

**Механика материалов:
прочность, ресурс, безопасность****Materials mechanics:
strength, durability, safety**DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-7-45-50>**ДИАМЕТРАЛЬНОЕ СЖАТИЕ КОРОТКИХ ЦИЛИНДРОВ
С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ОТВЕРСТИЕМ КАК МЕТОД ОЦЕНКИ
СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРЫВУ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ****© Владимир Юрьевич Гольцев*, Андрей Вениаминович Осинцев,
Александр Сергеевич Плотников, Валерий Игоревич Польский**

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

*e-mail: gvv587@gmail.com*Статья поступила 27 января 2023 г. Поступила после доработки 27 января 2023 г.
Принята к публикации 28 февраля 2023 г.*

Исследована возможность оценки сопротивления разрыву хрупких материалов путем испытания диаметральной сжатием коротких цилиндров — сплошных и с центральным отверстием. Расчетный анализ выполнен методом конечных элементов с применением программы ANSYS. Показано, что распределение напряжений в диске с отверстием аналогично их распределению в диске без отверстия, но имеет возмущения, внесенные концентратором напряжений в виде отверстия. Нормированные значения максимальных первых главных напряжений для диска с отверстием более чем в 5 раз превышают таковые для диска без отверстия. Экспериментальный анализ проведен путем испытания коротких цилиндров как сплошных, так и с центральным отверстием, изготовленных из хрупких материалов — чугуна и графита. Установлено, что сопротивление разрушению, определенное по формуле стандарта ASTM D3967-95a, для сплошных образцов из чугуна практически не отличается, а для образцов из графита отличается в 1,5 раза от истинного сопротивления разрыву материалов. При испытании образцов из чугуна и графита с центральным отверстием сопротивления разрыву отличаются от стандартного соответственно в 1,5 и почти в 2,5 раза. Отмечен и разный характер разрушения образцов — медленный контролируемый разрыв чугуна и динамическое разрушение графита при соответствующих диаграммах деформирования. В качестве примера приведены результаты испытания реальных цилиндрических образцов с центральным отверстием — топливных таблеток диоксида урана. Показано, что результаты испытания образцов из графита APB-1 и топливных таблеток хорошо согласуются. Таким образом, подтверждена возможность испытания малоразмерных коротких цилиндров по схеме диаметральной сжатия для косвенной оценки прочности на растяжение хрупких материалов. Предложена расчетная формула для косвенной оценки прочности на растяжение хрупких материалов по результатам испытаний малоразмерных коротких цилиндров как с центральным отверстием, так и без него по схеме диаметральной сжатия.

Ключевые слова: диаметральной сжатие; короткие цилиндры с центральным отверстием; сопротивление разрыву; хрупкие материалы.**DIAMETRAL COMPRESSION OF SHORT CYLINDERS WITH A CENTRAL HOLE
AS A METHOD FOR ASSESSING THE TEAR RESISTANCE OF BRITTLE MATERIALS****© Vladimir Yu. Goltsev*, Andrey V. Osintsev, Aleksandr S. Plotnikov, Valeriy I. Polskij**

National Research Nuclear University «MEPhI», 31, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia;

*e-mail: gvv587@gmail.com*Received January 27, 2023. Revised January 27, 2023. Accepted February 28, 2023.*

The possibility of evaluating the tear resistance of brittle materials by diametral compression test of short cylinders (solid and central with a central hole) has been analyzed. The computational analysis was performed by the finite element method using the ANSYS program. It is shown that the stress distribution in a disk with a hole is similar that without a hole but contains disturbances introduced by a stress concentrator in the form of a hole. The normalized values of the maximum first principal stresses for a disk with

a hole exceed the values for a disk without a hole by more than 5 times. The experimental analysis was carried out by testing short cylinders, both solid and with a central hole, made of brittle materials: cast iron and graphite. It is noted that the fracture resistance, determined by the formula recommended by the ASTM D3967 – 95a standard, practically does not differ for solid cast iron samples, and for graphite differs by 1.5 times from the true tear resistance of materials; when testing samples with a central hole, the tear resistance differs from the standard values by a factor of 1.5 and almost 2.5, respectively. The different nature of the sample destruction is also noted: slow controlled rupture of cast iron and dynamic destruction of graphite with the corresponding deformation diagrams. The results of testing fuel pellets of uranium dioxide are given as an example of testing real cylindrical samples with a central hole. It is shown that the test results of ARV-1 graphite samples are in good agreement with the test results of fuel samples. Thus, the possibility of testing small-sized short cylinders according to the diametral compression scheme for indirect assessment of the tensile strength of brittle materials has been confirmed. A calculation formula is proposed for an indirect assessment of the tensile strength of brittle materials based on the results of testing small-sized short cylinders, both with and without a central hole according to the diametral compression scheme.

Keywords: diametral compression; short cylinders with a central hole; tear resistance; brittle materials.

Введение

Для оценки прочности малопластичных материалов на разрыв все большее применение находит метод испытания коротких цилиндров (толстых дисков) по схеме диаметального сжатия образца [1 – 16]. Испытания проводят в соответствии со стандартом ASTM D3967-95a, который предназначен для испытания образцов горных пород [17, 18]. Диаметр образцов горной породы принят равным 50 мм, толщина — от 0,2 до 0,75 диаметра.

В работе исследована возможность использования этого метода при испытании малогабаритных коротких цилиндров с центральным отверстием для определения прочности хрупких материалов, таких как карбиды, нитриды и другие. Особенно важным данный метод оказался для оценки прочности материалов, полученных электроимпульсной консолидацией порошков [19 – 21].

Расчетный анализ нагружения диска с центральным отверстием и без него по схеме диаметального сжатия

Детальный расчетный анализ нагружения малоразмерного сплошного диска по схеме диаметального сжатия (бразильского теста) представлен в работе [22]. Показано, что при такой схеме нагружения дискового образца в его диаметальной плоскости возникают растягивающие напряжения, которые приводят к хрупкому

разрушению малопластичных материалов. Сопротивление материала разрыву рассчитывают по формуле, рекомендованной стандартом ASTM D3967-95a,

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi LD}, \quad (1)$$

где P — максимальная нагрузка в момент разрушения образца; L и D — толщина и диаметр образца.

Методом конечных элементов с применением программного комплекса ANSYS Mechanical [23, 24] проведено сравнение диаметального сжатия дискового образца с отверстием и без него. Размеры дисков полагались одинаковыми — толщина 4 мм, диаметр 7,2 мм. В образце с отверстием диаметр центрального отверстия составлял 1,1 мм. Было показано, что распределения напряжений в диске с отверстием и без отверстия аналогичны, но в первом случае имеются возмущения, внесенные концентратором напряжений в виде отверстия. На контуре отверстия наблюдается отчетливая зона концентрации напряжений, величина которых существенно превосходит среднее значение. Нормированные значения максимальных первых главных напряжений для диска с отверстием более чем в пять раз превышают таковые для диска без отверстия.

Экспериментальный анализ испытания по схеме диаметального сжатия хрупких дисков с центральным отверстием

Для испытания по схеме диаметального сжатия были выбраны хрупкие материалы — серый чугун СЧ 10 (по ГОСТ 1412) и графит АРВ-1. Механические свойства этих материалов приведены в табл. 1.

Испытания сплошных коротких цилиндров из серого чугуна. Испытывали сплошные короткие цилиндры из серого чугуна размером $D \times L$, где D — диаметр цилиндра, L — его длина. Об-

Таблица 1. Механические и физические свойства исследуемых материалов

Table 1. The mechanical and physical properties of the materials under study

Материал	σ_B^p , МПа	$\sigma_B^{сж}$, МПа	E , ГПа
Серый чугун СЧ 10	104	404	100
Графит АРВ-1	13,8	37	7 – 11

разцы нагружали на испытательной машине INSTRON в специальном приспособлении, обеспечивающем строгую параллельность плоскостей штампов. Одновременно с нагружением образцов с помощью метода цифровой корреляции изображений (ЦКИ) [25, 26] регистрировали деформацию поверхностных точек каждого образца.

В табл. 2 представлены результаты испытания пяти коротких цилиндров из чугуна размером 10×4 мм — максимальные нагрузки, соответствующие началу разрушения всех испытанных образцов, разрушающие напряжения, рассчитанные по формуле (1) и формуле

$$S_0 = \frac{P}{LD}. \quad (2)$$

Совпадение разрушающего напряжения, определенного по формуле (1), с прочностью материала при растяжении подтверждает возможность применения этой формулы для материалов типа чугуна, имеющих машинную диаграмму сжатия диска, представленную на рис. 1.

Начало роста трещины связано с максимальной нагрузкой на образец. Плавное снижение нагрузки после максимума — медленное распространение трещины, отход одной половины образца от другой. Не отмечено взрывного разрушения, характерного для хрупкого разрыва от нормальных напряжений. Обрыв диаграммы на данном уровне нагрузки связан с прекращением процесса деформирования образца. Ступенчатый излом в диаметральной плоскости диска свидетельствует о том, что разрыв образца происходит под действием касательных напряжений.

Испытания коротких цилиндров с центральным отверстием, изготовленных из серого чугуна. Цилиндры с отверстием, изготовленные из чугуна, имели следующие размеры: диаметр $D = 7,2$ мм, толщина $L = 4$ мм, диаметр центрального отверстия $d = 1,2$ мм.

Разрушение цилиндра с отверстием происходило в диаметральной плоскости по линии нагру-

Таблица 2. Значения сопротивления разрушению сплошных образцов из чугуна, определенные по формулам (1) и (2)

Номер образца	P , Н	σ_b , МПа	S_0 , МПа
1	5333	85,3	134
2	6028	96,2	151
3	6979	111	174
4	6847	109	171
5	7029	112	176
Средние значения		103	161

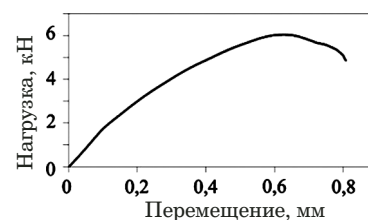


Рис. 1. Характерная машинная диаграмма сжатия диска из чугуна размером 10×4 мм

Fig. 1. Typical machine diagram for compression of a cast iron disk 10×4 mm

жения и начиналось от центрального отверстия. Характер разрушения аналогичен процессу разрушения сплошных образцов — медленное контролируемое распространение трещины.

В табл. 3 представлены результаты испытания образцов с центральным отверстием. Сопротивление материала разрушению σ_{th} и S_1 рассчитывали по формулам:

$$\sigma_{th} = \frac{2P}{\pi L(D-d)} \quad (3)$$

и

$$S_1 = \frac{P}{L(D-d)}. \quad (4)$$

Сопротивление чугунных образцов разрушению оказалось в 1,5 раза меньше истинной механической характеристики (см. табл. 1). Такой эффект снижения сопротивления материала разрушению при испытании образца связан с концентрацией напряжения у центрального отверстия.

Итак, в отличие от сплошного цилиндра разрушение цилиндра с центральным отверстием начинается от этого отверстия. Во всем остальном картина поведения цилиндров с отверстием и сплошных была схожа. Не отмечено взрывного разрушения, характерного для хрупкого разрыва от нормальных напряжений. Наблюдали медленный отход одной половины образца от другой, что обычно присуще пластическому разрушению.

Таблица 3. Значения сопротивления разрушению образцов чугуна с центральным отверстием $d = 1,2$ мм, определенные по формулам (3) и (4)

Номер образца	P , Н	σ_{th} , МПа	S_1 , МПа
1	3103	83	130
2	2555	68	107
3	3040	80	126
Средние значения		77	121

Table 3. The fracture resistance of cast iron, determined by formulas (3) and (4) for samples with a central hole ($d = 1.2$ mm)

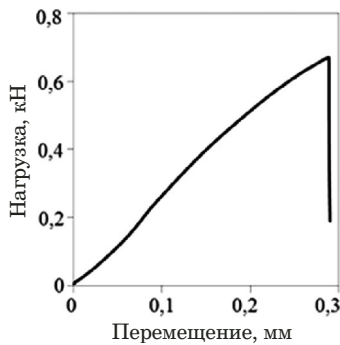


Рис. 2. Характерная машинная диаграмма сжатия графитового цилиндра размером 8 × 8 мм

Fig. 2. Typical machine diagram for compression of a graphite disk 8 × 8 mm

Диаграммы деформирования рассматриваемых образцов также не отличались.

Испытание сплошных коротких цилиндров из графита. Цилиндры из графита имели следующие типоразмеры $D \times L$: 8 × 4, 8 × 8 и 8 × 12 мм. Характерная диаграмма сжатия графитового диска 8 × 8 мм в диаметральной плоскости представлена на рис. 2.

Разрушение графитового цилиндра происходило динамически на практически линейном участке диаграммы при максимальной нагрузке с разделением образца иногда на несколько фрагментов. В образце также выявлены начальные

трещины в контактной области, которые служили источником разрушения образца.

В табл. 4 приведены значения сопротивления разрушению графитовых образцов, рассчитанные по формулам (1) и (2). Видно, что усредненное значение сопротивления графита разрушению, рассчитанное по формуле (1), возрастает примерно на 10 % с увеличением толщины образца в два раза. Причем σ_i оказалось почти в два раза ниже истинного значения (см. табл. 1), что связано с более хрупким состоянием графита по сравнению с чугуном. Об этом свидетельствует и различие диаграмм сжатия образцов из чугуна и графита.

Испытания коротких цилиндров с центральным отверстием, изготовленных из графита. Цилиндры с центральным отверстием из графита имели те же размеры, что и сплошные образцы; для всех дисков диаметр центрального отверстия — 1 мм. В табл. 5 приведены результаты их испытания.

Диаграмма сжатия образцов из графита с центральным отверстием линейна вплоть до хрупкого разрушения, как и образцов без отверстия. Образцы разрушились абсолютно хрупко в диаметральной плоскости диска. Разрушение началось от центрального отверстия. На некоторых образцах наблюдали наряду с диаметральной несколько дополнительных трещин, что характер-

Таблица 4. Значения сопротивления разрушению сплошных образцов из графита

Table 4. The fracture resistance of solid graphite samples

Номер образца	Размер образца $D \times L$, мм	P , Н	σ_t , МПа	S_0 , МПа
1	8 × 4	307	6,1	9,6
2	8 × 8	660	6,6	10,3
3	8 × 8	695	6,9	10,9
4	8 × 8	595	5,9	9,3
5	8 × 12	1100	7,4	11,5
6	8 × 12	1108	7,4	11,5

Таблица 5. Значения сопротивления разрушению графитовых дисков с центральным отверстием

Table 5. Graphite fracture resistance for disks with a central hole

Номер образца	Размер образца $D \times L$, мм	P , Н	σ_{th} , МПа	S_1 , МПа
1	8 × 4	321	7,3	11,5
2	8 × 4	283	6,5	10,2
3	8 × 4	233	5,3	8,3
4	8 × 8	479	5,5	8,6
5	8 × 8	514	5,8	9,1
6	8 × 12	611	4,7	7,4
7	8 × 12	820	6,2	9,7
8	8 × 12	710	5,4	8,5

но для хрупкого разрушения, сопровождающегося большим количеством осколков.

Усредненное сопротивление разрыву, определенное по формуле (1), для образцов с центральным отверстием оказалось в 2,7 раза меньше истинного (см. табл. 1). По сравнению с чугуном наличие центрального отверстия в графитовом образце снижает разрушающее напряжение более чем в 1,5 раза. Это можно объяснить тем, что графит является более хрупким материалом, чем чугун, и поэтому более чувствителен к концентрации напряжений. Это подтверждается и различием диаграмм деформирования образцов из чугуна и графита (см. рис. 1 и 2).

Испытания топливных таблеток диоксида урана с центральным отверстием. В качестве примера испытаны по схеме диаметрального сжатия образцы реальной конструкции в виде короткого цилиндра с центральным отверстием — топливные таблетки из диоксида урана. Диаметр центрального отверстия — 1,1 мм. Размеры образцов и результаты их испытания приведены в табл. 6.

Отметим практически линейный рост нагрузки вплоть до хрупкого разрушения образцов, аналогичный полученному при испытаниях графитовых образцов. Характер разрушения топливных таблеток аналогичен особенностям разрушения графитовых образцов — абсолютно хрупкое разрушение в диаметральной плоскости диска по линии нагружения, которое берет начало от центрального отверстия. Одновременно образовались две трещины из области максимальных касательных напряжений. Результаты эксперимента продемонстрировали возможность испытания реальной хрупкой конструкции по схеме диаметрального сжатия с косвенной оценкой сопротивления материала хрупкому разрушению. Уровень разрушающих напряжений для топливных таблеток хорошо согласуется со значениями разрушающего напряжения графитовых образцов, а расчетный уровень прочности — с истинным сопротивлением разрыву графита АРВ-1.

Таким образом, результаты испытания образцов по схеме диаметрального сжатия, имеющих линейную машинную диаграмму сжатия, аналогичную диаграмме испытания графитовых образцов, могут быть использованы для формирования расчетной формулы оценки прочности материала при растяжении. Истинное сопротивление материала разрыву должно оцениваться по формуле

$$\sigma_{\text{в}} \approx \frac{1,5P}{LD} —$$

по данным испытания сплошных образцов или

$$\sigma_{\text{в}} \approx \frac{1,5P}{L(D-d)} —$$

по данным испытания образцов с центральным отверстием.

Заключение

Приведены результаты расчетного и экспериментального анализов поведения квазипластичного (чугуна) и хрупкого (графита) материалов при диаметральной сжатии коротких цилиндрических образцов (дисков), которые свидетельствуют о существенном и различном влиянии концентрации напряжения. Наличие центрального отверстия в диске значительно снижает прочность при его диаметральной сжатии, если материал при испытании демонстрирует хрупкое разрушение (на линейном участке диаграммы деформирования), и в меньшей степени снижает ее, если материал проявляет пластические свойства. Сопротивление разрушению, определенное по формуле, рекомендованной стандартом ASTM D3967-95а, для сплошных образцов из чугуна практически не отличается, а из графита отличается в 1,5 раза от истинной прочности материалов. При испытании образцов с центральным отверстием сопротивление разрыву отличается от истинной прочности материалов соответственно в 1,5 и почти в 2,5 раза. Продемонстрирована

Таблица 6. Результаты испытания топливных таблеток

Table 6. The results of testing fuel tablets

Номер образца	Размер $D \times L$, мм	P , Н	σ_{th} , МПа	S_1 , МПа
1	6,0 × 10	406	5,17	8,12
2	6,0 × 10	531	6,75	10,6
3	7,2 × 13	796	6,31	9,90
4	7,2 × 13	1488	11,8	18,5
5	8,3 × 10	351	3,06	4,80
6	8,3 × 10	382	3,33	5,23
7	8,3 × 10	612	8,50	12,7

возможность испытания ядерного топлива (топливных таблеток) по схеме диаметального сжатия с косвенной оценкой сопротивления материала хрупкому разрушению.

Благодарность

Статья написана в рамках программы по повышению конкурентоспособности НИЯУ «МИФИ».

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Rodriguez J., Navarro C., Sanchez-Galvez V. Splitting tests: an alternative to determine the dynamic tensile strength of ceramic materials / *Journal de Physique IV Colloque*. 1994. N 04(C8). P. C8-101 – C8-106. DOI: 10.1051/jp4:1994815
- Bell F. G. Rock properties and their assessment / Selley, R. C., Ed. *Encyclopedia of Geology*. — Amsterdam: Elsevier, 2005. P. 566 – 580. DOI: 10.1016/b0-12-369396-9/00211-2
- Drouet C., Largeot C., Raimbeaux G., Estournès C., Dechambre G., Combes C., Rey C. Bioceramics: spark plasma sintering (SPS) of calcium phosphates / *Advances in Science and Technology*. 2006. Vol. 49. P. 45 – 50. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AST.49.45
- Proveti J. R. C., Michot G. The Brazilian test: a tool for measuring the toughness of a material and its brittle to ductile transition / *Int. J. Fract.* 2006. 139. P. 455 – 460. DOI: 10.1007/s10704-006-0067-6
- Akhtar F., Vasiliev P. O., Bergström L. Hierarchically Porous Ceramics from Diatomite Powders by Pulsed Current Processing / *J. Am. Ceram. Soc.* 2009. N 92(2). P. 338 – 343. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2008.02882.x
- Es-Saheb M. H., Albedah A., Benyahia F. Diametral compression test: validation using finite element analysis / *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2011. Vol. 57. P. 501 – 509. DOI: 10.1007/s00170-011-3328-0
- Bragov A. M., Konstantinov A. Y., Lamzin D. A., Lomunov A. K., Filippov A. R. Dynamic deformation and destruction of brittle structurally inhomogeneous media / *Probl. Prochn. Plast.* 2012. Issue 74. P. 59 – 67 [in Russian].
- Molotnikov V. Ya., Molotnikova A. A. Notes on the Brazilian method for studying the tensile strength of brittle materials / *Vestn. DGTU*. 2014. Vol. 14. N 4(79). P. 30 – 38 [in Russian]. DOI: 10.12737/6889
- Zaitsev D., Panfilov P. Deformation behavior of human dentin in liquid nitrogen: A diametral compression test / *Materials Science and Engineering*. 2014. Vol. 42. P. 48 – 51. DOI: 10.1016/j.msec.2014.05.011
- Patil S. G., Sajjan M. S., Patil R. The effect of temperature on compressive and tensile strengths of commonly used luting cements: an in vitro study / *J. Int. Oral Health*. 2015. Vol. 7(2). P. 13 – 19.
- Mazel V., Guerard S., Croquelois B., Kopp J.-B., Girardot J., Harona D., Busignies V., Tchoreloff P. Reevaluation of the diametral compression test for tablets using the flattened disc geometry / *International Journal of Pharmaceutics*. 2016. N 513(1 – 2). P. 669 – 677. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2016.09.088
- Rocha J. A. L., Wahrhaftig A. M. Superposition of Stress Fields in Diametrically Compressed Cylinders / *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2016. Vol. 13. P. 1954 – 1967. DOI: 10.1590/1679-782526
- Zaitsev D. V., Kochanov A. N., Toktogulov Sh. Zh., Panteleev I. A., Panfilov P. E. Influence of the scale effect and heterogeneity of displaced rocks in determining their strength properties / *Gorn. Inf.-Anal. Byull.* 2016. N 11. P. 208 – 215 [in Russian].
- Markides C. F., Kourkoulis S. K. Parametric study of the deformation of transversely isotropic discs under diametral compression / *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2017. Vol. 41. P. 396 – 411. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.41.51
- Horynová M., Casas-Luna M., Montufar E. B., Diaz-de-la-Torre S., Celko L., Klakurková L., Diéguez-Trejo G., Dvorak K., Zikmund T., Kaiser J. Fracture Mechanism of Interpenetrating Iron-Tricalcium Phosphate Composite / *Solid State Phenomena*. 2017. Vol. 258. P. 333 – 336. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.258.333
- Luginina M., Orru R., Cao G., Grossin D., Brouillet F., et al. First successful stabilization of consolidated amorphous calcium phosphate (ACP) by cold sintering: toward highlyresorbable reactive bioceramics / *Journal of materials chemistry B, Royal Society of Chemistry*. 2020. Vol. 8(4). P. 629 – 635. DOI: 10.1039/c9tb02121c
- ASTM D3967-95a. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens.
- Wang Q. Z., Jiaa X. M., Kouba S. Q., Zhang Z. X., Lindqvist P. A. / *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2004. Vol. 41. Issue 2. February. P. 245 – 253.
- Grigoriev E. G., Rosliakov A. V. Electro-discharge compaction of WC-Co and W-Ni-Fe-Co composite materials / *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. Vol. 191. N 1 – 3, P. 182 – 184. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.03.016
- Smirnov K. L., Grigoryev E. G., Nefedova E. V. SiAlON-TiN Ceramic Composites by Electric Current Assisted Sintering / *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 946. February. P. 53 – 57. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.946.53
- Klyatskina E. A., Borrell A., Grigoriev E. G., Zholnin A. G., Salvador M. D., Stolyarov V. V. Structure features and properties of graphene Al₂O₃ composite / *Journal of Ceramic Science and Technology*. 2018. Vol. 9. N 3. P. 215 – 224. DOI: 10.4416/JCST2018-00006
- Goltsev V. Y., Osintsev A. V., Plotnikov A. S. / *Letters of Materials*. 2017. Vol. 7(1). P. 21 – 25 [in Russian]. DOI: 10.22226/2410-3535-2017-1-21-25
- Release 16. 2 Documentation for ANSYS [electronic document] / ANSYS Inc. Electronic data and software.
- NAFEMS search engineering analysis and simulation — FEA, Finite Element Analysis, CFD, Computational Fluid Dynamics, and Simulation. — NAFEMS Ltd., Hamilton, United Kingdom.
- Sutton M. A., Orteu J. J., Schreier H. W. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: basic concepts, theory and applications. — Springer, 2009. P. 321.
- Chu T. C., Ranson W. F., Sutton M. A., Peters W. H. / *Experimental mechanics*. 1985. Vol. 25(3). P. 232 – 245.