

УДК 539.434

doi: 10.18698/0536-1044-2020-11-83-88

## Расчетная оценка длительной прочности циркониевой керамики

**А.А. Алиев**

МГТУ им. Н.Э. Баумана

## Long-Term Strength Estimation of Zirconia Ceramics

**A.A. Aliev**

Bauman Moscow State Technical University

Стандартная экспериментальная оценка ресурса работы высокотемпературных изделий (ГОСТ 4070–2014) из циркониевой керамики требует применения сложного нагревательного и измерительного оборудования и сотен дорогостоящих образцов. Это диктует разработку методов расчетной оценки длительной прочности материалов в зависимости от условий термомеханического нагружения без проведения полного спектра лабораторных испытаний. Существующие расчетно-экспериментальные модели установившейся стадии ползучести керамики рассматривают температурный диапазон до 1600 °С, что меньше предельных рабочих температур диоксида циркония (2000 °С и более). На основе закона Нортон — Бейли проведена расчетная оценка длительной прочности стабилизированной керамики из диоксида циркония. С использованием известных экспериментальных данных для керамики из стабилизированного диоксида циркония ( $0,1\text{Y}_2\text{O}_3 + 0,9\text{ZrO}_2$ ) рассчитаны значения констант ползучести при высокотемпературном (1600...1800 °С) нагружении до 5 МПа. Предложено уравнение степенной регрессии с высокой степенью корреляции, оценивающее ползучесть исследуемого материала при напряжении до 20 МПа и температуре до 2100 °С.

**Ключевые слова:** диоксид циркония, закон Нортон — Бейли, экспериментальные константы ползучести, уравнение степенной регрессии

A standard experimental assessment of the service life of high-temperature zirconia ceramics (GOST 4070–2014) requires the use of complicated heating and measuring equipment and hundreds of expensive specimens. This necessitates the development of calculation methods for evaluating long-term strength depending on the thermomechanical loading conditions without carrying out a full range of laboratory tests. The existing experimental estimation models of the primary and secondary creep regimes of ceramics consider the temperature range up to 1600 °C, which is lower than zirconia limiting operating temperatures (2000 °C and higher). Based on the Norton — Bailey law, long-term strength estimation of fully stabilized zirconia ceramics is carried out. Using previously known experimental data of other authors for ceramics made of fully stabilized zirconia ( $0.1\text{Y}_2\text{O}_3 + 0.9\text{ZrO}_2$ ), the creep constants values were calculated at high-temperature (1600–1800 °C) loading levels  $\leq 5$  MPa. A power-law regression equation with a high degree of correlation that evaluates the creep of the test material under loads up to 20 MPa and temperatures up to 2100 °C is proposed.

**Keywords:** zirconium dioxide, Norton — Bailey power law, experimental creep constants, power regression equation

Для адекватной оценки ресурса перспективных изделий из циркониевой ( $ZrO_2$ ) керамики, работающих в экстремальных теплонапряженных условиях, требуется провести экспериментальные исследования характеристик длительной прочности. Согласно ГОСТ 4070–2014 [1], температура является основным параметром, вызывающим деформацию сжатия при постоянной нагрузке (0,20 или 0,05 МПа).

Помимо сложного нагревательного и измерительного оборудования, необходимого для выполнения подобных лабораторных исследований, изготовление нужного количества (десятков и сотен) образцов [2] из стратегически значимого конструкционного материала\* требует значительных затрат. В связи с этим расчетная оценка длительной прочности диоксида циркония при термомеханическом нагружении чрезвычайно актуальна [3, 4].

В настоящее время известен ряд расчетно-экспериментальных моделей установившейся стадии ползучести керамики [5], основанных на законе Нортона — Бейли, в том числе на примере оксида алюминия [6], магниезиального кирпича [7], оксидов алюминия, циркония и их смесей [8, 9].

Однако все они рассматривают диапазон температур  $T$  до  $1600\text{ }^\circ\text{C}$ , что ниже предельных рабочих температур диоксида циркония, у которого заметная ползучесть начинается при  $T > 1600\text{ }^\circ\text{C}$  [10–13]. Температура размягчения, при которой  $ZrO_2$  полностью переходит из хрупкого состояния в пластичное, находится в интервале  $2100\dots 2300\text{ }^\circ\text{C}$  [11], что является верхним пределом рабочих температур [14].

В общем виде закон Нортона — Бейли может быть выражен как степенная функция деформации  $\varepsilon$  под нагрузкой (напряжением)  $\sigma$ , МПа, за период времени  $t$ , ч, [15]:

$$\varepsilon = A\sigma^n t^m, \text{ ч}^{-1}, \quad (1)$$

где  $A$  — температурно-зависимая константа — коэффициент деформации при ползучести,  $\text{МПа}^{-1} \cdot \text{ч}^{-2}$ ;  $n$  и  $m$  — безразмерные температурно-зависимые константы ползучести.

Авторы работы [16] на основе различных комбинаций температуры, напряжения и вре-

мени математически вывели достаточно громоздкие общие формулы расчета указанных констант.

Цель работы — определение фактических значений температурно-зависимых констант, оптимально согласованных с экспериментальными данными ползучести диоксида циркония при температуре более  $1600\text{ }^\circ\text{C}$  для последующей расчетной оценки его длительной прочности.

**Материалы и методы.** Для численного определения констант ползучести  $A$ ,  $n$  и  $m$  использованы адаптированные экспериментальные данные (табл. 1) по стабилизированной циркониевой керамике ( $0,1Y_2O_3 + 0,9ZrO_2$ ) из работы [17].

Константы ползучести рассчитывали на основе упорядоченных троек — соответствующих экспериментальных значений времени, напряжения и деформации — при температуре  $T = 1600, 1700$  и  $1800\text{ }^\circ\text{C}$  с помощью метода наименьших квадратов.

С учетом того, что для  $ZrO_2$  при напряжении до 20 МПа и высокой температуре зависимость скорости ползучести от нагрузки в основном подчиняется линейному закону [4], для указанных экспериментальных напряжений, не превышающих 5 МПа, константа  $n$  в уравнении (1) принимает значение, равное единице.

Для упрощенного определения констант при каждой температуре, максимальном значении напряжения  $\sigma_{\max}$  и времени  $t = 1$  и 7 ч составлена следующая система степенных уравнений регрессии (при коэффициенте корреляции  $R^2 > 0,95$ ):

$$\varepsilon = A\sigma t^m; \quad (2)$$

при  $T = 1600\text{ }^\circ\text{C}$  и  $\sigma_{\max} = 4,9\text{ МПа}$

$$\varepsilon_{t=1} = A \cdot 4,9 \cdot 1^m = 30,2;$$

$$\varepsilon_{t=7} = A \cdot 4,9 \cdot 7^m = 72,4;$$

при  $T = 1700\text{ }^\circ\text{C}$  и  $\sigma_{\max} = 2,45\text{ МПа}$

$$\varepsilon_{t=1} = A \cdot 2,45 \cdot 1^m = 32,0;$$

$$\varepsilon_{t=7} = A \cdot 2,45 \cdot 7^m = 67,0;$$

при  $T = 1800\text{ }^\circ\text{C}$  и  $\sigma_{\max} = 1,47\text{ МПа}$

$$\varepsilon_{t=1} = A \cdot 1,47 \cdot 1^m = 27,7;$$

$$\varepsilon_{t=3} = A \cdot 1,47 \cdot 3^m = 38,8.$$

\* Вплоть до недавнего времени практически весь объем диоксида циркония на внутрироссийском рынке составлял концентрат, импортируемый из Украины (Состояние и использование минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации. Цирконий. Москва, 2012, с. 233–238).

Таблица 1

## Ползучесть циркониевой керамики при различных значениях температуры испытания

Температура испытания $T$ , °С	Напряжение $\sigma$ , МПа	Деформация $\varepsilon \cdot 10^4$ , ч <sup>-1</sup> , за время $t$ , ч					
		0,5	1,0	2,0	3,0	5,0	7,0
1600	1,47	6,2	7,3	8,7	9,5	10,8	12,3
	2,94	11,8	18,2	25,3	29,8	34,8	40,0
	3,92	12,7	20,2	29,2	35,9	46,0	52,5
	4,90	17,0	30,2	49,7	59,4	67,0	72,4
1700	0,78	6,0	7,1	8,4	9,3	10,5	11,5
	1,96	13,0	17,3	21,5	24,2	27,6	30,5
	2,45	23,3	32,0	42,3	50,1	61,4	67,0
1800	1,18	–	13,2	17,7	20,0	22,7	24,3
	1,47	18,7	27,7	33,4	38,8	–	–

Принимая во внимание, что  $1^m = 1$ , можно элементарно определить значение константы  $A$  для  $t = 1$  при соответствующей температуре, а затем использовать его при расчете величины  $m$  для  $t = 7$  и  $3$  ч.

**Результаты и их обсуждение.** Значения экспериментальных констант ползучести, полученные при напряжении до 5 МПа путем арифметического расчета, приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что с ростом температуры  $T$  значение  $A$  логарифмически возрастает, а значение  $m$  логарифмически убывает. Эти константы могут быть выражены следующими

уравнениями регрессии (при коэффициенте корреляции  $R^2 = 0,998$ ):

$$A = 107,72 \ln T - 788,43; \quad (3)$$

$$m = -1,205 \ln T + 9,34. \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) позволяют рассчитать значения констант ползучести и для повышенных температур (табл. 3).

Подстановка соотношений (3) и (4) в выражение (2) позволило вывести следующее уравнение регрессии для нагрузки  $\sigma < 20$  МПа и диапазона температур  $T = 1600 \dots 2100$  °С:

$$\varepsilon = (107,72 \ln T - 788,43) \sigma t^{-1,205 \ln T + 9,34}.$$

Полученное уравнение дает возможность прогнозировать процесс ползучести диоксида циркония при заданных эксплуатационных пределах.

По сравнению с натурными испытаниями расчетный метод оценки имеет более широкую область применения, так как характеристики длительной прочности могут быть получены для условий, при которых достоверные экспериментальные методы затруднены вследствие ощутимого влияния экстремально высоких температур (более 1800°С) на измерительное оборудование. В подобных случаях вычисленные параметры прочности можно использовать в качестве расчетных (справочных).

Таблица 2

## Значения экспериментальных констант ползучести циркониевой керамики при напряжении до 5 МПа

Температура испытания, $T$ , °С	$A$	$m$
1600	6,163	0,449
1700	13,061	0,380
1800	18,843	0,307

Таблица 3

## Расчетные значения констант ползучести циркониевой керамики для повышенных температур

Расчетная температура, $T$ , °С	$A$	$m$
1900	24,814	0,243
2000	30,339	0,181
2100	35,595	0,122

## Выводы

1. На основе закона Нортона — Бейли и экспериментальных данных определены констан-

ты ползучести диоксида циркония при напряжении до 5 МПа для температур 1600, 1700 и 1800 °С.

2. Показана логарифмическая зависимость констант ползучести от температуры. Предложено соответствующее уравнение регрессии для диапазона температур 1600...2100 °С и нагрузки до 20 МПа, применимое для условий, где достоверная экспериментальная оценка за-

труднена вследствие ощутимого влияния экстремальных температур на измерительное оборудование.

3. Полученные результаты могут быть использованы для оценки эксплуатационной деформации изделий из циркониевой керамики при заданном напряжении за определенный промежуток времени.

## Литература

- [1] ГОСТ 4070–2014. *Изделия огнеупорные. Метод определения температуры деформации под нагрузкой*. Москва, Стандартинформ, 2015.
- [2] ГОСТ 8179–98. *Изделия огнеупорные. Отбор образцов и приемочные испытания*. Москва, ИПК Изд-во стандартов, 2014.
- [3] Павлов П.А. *Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность*. Ленинград, Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1988. 252 с.
- [4] Жигачев А.О., Головин Ю.И., Умрихин А.В., Коренков В.В., Тюрин А.И., Родаев В.В., Дьячек Т.А. *Керамические материалы на основе диоксида циркония*. Москва, ТЕХНОСФЕРА, 2018. 358 с.
- [5] Blond E., Schmitt N., Hild F., Blumenfeld Ph., Poirier J. Modeling of high temperature asymmetric creep behavior of ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2005, vol. 25, pp. 1819–1827, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AST.45.2308>
- [6] Chuang T. *Estimation of Power-Law Creep Parameters from Bend Test Data*. U.S. Department Of Commerce, National Bureau of Standards Center for Materials Science Inorganic Materials Division Gaithersburg, MD 20899, February 1985. 50 p.
- [7] Shengli Jin, Harald Harmuth, Dietmar Gruber. Compressive creep testing of refractories at elevated loads — Device, material law and evaluation techniques. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, vol. 34, pp. 4037–4042, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2014.05.034
- [8] Chevalier J., OLAGNON C., FANTOZZI G., GROS H. Creep behavior of Alumina, Zirconia and Zirconia-Toughened Alumina. *Journal of the European Ceramic Society*, 1997, vol. 17, pp. 859–864.
- [9] Schneider K., Rekas M. *High Temperature Creep of Metal Oxides*. Chapter 4, AGH, University of Science and Technology, Krakow, Poland, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.70876>
- [10] Рутман Д.С., Торопов Ю.С., Плинер С.Ю., Неуймин А.Д., Полежаев Ю.М. *Высокоогнеупорные материалы из диоксида циркония*. Москва, Металлургия, 1985. 136 с.
- [11] Бакунов В.С., Балкевич В.П., Власов А.С., Гузман И.Я., Лукин Е.С., Полубяринов Д.Н., Попильский Р.Я. *Керамика из высокоогнеупорных окислов*. Москва, Металлургия, 1977. 304 с.
- [12] Даукнис В.И., Казакавичус К.А., Пранцклявичус Г.А., Юренас В. *Исследование термической стойкости огнеупорной керамики*. Вильнюс, Минтис, 1971. 150 с.
- [13] Перас А.Я., Даукнис В.И. *Прочность огнеупорной керамики и методы ее исследования*. Вильнюс, Мокслас, 1977. 183 с.
- [14] Bosanegra-Bernal M.H., Torre S.D.D.L. Phase transitions in zirconium dioxide and related materials for high performance engineering ceramics. *Journal of Materials Science*, 2002, vol. 37, no. 3, pp. 4947–4971, doi: 10.1023/A:1021099308957
- [15] Betten J. *Creep Mechanics*. Springer, Berlin, 2008. 52 p.
- [16] May D.L., Gordon A.P., Segletes D.S. The application of the Norton–Bailey law for creep prediction through power law regression. *Proceedings of ASME Turbo Expo, Turbine Technical Conference and Exposition*, June 3–7, 2013, San Antonio, Texas, USA, doi: 10.1115/GT2013-96008
- [17] Рутман Д.С., Торопов Ю.С., Плинер С.Ю., Неуймин А.Д., Полежаев Ю.М. *Высокоогнеупорные материалы из диоксида циркония*. Москва, Металлургия, 1985. 136 с.

## References

- [1] GOST 4070–2014. *Izdeliya ognepornyye. Metod opredeleniya temperatury deformatsii pod nagruzkoy* [State Standart 4070–2014. Refractory products. Method for determination of refractoriness-under-load]. Moscow, Standartinform publ., 2015.
- [2] GOST 8179–98. *Izdeliya ognepornyye. Otor obraztsov i priyemochnyye ispytaniya* [State Standart 8179–98. Refractory products. Sampling and acceptance testing]. Moscow, Standartinform publ., 2014.
- [3] Pavlov P.A. *Osnovy inzhenernykh raschetov elementov mashin na ustalost' i dlitel'nyuyu prochnost'* [Fundamentals of engineering calculations of machine elements for fatigue and long-term strength]. Leningrad, Mashinostroyeniye publ., Leningr. otd-niye, 1988. 252 p.
- [4] Zhigachev A.O., Golovin Yu.I., Umrikhin A.V., Korenkov V.V., Tyurin A.I., Rodayev V.V., D'yachek T.A. *Keramicheskiye materialy na osnove dioksida tsirkoniya* [Ceramic materials based on zirconium dioxide]. Moscow, TEKHNO SFERA publ., 2018. 358 p.
- [5] Blond E., Schmitt N., Hild F., Blumenfeld Ph., Poirier J. Modeling of high temperature asymmetric creep behavior of ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2005, vol. 25, pp. 1819–1827, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AST.45.2308>
- [6] Chuang T. *Estimation of Power-Law Creep Parameters from Bend Test Data*. U.S. Department Of Commerce, National Bureau of Standards Center for Materials Science Inorganic Materials Division Gaithersburg, MD 20899, February 1985. 50 p.
- [7] Shengli Jin, Harald Harmuth, Dietmar Gruber. Compressive creep testing of refractories at elevated loads — Device, material law and evaluation techniques. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, vol. 34, pp. 4037–4042, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2014.05.034
- [8] Chevalier J., Olagnon C., Fantozzi G., Gros H. Creep behavior of Alumina, Zirconia and Zirconia-Toughened Alumina. *Journal of the European Ceramic Society*, 1997, vol. 17, pp. 859–864.
- [9] Schneider K., Rekas M. *High Temperature Creep of Metal Oxides*. Chapter 4, AGH, University of Science and Technology, Krakow, Poland, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.70876>
- [10] Rutman D.S., Toropov Yu.S., Pliner S.Yu., Neuymin A.D., Polezhayev Yu.M. *Vysokoognepornyye materialy iz dioksida tsirkoniya* [High-resistance materials made of zirconium dioxide]. Moscow, Metallurgiya publ., 1985. 136 p.
- [11] Bakunov B.C., Balkevich V.P., Vlasov A.S., Guzman I.Ya., Lukin E.S., Poluboyarinov D.N., Popil'skiy R.Ya. *Keramika iz vysokognepornyykh okislov* [Ceramics made of highly refractory oxides]. Moscow, Metallurgiya publ., 1977. 304 p.
- [12] Dauknis V.I., Kazakavichus K.A., Prantsklyavichus G.A., Yurenas V. *Issledovaniye termicheskoy stoykosti ognepornoy keramiki* [Study of the thermal resistance of refractory ceramics]. Vilnius, Mintis publ., 1971. 150 p.
- [13] Peras A.Ya., Dauknis V.I. *Prochnost' ognepornoy keramiki i metody eye issledovaniya* [Strength of refractory ceramics and methods of its investigation]. Vilnius, Mokslas publ., 1977. 183 p.
- [14] Bocanegra-Bernal M.H., Torre S.D.D.L. Phase transitions in zirconium dioxide and related materials for high performance engineering ceramics. *Journal of Materials Science*, 2002, vol. 37, no. 3, pp. 4947–4971, doi: 10.1023/A:1021099308957
- [15] Betten J. *Creep Mechanics*. Springer, Berlin, 2008. 52 p.
- [16] May D.L., Gordon A.P., Segletes D.S. The application of the Norton–Bailey law for creep prediction through power law regression. *Proceedings of ASME Turbo Expo, Turbine Technical Conference and Exposition*, June 3–7, 2013, San Antonio, Texas, USA, doi: 10.1115/GT2013-96008
- [17] Rutman D.S., Toropov Yu.S., Pliner S.Yu., Neuymin A.D., Polezhayev Yu.M. *Vysokoognepornyye materialy iz dioksida tsirkoniya* [High-resistance materials made of zirconium dioxide]. Moscow, Metallurgiya publ., 1985. 136 p.

## Информация об авторе

**АЛИЕВ Азер Алиназар оглы** — инженер, НИИ СМ; соискатель кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: aliev@bmstu.ru).

## Information about the author

**ALIEV Azer Alinazar** — Engineer, Special Mechanical Engineering Research Institute; Doctoral Candidate, Spacecraft and Launch Vehicles Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: aliev@bmstu.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Алиев А.А. Расчетная оценка длительной прочности циркониевой керамики. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 11, с. 83–88, doi: 10.18698/0536-1044-2020-11-83-88

### Please cite this article in English as:

Aliev A.A. Long-Term Strength Estimation of Zirconia Ceramics. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 11, pp. 83–88, doi: 10.18698/0536-1044-2020-11-83-88



## В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет учебное пособие М.А. Блохина, Н.Т. Гаврюшиной, А.В. Сиротова «Автоматизация и роботизация технологии лесопиления»

Учебное пособие предназначено для самостоятельной проработки студентами дисциплины «Технология автоматизированных производств» и, в частности, изучения основ прикладных и научных исследований при создании новой техники.

Приведены описания современных технологий и способов автоматизации и роботизации создаваемого оборудования, а также представлены решения и расчеты конкретных конструкторско-технологических задач, направленных на создание и эксплуатацию принципиально нового энергосберегающего оборудования повышенной производительности для производства паркета, ламелей, обрезной доски, двухкантного бруса высокого качества.

Для студентов технических вузов, обучающихся по направлению подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств». Пособие может быть полезно для преподавателей и инженеров, а также разработчиков оборудования с круговым поступательным движением полотен (исполнительных элементов).

### По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru