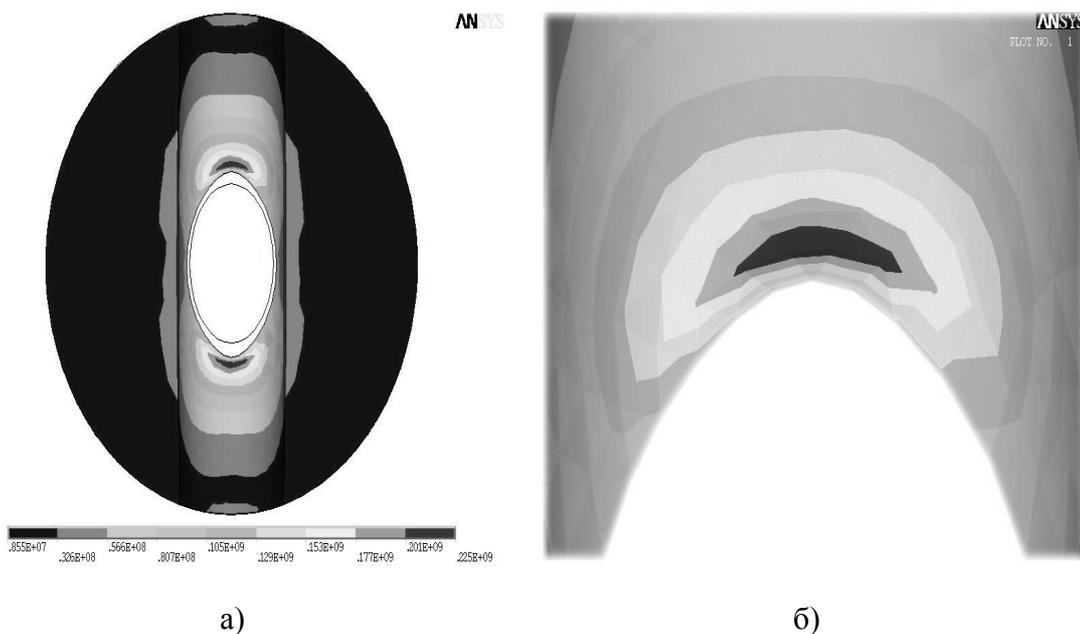


Рис. 2. Распределение напряжений в сопле корпуса гидросбива окалины без дефектов: а) общий вид; б) наиболее деформированная зона у края отверстия

На основании результатов проведенных исследований были разработаны конструкция и технологический процесс механической обработки корпуса гидросбива окалины с соплом в виде керамической вставки, выполненной из оксидной керамики. Также была разработана методика назначения рациональных режимов шлифования, которая позволяет обеспечить требуемое качество поверхностного слоя изделий из конструкционной керамики, исходя из учета конкретных условий их работы, а также требуемую вероятность безотказной работы изделий по показателю прочности. В совокупности перечисленные мероприятия позволили увеличить срок эксплуатации корпуса в 20-50 раз.