

УДК 666.798.21

## Особенности конструирования изделий из керамических материалов

**И.М. Панова**

*Актуальность данной статьи обусловлена потребностью современной техники в изделиях из технической керамики. Все возрастающие требования к эксплуатационным характеристикам материалов уже не могут быть удовлетворены за счет использования традиционных материалов. Техническая керамика обладает высокой твердостью, износостойкостью, коррозионной стойкостью, высоким значением модуля упругости и низкой плотностью при сохранении всех своих преимуществ в зоне высоких температур. В работе описано применение материала на основе нитрида кремния для изготовления волокна. Наиболее подходящим способом определения прочности материала признано испытание на изгиб, при этом можно ориентироваться на следующие соотношения:  $\sigma_{сж} \approx 17\sigma_p$  и  $\sigma_{сж} \approx 15\sigma_p$ . Статистическая обработка результатов проводилась с применением распределения по методу Вейбулла — Гнеденко. Определение напряженно-деформированного состояния волокна выполнено методом конечных элементов. Основным конструкторским приемом следует рекомендовать применение запрессовки изделия в стальную обечайку с оптимально выбранным натягом, гарантированно переводящим материал в состояние сжатия во всем диапазоне рабочих нагрузок.*

**Ключевые слова:** керамика конструкционная, керамика техническая, прочность, разрушение, конструирование изделий, механические свойства.

## Design Characteristics of Ceramic Materials Products

**I.M. Panova**

*The relevance of this article relates to the advanced technology need in products made from technical ceramics. Ever-increasing performance requirements can no longer be met by the use of traditional materials. Technical ceramics has high hardness, wear resistance, corrosion resistance, high modulus and low density while preserving all of its advantages where high temperatures are involved. The article describes the application of silicon nitride based material for manufacturing drawing dies. The bending test is considered the best way to determine the material strength. Statistical processing of the results was carried out using the Weibull — Gnedenko distribution. Determination of stress-strain state of drawing dies was made by means of FEM. Main recommendations relate to the design technique based on crimping of a product into a steel clamping ring while the optimum preload selected that ensures the material in a compression state within all range of workloads.*



**ПАНОВА**  
Ирина Михайловна  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**PANOVA**  
Irina Mikhailovna  
(Moscow, Russian Federation,  
MSTU named  
after N.E. Bauman)

**Keywords:** structural ceramics, technical ceramics, strength, demolition, construction products, mechanical properties.

Потребности современной техники в материалах, сочетающих в себе повышенные эксплуатационные свойства и низкую удельную плотность уже не могут быть обеспечены за счет использования металлических материалов. Керамические материалы привлекают к себе повышенное внимание, поскольку отличаются высокой твердостью, износостойкостью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью и низкой плотностью. Вместе с тем, существенным недостатком керамических материалов является их низкая прочностная надежность. Поэтому изготовление изделий из керамических материалов требует особого комплексного подхода. Во-первых, трудность возникает в оценке механических свойств керамических материалов из-за ряда особенностей, присущих этим материалам. Во-вторых, сам процесс конструирования должен быть основан на анализе данных о напряженно-деформированном состоянии изделия. Дело в том, что керамические материалы получают из дисперсных и ультрадисперсных порошков, с большим содержанием пор, вследствие чего они имеют огромное количество концентраторов напряжений, обладают существенно отличающимися характеристиками при растяжении и сжатии.

Основной метод получения заготовок повышенной прочности из керамических материалов — прессование с последующим спеканием, [1]. В процессе деформирования порошкового компакта внутренняя энергия аккумулируется порошковым материалом неравномерно. Определенная часть ее накапливается в частицах, характеризующихся в микрообъеме упорядоченным строением, свойственным природе рассматриваемого материала, а другая часть сосредотачивается в пространствах между частицами, где находятся поры и интерсоединения. Пористость керамики может достигать 20%. Наличие трещин, возникающих во время спекания из-за разных коэффициентов температурного расширения отдельных зерен материала, наря-

ду с порами, ослабляет материал. Одной из основных целей новейших исследований в области технологии керамических материалов является уменьшение размера и количества трещин и пор [2].

Прочность керамических материалов определяется их склонностью к хрупкому разрушению, поэтому для упрочнения следует найти способы, затрудняющие распространение трещины. Для этого, как уже было сказано, необходимы технологические меры. При этом следует учесть, что трещины и дефекты появляются и при эксплуатации изделия под нагрузкой вследствие различия модулей упругости отдельных фаз. Обычно размер этих вновь появившихся дефектов сопоставим с размерами частиц исходного порошка. Поэтому существует общее правило — использовать мелкодисперсное исходное сырье.

Повышение прочности материала достигается также за счет увеличения вязкости разрушения упрочнением частицами второй фазы. В качестве упрочняющих частиц добавляют оксиды некоторых металлов, создающих определенный энергетический барьер продвижению трещины. В результате критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_c$  может повыситься с 2 до 8 МПа·м<sup>1/2</sup> [2, с. 496].

Определенному среднему размеру трещин и пор в материале соответствует вполне определенное разрушающее напряжение. Достижение значения разрушающего, или критического напряжения вызывает накопление энергии, достаточной для роста трещины. Другими словами, работа внешних сил превышает значение энергии, которое может поглотить материал за счет упругого деформирования и увеличения размеров трещин:

$$\Delta W \geq \Delta U + G_c \Delta A,$$

$\Delta W$  — работа внешних сил;  $\Delta U$  — энергия упругого деформирования;  $G_c$  — энергия образования единицы площади трещины, или вязкость разрушения;  $\Delta A$  — увеличение площади поверхности трещины.

Хрупкое разрушение при критическом напряжении  $\sigma$  произойдет, если трещина в материале достигнет критической длины при выполнении следующего критерия:

$$\sigma\sqrt{\pi a} = \sqrt{G_c E}, \quad (1)$$

где  $a$  — критическая длина трещины;  $E$  — модуль упругости. При этом критический коэффициент интенсивности напряжений

$$K_c = \sqrt{G_c E}. \quad (2)$$

Принципиальное отличие характеристик вязкости и интенсивности напряжений от общепринятых характеристик механических свойств конструкционных материалов состоит в том, что они оценивают локальные свойства материала в вершине трещины и определяются при критических напряжениях и предельных размерах трещины. Анализ трещиностойкости структуры материала признается правильным [3], вместе с тем, судить однозначно о прочности керамики по коэффициенту интенсивности напряжений нельзя, поскольку у разных по структуре материалов он может быть близким по значению [4]. Отметим, что практическое применение этого подхода связано с большими трудностями. Конструирование структуры материала с целью повышения деформационной способности в зоне упругих деформаций является ключевым вопросом при создании керамического материала [5]. Вместе с тем следует различать создание самой керамики и изготовление машиностроительных деталей из нее. Поэтому чаще всего при конструировании изделий из керамических материалов прибегают к оценке механических свойств материала, подобно тому, как это делается для металлов.

Для керамических материалов, как и для металлов, определяют модуль упругости, значение которого существенно выше, чем у металлов, то же самое относится и к твердости. Причиной высоких значений указанных свойств являются [6] ковалентные или ионные межатомные связи в керамических материалах, за счет которых возникает сильное сопротивление решетки движению дислокаций. Значение

напряжения, необходимого для перемещения дислокаций оценивается величиной, близкой к отношению  $E/30$  в то время как для металлов это значение существенно меньше и составляет  $E/10^3$ . По этой же причине керамика имеет очень высокий предел текучести, который составляет примерно 5 ГПа и не подлежит определению обычными методами. При конструировании изделий из керамики пластическая деформация полностью исключается, поскольку возможно только хрупкое разрушение задолго до наступления пластичности. Отметим, что для металлов пластичность микрообъема материала в вершине трещины препятствует росту трещины, благодаря чему металлы имеют высокую вязкость разрушения, а образование зоны локальной пластичности в вершине трещины поглощает часть энергии разрушения, которая в керамических материалах идет на развитие трещины. Это является причиной того, что керамические материалы обладают очень низкой вязкостью разрушения и имеют критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_c$  примерно в 50 раз ниже, чем у металлов. Таким образом, как следует из уравнения (2), прочность керамического материала определяется вязкостью разрушения и критической длиной микротрещин. Предел прочности при растяжении можно рассчитать по выражениям (1) и (2):

$$\sigma_p = K_c / \sqrt{\pi a}.$$

Однако практическая применимость такой оценки прочности, как уже говорилось, весьма затруднительна.

Использование стандартного метода испытания металлических материалов на растяжение не применимо для керамики по трем причинам: 1) из керамики достаточно сложно изготовить образец требуемой геометрической формы; 2) невозможно закрепить образец в захватах испытательной машины, не повредив его; 3) керамика разрушается уже при деформации около 0,1%.

Кроме того, необходимо точно отцентрировать образец, иначе появятся напряжения изгиба, деформация от которых сопоставима с разрушающей [7, с. 227].

Лучшим для определения механических свойств керамики является испытание на поперечный изгиб. Для этого используют образец круглого или прямоугольного поперечного сечения по схеме трех- или четырехточечного изгиба. Наибольшее растягивающее напряжение возникает непосредственно под точкой приложения нагрузки. Поскольку прочность при растяжении керамики составляет примерно 1/10 или 1/15 часть от прочности при сжатии, то разрушение всегда происходит на растянутой поверхности. Напряжение, при котором происходит разрушение, определяют по обычным формулам и называют прочностью на изгиб, а также модулем разрушения, разрушающим напряжением или изгибной прочностью. Деформация некоторого продольного сечения зависит от расстояния  $y$  от нейтральной линии и от некоторого параметра, являющегося функцией отношения  $\sigma_p/\sigma_{сж}$ . Разрушение керамики происходит на внешнем растянутом волокне уже при незначительных деформациях. При этом допускают, что справедлив закон Гука и предельное напряжение на растянутом волокне рассчитывают по обычной формуле. На сжатом волокне предел прочности не реализуется из-за разности свойств керамики при растяжении и сжатии. Эту характеристику определяют отдельным испытанием на сжатие. К недостатком такого подхода оценки свойств керамики следует отнести зависимость разрушающего напряжения от абсолютных размеров образца. Дело в том, что по мере увеличения объема образца возрастает количество дефектов, приводящих к образованию трещин. Прочность на изгиб зависит также и от исходной пористости материала, поскольку поры снижают площадь поперечного сечения образца, воспринимающую нагрузку и одновременно являются концентраторами напряжений. Существует типичная экспоненциальная зависимость, отражающая влияние пористости на прочность при изгибе для образцов из керамики:

$$\sigma_{и}^m P = C_1,$$

где  $\sigma_{и}$  — прочность на изгиб;  $P$  — пористость материала;  $m$  и  $C_1$  — постоянные, зависящие от вида материала.

Кроме испытания на изгиб необходимым является испытание керамики на сжатие. Уже упоминалось, что прочность при сжатии у керамических материалов в 10–15 раз выше, чем при растяжении.

Предел прочности при сжатии

$$\sigma_{сж} = C_2 [K_c / \sqrt{\pi a}],$$

где  $C_2$  — постоянная, зависящая от вида материала,  $C_2 = 10...15$ .

При испытании на сжатие не существует концентраторов напряжений, являющихся следствием образования дефектов в ходе проведения испытания. Поэтому прочность керамики на сжатие всегда больше, чем прочность на растяжение. Для большинства материалов группы конструкционной керамики можно ориентироваться на следующие соотношения:

$$\sigma_{и} \approx 1,7 \sigma_p; \quad \sigma_{сж} \approx 1,5 \sigma_p.$$

Следует принять как данность, что при использовании керамики невозможно быть полностью уверенным, что деталь не разрушится. Значения прочности двух формально идентичных образцов могут отличаться в 3 раза. Это происходит потому, что в одном из образцов трещин критической длины не оказалось, а в другом она присутствует. Керамические материалы не имеют единого показателя прочности, а только вероятность того, что образец имеет данную прочность. Прочность является случайной величиной и зависит от абсолютных размеров образца, поэтому необходима надежная статистическая обработка результатов с применением соответствующего закона распределения. Кроме масштабного-сдвигового семейства нормальных распределений, широко используют ряд других семейств распределения — логарифмически нормальных, экспоненциальных, Вейбулла — Гнеденко, гамма-распределений:

$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{1 - F(x)},$$

где  $F(x)$  и  $f(x)$  — функция распределения и плотность случайной величины  $X$ ,



$$F(x) = 1 - \exp\left(-\int_0^x \lambda(t) dt\right);$$

$$f(x) = \begin{cases} 1 - \exp(-\lambda_0 x^b), & x \geq 0; \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

В работе было использовано распределение, задаваемое формулой, т. е. распределение Вейбулла – Гнеденко. Поскольку

$$\lambda_0 x^b = \left(\frac{x}{a}\right)^b,$$

где

$$a = \lambda_0^{1/b},$$

плотность распределения Вейбулла – Гнеденко имеет вид

$$f(x; a, b, c) = \begin{cases} \frac{b}{a} \left(\frac{x-c}{a}\right)^{b-1} \exp\left[-\left(\frac{x-c}{a}\right)^b\right], & x \geq c; \\ 0, & x < c, \end{cases}$$

где  $a > 0$  — параметр масштаба;  $b > 0$  — параметр формы;  $c$  — параметр сдвига. Экспоненциальное распределение — весьма частный случай распределения Вейбулла – Гнеденко, соответствующий значению параметра формы  $b = 1$ .

Определив, таким образом, значение прочности на изгиб, следует перейти к проработке конструкции детали. Зачастую детали из керамики представляют собой тела вращения типа колец, втулок, полых цилиндров, это может быть сопло, волока, кольцо и т. п. Все детали объединяет то, что такая конфигурация позволяет поместить деталь в стальную обойму, применив соответствующий натяг. Цель такого решения — обеспечить преобладание сжимающих напряжений над напряжениями растяжения. В этом случае успешная эксплуатация изделия будет зависеть от выбора оптимальной величины натяга. Анализ напряженно-деформированного состояния детали методом конечных элементов позволяет выполнить расчет оптимального натяга для всех перечисленных вариантов, и, тем самым перевести материал изделия в благоприятное напряженно-деформированное состояние.

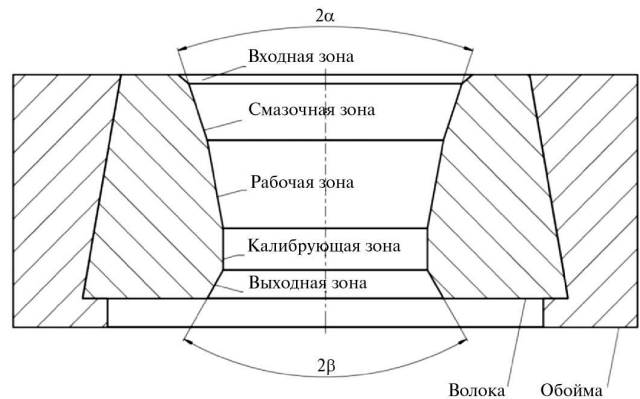


Рисунок. Волока, запрессованная в обойму

Полученные данные позволили в нашем случае оптимизировать конструкцию волоки (рисунок) и выбрать натяг, необходимый для запрессовки волоки в стальную обойму с обеспечением преобладания сжимающих напряжений в волоке.

На рисунке показана волока из материала на основе нитрида кремния, запрессованная в обойму, выполненную из стали 45. Применение этой волоки обеспечило лучшие показатели качества, чем при использовании волок из вольфрамокобальтовых сплавов. Это объясняется полным отсутствием взаимодействия между материалом волоки и протягиваемого металла, более низким значением коэффициента трения в паре волока–протягиваемый металл, более высокой твердостью и износостойкостью волоки.

Разработанная методика оказалась эффективной для изготовления волок из нитрида кремния для волочения труб 12,5×2,5 мм. При использовании волоки была повышена точность размеров готовой трубы и качество ее поверхности при существенно меньшем износе волоки, по сравнению с твердосплавной. Предложенный метод изготовления изделий, с учетом особенностей керамических материалов, можно рекомендовать

к применению и для других деталей типа тел вращения: кольца подшипника, сопла камеры сгорания и др.

## Выводы

1. Техническую керамику можно использовать для изготовления изделий машиностроительного назначения только с применением методов конструирования, учитывающих присущие этим материалам особенности.

2. Условием успешной работы изделия является преобладание в нем напряжений сжатия над напряжениями растяжения во всем диапазоне внешних нагрузок.

3. Изделия типа тел вращения из конструкционной керамики предпочтительно эксплуатировать с запрессовкой во внешние обечайки с рассчитанным оптимальным натягом.

## Литература

1. А. с. 961288 СССР, МКИ С04В35/58, В22F3/14. Способ изготовления керамических изделий / А.И. Целиков, Б.В. Розанов, В.И. Сноп, И.М. Кузнецова (И.М. Панова) и др.; № 2881788/29—33; Заявл. 04.02.80; Опубл. 21.05.82.
2. Эшби М., Джонс Д. Конструкционные материалы / пер. с англ. Полный курс. М.: Издательский дом «Интеллект», 2010. 672 с.
3. Govila R.K., Beardmore P., Kinsman K.R. Strength characterization and nature of crack propagation in ceramic materials. — ASTM STP 733/Ed. L.N. Gilbertsson, R.D. Zipp. 1981. P. 225—245.
4. Davidge R.W. Mechanical behavior of ceramics. Cambridge: Cambridge University Press, 1980. 248 с.

5. Пористая конструкционная керамика / Ю.Л. Красулин, В.Н. Тимофеев, С.М. Баринов и др. М.: Metallurgia, 1980. 346 с.

6. Красулин Ю.Л., Баринов С.М. Иванов В.С. Структура и разрушение материалов из порошков тугоплавких соединений. М.: Наука, 1985. 270 с.

7. Каллистер У.Д., Ретвич Д.Дж. Материаловедение: от технологии к применению (металлы, керамика, полимеры); Пер. с англ. СПб.: Изд-во «Научные основы и технологии», 2011. 896 с.

## References

1. Tselikov A.I., Rozanov B.V., Snop V.I., Kuznetsova I.M., (Panova I.M.) *Sposob izgotovleniia keramicheskikh izdelii* [The method for manufacturing ceramic products]. Avtorskoe svidetel'stvo no. 961288 SSSR, MKI C04B35/58, B22F3/14. Zaiavka no. 2881788/29-33, 1982.
2. Ashby M.F., Jones D.R.H. *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design*. Third Edition. Butterworth-Heinemann, 2005. 438 p. (Russ. ed.: Eshbi M., Dzhons D. *Konstruktsionnye materialy. Polnyi kurs*. Moscow, Izdatel'skii dom «Intellekt», 2010. 672 p.)
3. Govila R.K., Beardmore P., Kinsman K.R. Strength Characterization and Nature of Crack Propagation in Ceramic Materials. ASTM STP 733. Ed. Gilbertsson L.N., Zipp R.D. 1981, pp. 225—245. doi: 10.1520/STP33433S
4. Davidge R.W. *Mechanical behavior of ceramics*. Cambridge, Cambridge University Press, 1980. 248 p.
5. Krasulin Iu.L., Timofeev V.N., Barinov S.M. *Poristaia konstruktsionnaia keramika* [Porous Structural Ceramics]. Moscow, Metallurgiiia publ., 1980. 346 p.
6. Krasulin Iu.L., Barinov S.M. Ivanov V.S. *Struktura i razrushenie materialov iz poroshkov tugoplavkikh soedinenii* [Structure and fracture of materials from powders of refractory compounds]. Moscow, Nauka publ., 1985. 270 p.
7. Kallister U.D., Retvich D.Dzh. *Materialovedenie: ot tekhnologii k primeneniuiu (metally, keramika, polimery)* [Materials: the use of technology (metals, ceramics, polymers)]. Ed. Malkin A.Ia. Sankt-Peterburg, «Nauchnye osnovy i tekhnologii» publ., 2011. 896 p.

Статья поступила в редакцию 21.02.2013

## Информация об авторе

**ПАНОВА Ирина Михайловна** (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: pim-07@mail.ru).

## Information about the author

**PANOVA Irina Mikhailovna** (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Fundamentals of Machine Design» Department. MSTU named after N.E. Bauman (105005, BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya 5, Moscow, Russian Federation, e-mail: pim-07@mail.ru).