

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-11-66-72>

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗГИБА МАЛОРАЗМЕРНЫХ ДИСКОВ НА КОЛЬЦЕВОЙ ОПОРЕ

© Владимир Юрьевич Гольцев¹, Евгений Григорьевич Григорьев^{2*},
Андрей Вениаминович Осинцев¹, Александр Сергеевич Плотников¹,
Алексей Сергеевич Седегов^{2,3}

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31.

² Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. Мержанова Российской Академии наук (ИСМАН), Россия, 142432, г. Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д. 8; *e-mail: eugengrig@mail.ru

³ Национальный исследовательский технический университет МИСиС, Россия, 119049, Москва, Ленинский просп., д. 4.

*Статья поступила 15 марта 2022 г. Поступила после доработки 10 мая 2022 г.
Принята к публикации 31 мая 2022 г.*

Рассмотрен ряд методов испытания на изгиб тонких дисков на кольцевой опоре, предназначенных для определения прочности на разрыв хрупких материалов. Методы различаются типом нагружающего индентора (с плоским, сферическим или тороидальным наконечниками), опорными приспособлениями и расчетными уравнениями для определения разрушающего напряжения. Приведены результаты испытания образцов на кольцевой опоре, изготовленных из двух модельных материалов — чугуна и графита, различающихся степенью хрупкости. Показано, что расчетная прочность испытанных материалов зависит от характера разрушения образцов и вида диаграммы изгиба. Образцы из чугуна разрушались после значительной пластической деформации (характерна диаграмма изгиба, переходящая через максимум), а прочность образцов на разрыв соответствовала прочности материала при сжатии, т.е. в несколько раз превышала прочность при растяжении. Образцы из графита разрушались хрупко (на линейном участке диаграммы изгиба), и расчетное значение прочности было сопоставимо с прочностью материала при растяжении. Сделан вывод, что применение метода испытания тонких дисковых образцов на кольцевой опоре для определения прочности материала при растяжении обосновано лишь в случае абсолютно хрупкого разрушения образцов, для которых характерна диаграмма изгиба, аналогичная диаграмме разрушения образцов из графита. Двумя методами (с плоским и сферическим наконечниками) испытаны одинаковые дисковые образцы из оксида алюминия, полученные методом электроимпульсного спекания. В обоих случаях диаграмма изгиба образцов из оксида алюминия была такой же, как и образцов из графита, т.е. их разрушение происходило на начальном линейном участке диаграммы абсолютно хрупко. Сравнительные результаты испытания образцов из оксида алюминия с учетом данных испытания образцов из модельных материалов (чугуна и графита) показали, что наиболее обоснованными являются испытания на кольцевой опоре дисков с применением индентора с плоским наконечником. Образцы должны быть изготовлены из хрупких материалов, для которых диаграмма изгиба линейна вплоть до разрушения образца.

Ключевые слова: изгиб диска на кольцевой опоре; прочность на разрыв; малоразмерные образцы; нагружающий индентор.

ANALYSIS OF THE METHODS FOR BENDING SMALL-SIZED DISKS ON A RING SUPPORT

© Vladimir Yu. Goltsev¹, Eugeny G. Grigoryev^{2*}, Andrey V. Osintsev¹,
Aleksandr S. Plotnikov¹, Aleksey S. Sedegov^{2,3}

¹ National Research Nuclear University “MEPhI”, 31, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia.

² Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences, 8, Akademika Osipyana ul., Chernogolovka, Moscow obl., 142432, Russia; *e-mail: eugengrig@mail.ru

³ National University of Science and Technology “MISIS”, 4 Leninskiy prosp., Moscow, 119049, Russia.

Received March 15, 2022. Revised May 10, 2022. Accepted May 31, 2022.

A number of methods for testing bending of thin discs on an annular support designed to determine the tensile strength of brittle materials, are considered. The methods differ in the type of a loading indenter

(with flat, spherical, or toroidal tips), support devices, and calculation equations for determination of the breaking stress. The results of testing samples on an annular support made of two model materials which differ in the degree of brittleness, i.e., cast iron and graphite, are presented. It is shown that the calculated strength of the tested materials depends on the character of the sample destruction and on the type of bending diagram. Cast iron samples were destructed under a significant plastic deformation (characteristic bending diagram passed through the maximum), and the tensile strength of the samples corresponded to the compressive strength of the material being several times higher than the tensile strength of the material. Graphite samples underwent brittle fracture (within the linear section of the bending diagram), and the calculated strength value was comparable to the tensile strength of the material. A conclusion is made that the use of the test method of thin disk samples on an annular support for determination of the tensile strength of the material is substantiated only in the case of absolutely brittle fracture of samples with a bending diagram similar to the fracture diagram of graphite samples. Disk samples made of aluminum oxide obtained by electro-pulse sintering were tested using two methods (with flat and spherical tips). In both cases, the bending diagram of aluminum oxide samples was similar to that of graphite samples, i.e., their destruction occurred at the initial linear section of the diagram and was absolutely brittle. The results of comparative testing of the samples made of aluminum oxide, taking into account the results of testing samples made of model materials (cast iron and graphite), showed that tests on the annular support of disks using a flat-tipped indenter are the most grounded. The samples should be made of brittle materials having a linear bending diagram up to the sample destruction.

Keywords: disk bending on an annular support; tensile strength; small-sized samples; loading indenter.

Введение

Активное развитие технологии консолидации порошковых материалов с применением электромагнитных полей [1 – 8] способствовало совершенствованию методов оценки хрупкой прочности материалов при испытании малоразмерных образцов. Очевидно, что наиболее простым является метод изгиба диска на кольцевой опоре, предложенный в 1948 г. [9]. При испытании стальных дисков толщиной 3 и диаметром 58 мм из стали 30ХГСА, закаленных и отпущенных при различных температурах, определяли нагрузку и прогиб при разрушении образцов. В дальнейшем на основе этого метода была принята методика испытания дисков на кольцевой опоре, нагружаемых центрально индентором с плоским наконечником [10]. В работе [11] данная схема обоснована для испытания малоразмерных дисков диаметром 10 и толщиной от 1 мм. В последние годы предложен ряд новых методов изгиба тонких дисков на кольцевой опоре [12 – 14]. Все они основаны на теории Тимошенко [15] и различаются опорными приспособлениями, нагружающими инденторами и, соответственно, расчетными формулами для определения прочности материала по результатам испытания образцов. Некоторые из них стандартизованы. Естественно, возникает вопрос о соотношении результатов испытания одних и тех же образцов при использовании различных методов. Цель данного исследования — сопоставление результатов изгиба на кольцевой опоре одинаковых дисковых образцов из α -оксида алюминия, полученных методом электроимпульсного спекания, с применением трех типов инденторов — с плоской торцевой, сферической и тороидальной поверхностями.

Методы испытания тонких дисков на изгиб на кольцевой опоре

Рассмотрим три метода изгиба тонких дисков на кольцевой опоре. Разрушающие напряжения (прочность материала) определяли по формулам теории изгиба тонких пластин в предположении разрушения диска под действием максимальных растягивающих напряжений.

Наиболее простой из них — изгиб диска на кольцевой опоре, нагружаемого индентором с плоским наконечником [10] (рис. 1). Разрушающее напряжение рассчитывают по максимальной нагрузке ($P_{\max}$), выдерживаемой образцом до разрушения, при линейной диаграмме нагрузка P – прогиб f по формуле

$$\sigma = \frac{3P_{\max}}{8\pi h^2} \left[4 - (1 - \mu) \left(\frac{d}{D} \right)^2 + 4(1 + \mu) \ln \frac{d}{D} \right], \quad (1)$$

где h — толщина диска; d и D — диаметры плоской поверхности наконечника пуансона и опоры соответственно; μ — коэффициент Пуассона.

Формула (1) получена в предположении равномерного распределения давления по пятну контакта индентора с диском и шарнирного опирания диска на внутреннюю кромку кольцевой опоры, а также того, что диаметр диска несущественно превышает внутренний диаметр кольцевой опоры. В данном месте применяют смазки для снижения трения между образцом и опорой, а также индентором и направляющей обоймой. Чтобы обеспечить равномерность контактного давления между индентором и образцом, диаметр контактной части индентора выбирают относительно небольшим.

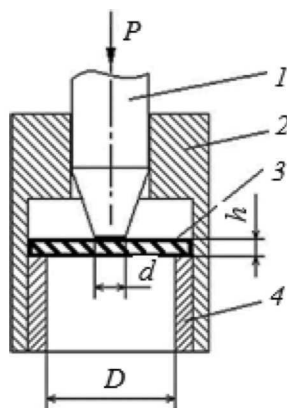


Рис. 1. Схема изгиба диска на кольцевой опоре, нагружаемого индентором с плоским наконечником: 1 — индентор; 2 — обойма — направляющая; 3 — образец; 4 — опорное кольцо

Fig. 1. Diagram of disk bending on an annular support loaded with an indenter with a flat tip: 1 — indenter; 2 — guide cage; 3 — sample; 4 — support ring

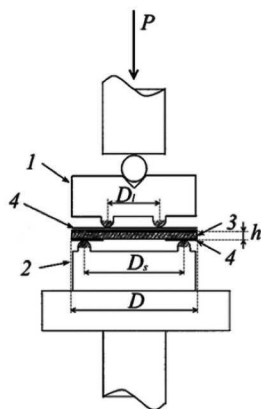


Рис. 2. Схема испытания в соответствии со стандартом [12]: 1 — нагружающее приспособление; 2 — опорное приспособление; 3 — образец; 4 — прокладки для равномерности нагрузки и снижения трения

Fig. 2. Test scheme in accordance with the ASTM C1499-09 Standard: 1 — loading device; 2 — support device; 3 — sample; 4 — gaskets for load uniformity and friction reduction

Метод испытания, описанный в стандарте [12], предусматривает опирание и нагружение образца через специальные приспособления с тороидальными поверхностями (рис. 2). Данная схема исключает нарушение равномерного контактного давления между индентором и образцом, что делает ее более совершенной по сравнению в вышеописанной. Испытывают образцы как после механической обработки, так и без нее. В последнем случае применяют специальные прокладки для выравнивания нагрузки по нагружаемому кольцу. Кроме того, используют прокладки или смазки для снижения трения между

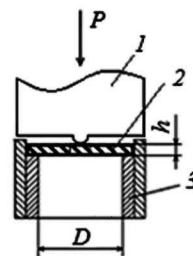


Рис. 3. Схема испытания диска на кольцевой опоре нагружающим индентором со сферическим наконечником: 1 — нагружающий индентор; 2 — образец; 3 — опорное кольцо

Fig. 3. Test scheme for a disk on an annular support loaded by an indenter with a spherical tip: 1 — loading indenter; 2 — sample; 3 — support ring

образцом и приспособлениями. Разрушающее напряжение рассчитывают по формуле

$$\sigma = \frac{3P}{2\pi h^2} \left[(1 - \mu) \frac{D_s^2 - D_l^2}{2D^2} + (1 + \mu) \ln \frac{D_s}{D_l} \right], \quad (2)$$

где P — максимальная нагрузка при разрушении диска; h — толщина диска. Формула (2) получена для расчетной схемы диска диаметром D , нагруженного силой, распределенной по кругу диаметром D_l , и опертого без трения по диаметру D_s . Диаметры контактных поверхностей нагружающего и опорного приспособлений и размеры образца выбирают таким образом, чтобы удовлетворить ряду ограничений:

$$0,2 \leq \frac{D_l}{D_s} \leq 0,5, \quad \frac{D_s}{10} \geq h \geq \sqrt{\frac{2\sigma_f D_s^2}{3E}}, \quad 2 \leq \frac{D - D_s}{h} \leq 12,$$

где σ_f — ожидаемое напряжение разрушения материала образца; E — модуль упругости материала образца.

В работе [13] предложена схема испытания тонких дисков на кольцевой опоре нагружающим индентором со сферическим наконечником диаметром 2 мм (рис. 3).

Разрушающее напряжение вычисляют по формуле

$$\sigma = \frac{P}{h^2} \left[(1 + \mu) \left(0,485 \ln \frac{D}{2h} + 0,52 \right) + 0,48 \right], \quad (3)$$

которая получена из расчетной схемы диска, нагруженного точечной силой в центре и шарнирно опертого по контуру. Напряжения, определяемые формулой (3), достигаются в малой области под индентором, на противоположной от него поверхности. Это имеет значение для неоднородных образцов, когда область локализации напряжений меньше характерного размера неоднород-

ности материала. При испытании по данной схеме важное требование — обеспечение соосности опорного кольца и индентора. Кроме того, как и в случае испытания диска на кольцевой опоре с нагружением индентором с плоским наконечником, диаметр образца не должен значительно превышать внутренний диаметр опорного кольца. Несоблюдение этих требований приводит к нарушению границ применения формулы (3). Авторы метода не оговаривали эти границы по соотношению размеров.

Кроме рассмотренных выше методик, можно также отметить стандарт [14], в котором отмечены требования и методы тестирования стоматологических керамик. В нем приведена методика испытания таких керамик по схеме нагружения индентором с плоским наконечником и опиранием на три точки. Стандарт предписывает использование в качестве опоры трех шариков диаметром $4,5 \pm 2$ мм, расположенных на окружности 11 ± 1 мм через 120° . Нагружение проводят индентором с плоским наконечником диаметром $1,4 \pm 0,2$ мм. Образцы имеют диаметр 14 ± 2 мм и толщины $1,2 \pm 0,2$ мм или $1,5 \pm 0,5$ мм в зависимости от типа керамики. Разрушающие напряжения рассчитывают по формуле

$$\sigma = -0,2387 \frac{P}{h^2} \left[(1 + \mu) \ln \left(\frac{D_l}{D} \right)^2 + \frac{1 - \mu}{2} \left(\frac{D_l}{D} \right)^2 - (1 + \mu) \left(1 + \ln \left(\frac{D_s}{D} \right)^2 \right) - (1 - \mu) \left(\frac{D_s}{D} \right)^2 \right], \quad (4)$$

где D_l и D_s — диаметры расположения опорных шариков и индентора соответственно.

Образцы для испытаний

Для исследования использовали диски из оксида алюминия, изготовленные методом спарк-плазменного спекания (СПС). Исходным материалом служил порошок Al_2O_3 со средним размером частиц 1 мкм сферической формы, полученный в плазме электродугового разряда [16]. Процесс СПС проводили в вакууме на установке LABOX-625 в графитовой пресс-форме с внутренним диаметром 15 мм при постоянном давлении на спекаемый образец 50 МПа. Скорость нагрева образцов составляла $100^\circ C/мин$, максимальная температура спекания — $1350^\circ C$, выдержка при максимальной температуре спекания — 10 мин. Скорость охлаждения образцов от максимальной температуры спекания до $600^\circ C$ составляла $50^\circ C/мин$, дальнейшее охлаждение проходило при отключенном источнике тока естественным путем. Спеченные образцы представляли собой диски толщиной 2 – 3 мм.

Испытания дисковых образцов на изгиб на кольцевой опоре

В [17] представлены результаты сравнительных испытаний одинаковых дисков из чугуна и графита по схемам, приведенным на рис. 1 и 3. Отмечен различный характер диаграмм нагрузка – прогиб дисков из чугуна и графита. Для чугуна характерен плавный переход через максимум нагрузки, без скачков трещин, что обычно присуще пластичным материалам. При испытании графитовых образцов наблюдали практически линейную диаграмму нагрузка – прогиб до максимальной нагрузки, а затем — скачкообразное распространение трещин до полного разрушения образцов, характерное для хрупких материалов. Приведенные диаграммы свидетельствуют о том, что графит является более хрупким материалом, чем чугун.

Для чугунных дисков средние расчетные значения прочности, определенные по результатам испытания образцов по двум схемам, оказались существенно больше, чем прочность материала на растяжение. Отмечен значительный разброс значений при испытании по схеме на рис. 3, которые оказались на 30 % выше, чем по схеме на рис. 1. Из этого следует, что для материалов, проявляющих себя при испытании как пластичные, метод изгиба диска на кольцевой опоре не может быть использован для определения их сопротивления разрыву (прочности на растяжение).

Прочность графита, определенная по результатам испытания на изгиб дисковых образцов с использованием плоского индентора, оказалась близка прочности на растяжение графита. Она превысила прочность материала при растяжении на 28 %. Расчетное значение прочности графита на растяжение при испытании образцов по схеме, представленной на рис. 3, оказалось почти в два раза больше истинного. Несмотря на то, что диапазон нагрузок разрушения образцов графита, испытанных по обеим схемам (см. рис. 1 и 3), оказался одинаковым, средние расчетные значения прочности различались существенно (на 30 % больше при использовании схемы на рис. 3). Этот эффект будет объяснен ниже.

В таблице представлены результаты изгиба на кольцевой опоре дисков оксида алюминия Al_2O_3 с применением инденторов двух типов. При расчете разрушающего напряжения приняли $\mu = 0,24$.

На рис. 4 приведены характерные диаграммы изгиба дисков оксида алюминия, полученные с применением инденторов с плоским и сферическим наконечниками.

Разрушение дисков оксида алюминия было абсолютно хрупким с динамическим разделением на мелкие осколки при максимальной нагрузке и

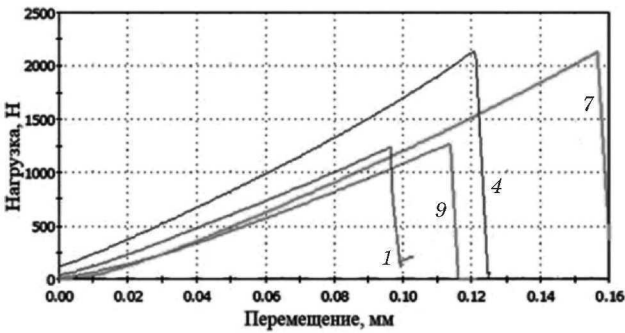


Рис. 4. Характерные диаграммы изгиба дисков на кольцевой опоре, полученные с применением инденторов с плоским и сферическим наконечниками: цифрами обозначены номера образцов в таблице

Fig. 4. Characteristic bending diagrams of disks on an annular support obtained using indenters with flat and spherical tips: figures mark the sample number in the table

линейных диаграммах изгиба вплоть до разрушения. Это свидетельствует о том, что оксид алюминия по сравнению с графитом является более хрупким материалом. В этой связи можно ожидать, что при изгибе дисков оксида алюминия индентором с плоским наконечником будет получено истинное сопротивление материала разрыву с учетом тенденции приближения расчетной прочности материалов по формуле (1) к истинному значению прочности при растяжении с увеличением хрупкости (от чугуна к графиту и оксиду алюминия). При этом предпочтение следует отдать методу испытания дисковых образцов на кольцевой опоре с использованием индентора с плоским наконечником по сравнению с применением индентора со сферическим наконечником. Результаты испытания дисков оксида алюминия с применением индентора со сферическим наконечником оказались выше на 23 % и имели существенно больший разброс значений (см. таблицу).

Анализируя результаты испытаний, представленные на рис. 4 и в таблице, и учитывая

данные испытания образцов из графита [17], можно отметить следующее.

1. Диапазон нагрузок хрупкого разрушения образцов (графит, оксид алюминия) двумя методами испытания практически одинаков, тогда как разрушающие напряжения значительно отличаются.

2. Различие разрушающих напряжений уменьшается (от 1,5 до 1,2 раза) с увеличением толщины образцов.

Разберем этот эффект. Учитывая единый диапазон нагрузок разрушения образцов двумя методами, представим формулы (1) и (3) в виде произведения одинакового параметра P/h^2 , имеющего размерность напряжения, и безразмерных коэффициентов k_1 и k_3 соответственно для формул (1) и (3). Таким образом, разрушающие напряжения отличались зависимостями констант k_1 и k_3 от входящих в них величин. Так, в формулу для коэффициента k_1 входят коэффициент Пуассона μ , отношение диаметров D/d , которые не зависят от толщины испытываемого образца. Коэффициент k_3 зависит от коэффициента Пуассона и отношения диаметра опорного кольца к толщине образца ($D/2h$), что, естественно, приводит к изменению k_3 при варьировании толщины испытываемого образца. На рис. 5 приведена зависимость коэффициентов k_1 , k_2 и k_3 от толщины испытываемого образца.

Зависимость коэффициента k_3 от толщины образца практически линейная, причем увеличение h от 1,4 до 2,7 мм (допустимый диапазон изменения толщины для образца диаметром 15 мм, испытываемого на кольцевой опоре) приводит к снижению k_3 с 2,07 до 1,66 при $\mu = 0,3$. В этом диапазоне толщин k_3 всегда больше k_1 , равного 1,23 при $\mu = 0,3$ и 1,17 при $\mu = 0,2$. Изменение μ с 0,3 на 0,2 практически не сказывается на коэффициентах k_1 и k_3 . Анализируя с этих же позиций соотношения между результатами, полученными при применении сферического и торои-

Результаты испытания дисков из оксида алюминия

The results of testing aluminum oxide discs

Образец	Наконечник индентора	h , мм	P_{max} , Н	σ_{max} , МПа	$\langle \sigma_{max} \rangle$, МПа
1	Плоский	2,7	1240	204	250
2		3,2	1920	225	
3		2,4	1290	269	
4		3,0	2140	285	
5		3,0	2025	270	
6	Сферический	2,3	883	284	308
7		3,2	2130	313	
8		2,2	713	255	
9		2,6	1270	306	
10		2,7	1750	385	

дального наконечников, и данными расчета по формулам (2) и (3) в предположении совпадения нагрузок разрушения образцов одинаковой толщины, приходим к выводу, что расхождение будет еще больше (соотношение между коэффициентами k_2 и k_3).

Для оценки сопротивления разрыву образцов толщиной более 3 мм при диаметре 15 мм необходимо использовать другие методы испытания, например, диаметрально сжатие («бразильский тест») [18].

Заключение

Показано, что расчетная прочность дисков, испытанных на изгиб на кольцевой опоре, зависит от характера их разрушения, вида диаграммы изгиба и может представлять собой прочность материала, приближающуюся к прочности при сжатии (чугун), прочность при растяжении (оксид алюминия) или прочность, приближающуюся к прочности при растяжении (графит). Наиболее обоснованными оказались результаты испытаний, полученные с применением индентора с плоским наконечником (совпадают с характеристиками прочности материалов и имеют минимальный разброс значений). Дано объяснение расхождению результатов испытаний с использованием двух типов инденторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Munir Z. A., Anselmi-Tamburini U., Ohyanagi M. The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: A review of the spark plasma sintering method / *Journal of Materials Science*. 2006. Vol. 41. P. 763 – 777. DOI: 10.1007/s10853-006-6555-2
2. Min Yu., Grasso Salvatore, Mckinnon Ruth, Saunders Theo and Reece Michael J. Review of flash sintering: materials, mechanisms and modeling / *Advances in Applied Ceramics*. 2017. Vol. 116. N 1. P. 24 – 60. DOI: 10.1080/17436753.2016.1251051
3. Menezes R. R., Sout P. M., Kiminami R. H. G. A. Microwave sintering of ceramics. Part I: Fundamental aspects / *Ceramica*. 2007. Vol. 53. Issue 325. P. 1 – 10.
4. Bashlykov S. S., Demenyuk V. D., Grigor'ev E. G., et al. Electropulse consolidation of UN powder / *Inorg. Mater.: Appl. Res.* 2014. Vol. 5. P. 278 – 283. DOI: 10.1134/S2075113314030034
5. Kozlík J., Becker H., Straský J., et al. Manufacturing of fine-grained titanium by cryogenic milling and spark plasma sintering / *Materials Science & Engineering: A*. 2020. Vol. 772. 138783. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138783
6. Ratzker B., Wagner A., Kalabukhov S., et al. Non-uniform microstructure evolution in transparent alumina during dwell stage of high-pressure spark plasma sintering / *Acta Materialia*. 2020. Vol. 199. P. 469 – 479. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.08.036
7. Liang Y., Xiang S., Li T., Zhang X. Ultrafast fabrication of high-density Al-12Si compacts with gradient structure by electro-discharge sintering / *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 54. P. 301 – 308. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.03.013
8. Van der Laan A., Boyer V., Ephre R., Estournes C. Simple method for the identification of electrical and thermal contact resistances in spark plasma sintering / *Journal of the European Ceramic Society*. 2021. Vol. 41. P. 599 – 610. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.08.073

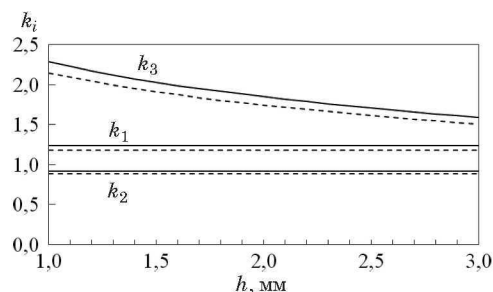


Рис. 5. Зависимости коэффициентов k_1 , k_2 и k_3 от толщины испытываемого образца при $\mu = 0,3$ (сплошная линия) и $\mu = 0,2$ (пунктир)

Fig. 5. Dependence of coefficients k_1 , k_2 , and k_3 on the thickness of the test sample at $\mu = 0.3$ (solid line) and $\mu = 0.2$ (dotted line)

9. Фридман Я. Б., Ройтман И. М. Испытание на изгиб дисков с опорой по контуру / *Заводская лаборатория*. 1948. Т. 14. № 10. С. 1238 – 1240.
10. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов (справочное пособие под общей ред. А. Т. Туманова). Т. II. Методы исследования механических свойств металлов. — М.: Машиностроение, 1974. — 320 с.
11. Goltsev V. Y. and Gribov N. A. The Use of Thin Disc Samples for the Determination of the Tear Resistance of Brittle Materials / 15th International School-Conference “New materials — Materials of innovative energy: development, characterization methods and application” / *KnE Materials Science*. 2017. P. 148 – 154. DOI: 10.18502/kms.v4i1.2139
12. ASTM C 1499–09. Standard Test Method for Montonics Equibiaxial Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature.
13. Khaleghi E., Yen-Shan Lin, Meyers M. A. and Olevsky E. A. Spark plasma sintering of tantalum carbide / *Scripta Materialia*. 2010. Vol. 63. P. 577 – 580. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2010.06.006
14. ISO 6872. Dentistry-ceramic materials. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.
15. Timoshenko S. Theory of Plates and Shells. — New York: McGraw-Hill, 1940. — 492 p.
16. Самохин А. В., Алексеев Н. В., Цветков Ю. В. Плазмохимические процессы создания нанодисперсных порошковых материалов / *Химия высоких энергий*. 2006. Т. 40. № 2. С. 120 – 126.
17. Goltsev V. Yu., Grigoriev E. G., Osintsev A. V., et al. Comparison of two test methods for bending small disks on an annular support / *IOP Publishing. Journal of Physics: Conference Series*. 1431(2020). 012014. DOI: 10.1088/1742-6596/1431/1/012014
18. Grigoryev E. G., Goltsev V. Yu., Gribov N. A., et al. Determination of the Mechanical Properties of the Materials Produced by Electric Pulse Powder Consolidation / *Russian Metallurgy*. 2020. N 4. P. 493 – 499. DOI: 10.1134/S0036029520040096

REFERENCES

1. Munir Z. A., Anselmi-Tamburini U., Ohyanagi M. The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: A review of the spark plasma sintering method / *Journal of Materials Science*. 2006. Vol. 41. P. 763 – 777. DOI: 10.1007/s10853-006-6555-2
2. Min Yu., Grasso Salvatore, Mckinnon Ruth, Saunders Theo and Reece Michael J. Review of flash sintering: materials, mechanisms and modeling / *Advances in Applied Ceramics*. 2017. Vol. 116. N 1. P. 24 – 60. DOI: 10.1080/17436753.2016.1251051
3. Menezes R. R., Sout P. M., Kiminami R. H. G. A. Microwave sintering of ceramics. Part I: Fundamental aspects / *Ceramica*. 2007. Vol. 53. Issue 325. P. 1 – 10.

4. **Bashlykov S. S., Demenyuk V. D., Grigor'ev E. G., et al.** Electropulse consolidation of UN powder / *Inorg. Mater.: Appl. Res.* 2014. Vol. 5. P. 278 – 283. DOI: 10.1134/S2075113314030034
5. **Kozlík J., Becker H., Straský J., et al.** Manufacturing of fine-grained titanium by cryogenic milling and spark plasma sintering / *Materials Science & Engineering: A*. 2020. Vol. 772. 138783. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138783
6. **Ratzker B., Wagner A., Kalabukhov S., et al.** Non-uniform microstructure evolution in transparent alumina during dwell stage of high-pressure spark plasma sintering / *Acta Materialia*. 2020. Vol. 199. P. 469 – 479. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.08.036
7. **Liang Y., Xiang S., Li T., Zhang X.** Ultrafast fabrication of high-density Al-12Si compacts with gradient structure by electro-discharge sintering / *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 54. P. 301 – 308. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.03.013
8. **Van der Laan A., Boyer V., Epherre R., Estournes C.** Simple method for the identification of electrical and thermal contact resistances in spark plasma sintering / *Journal of the European Ceramic Society*. 2021. Vol. 41. P. 599 – 610. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.08.073
9. **Fridman Ya. B., Roitman I. M.** Bending test of discs with contour support / *Zavod. Lab.* 1948. Vol. 14. N 10. P. 1238 – 1240 [in Russian].
10. **Tumanov A. T.** (ed.) *Methods of testing, control and research of machine-building materials. Vol. II. Methods of research of mechanical properties of metals.* — Moscow: Mashinostroenie, 1974. — 320 p. [in Russian].
11. **Goltsev V. Y. and Gribov N. A.** The Use of Thin Disc Samples for the Determination of the Tear Resistance of Brittle Materials / 15th International School-Conference “New materials — Materials of innovative energy: development, characterization methods and application” / *KnE Materials Science*. 2017. P. 148 – 154. DOI: 10.18502/kms.v4i1.2139
12. **ASTM C 1499-09.** Standard Test Method for Montonics Equibiaxial Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature.
13. **Khaleghi E., Yen-Shan Lin, Meyers M. A. and Olevsky E. A.** Spark plasma sintering of tantalum carbide / *Scripta Materialia*. 2010. Vol. 63. P. 577 – 580. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2010.06.006
14. **ISO 6872.** Dentistry-ceramic materials. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.
15. **Timoshenko S.** *Theory of Plates and Shells.* — New York: McGraw-Hill, 1940. — 492 p.
16. **Samokhin A. V., Alekseev N. V., Tsvetkov Yu. V.** Plasma chemical processes of creation of nanodisperse powder materials / *Khim. Vysok. Tekhnol.* 2006. Vol. 40. N 2. P. 120 – 126 [in Russian].
17. **Goltsev V. Yu., Grigoriev E. G., Osintsev A. V., et al.** Comparison of two test methods for bending small disks on an annular support / *IOP Publishing. Journal of Physics: Conference Series*. 1431(2020). 012014. DOI: 10.1088/1742-6596/1431/1/012014
18. **Grigoryev E. G., Goltsev V. Yu., Gribov N. A., et al.** Determination of the Mechanical Properties of the Materials Produced by Electric Pulse Powder Consolidation / *Russian Metallurgy*. 2020. N 4. P. 493 – 499. DOI: 10.1134/S0036029520040096