

Научная статья

Original article

УДК 628.168.3

DOI 10.24412/2658-3569-2021-10071



**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДЫ  
ИСПЫТАНИЙ НА СТАТИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ НЕСУЩИХ КОЛЕЦ ИЗ  
КЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**  
EXPERIMENTAL STUDIES AND TEST METHODS FOR STATIC STRENGTH OF  
CARRYING RINGS FROM CERAMIC COMPOSITE MATERIAL

**Тельман Джамалдинович Каримбаев**, проф., д.т.н., нач. отдела ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва, 111116, ул. Авиамоторная д.2, Россия, [karimbayev@ciam.ru](mailto:karimbayev@ciam.ru), тел +7 (495) 362 49 72, конструкционная прочность керамических и композиционных материалов.

**Бахытжан Мыктыбеков**, к.т.н., начальник сектора. ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва, Россия, [bahit@ciam.ru](mailto:bahit@ciam.ru), тел +7 (495) 362 49 72, конструкционная прочность керамических и композиционных материалов.

**Михаил Александрович Мезенцев**, начальник сектора. ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва, Россия, [mma@ciam.ru](mailto:mma@ciam.ru), тел +7 (495) 362 49 72, конструкционная прочность керамических и композиционных материалов.

**Пальчиков Денис Сергеевич**, начальник сектора. ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва, Россия, [dspalchikov@ciam.ru](mailto:dspalchikov@ciam.ru), тел +7 (495) 362 49 72, конструкционная прочность керамических и композиционных материалов.

**Telman Karymbayev**, professor, Dr. Sci. Tech., head of department of «Central Institute of Aviation Motors after Baranov P.», Moscow, Russia, Aviation Motor Str, 2,

## Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral"

e-mail: [bahit@ciam.ru](mailto:bahit@ciam.ru), phone: +7 (495) 362 49 72, structural strength of ceramic and composite materials.

**Bahit Myktybekov**, head of sector of «Central Institute of Aviation Motors after Baranov P.», Moscow, Russia, Aviation Motor Str, 2, e-mail: [bahit@ciam.ru](mailto:bahit@ciam.ru), phone: +7 (495) 362 49 72, structural strength of ceramic and composite materials.

**Mikhail Mezentsev**, head of sector of «Central Institute of Aviation Motors after Baranov P.», Moscow, Russia, Aviation Motor Str, 2, e-mail: [mma@ciam.ru](mailto:mma@ciam.ru), phone: +7 (495) 362 49 72, structural strength of ceramic and composite materials.

**Palchikov Denis**, head of sector of «Central Institute of Aviation Motors after Baranov P.», Moscow, Russia, Aviation Motor Str, 2, e-mail: [mma@ciam.ru](mailto:mma@ciam.ru), phone: +7 (495) 362 49 72, structural strength of ceramic and composite materials.

### Аннотация

Усиление металлических корпусов, дисков и валов авиационного назначения силовыми кольцами из композиционных материалов позволяет не только уменьшить их вес, но и значительно повышает их статическую и динамическую прочность. На данный момент существует множество методов по испытаниям колец, которые имеют свои достоинства и недостатки. На характеристики кольца сильно влияют технологические методы его изготовления. В работе описаны известные и разработанные методы механических испытаний силовых колец. Проведены экспериментальные исследования и получены свойства экспериментальных колец из высокотемпературных керамических композиционных материалов  $C_f/SiC_m$  и  $SiC_f/SiC_m$ .

### Annotation

Reinforcement of metal housings, disks and shafts for aviation use with power rings made of composite materials allows not only to reduce their weight, but also significantly increases their static and dynamic strength. At the moment, there are many methods for testing rings, which have their own advantages and disadvantages. The characteristics of the ring are strongly influenced by the technological methods of its manufacture. The paper describes well-known and developed methods of mechanical

testing of power rings. Experimental studies have been carried out and the properties of experimental rings made of high-temperature ceramic composite materials  $C_f/SiC_m$  and  $SiC_f/SiC_m$  have been obtained.

**Ключевые слова:** керамический композиционный материал, волокна карбида кремния, испытания, силовые кольца, метод испытаний.

**Key words:** ceramic matrix composite, silicon carbide fibers, testing, force rings, test method.

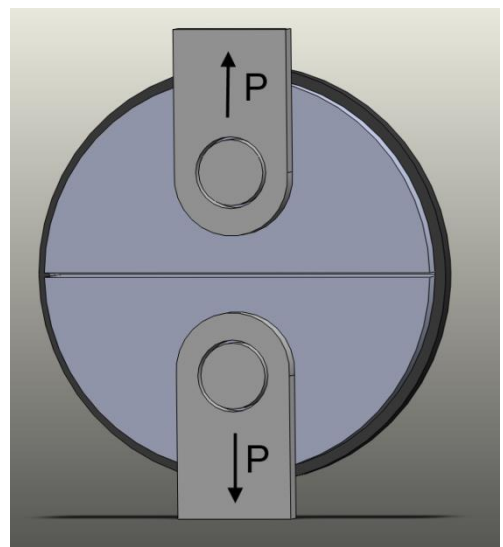
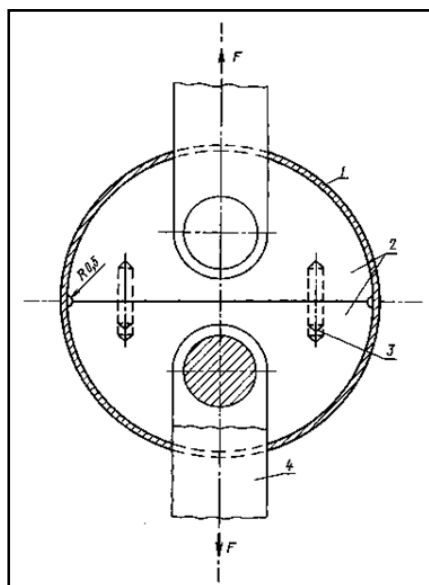
Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-29-18071\20.

**Acknowledgments:** The reported study was funded by RFBR, project number 18-29-18071\20.

## 1 Методы испытаний колец из композиционных материалов

### 1.1 Испытания колец полу-дисками

Одним из наиболее простейших способов экспериментальных исследований прочности и жесткости колец являются испытания полу-дисками. Данный метод имеет межгосударственный стандарт в России [1] и США [2], где широко используется в практике экспресс методов анализа прочности и жесткости колец. На рисунке 1 представлена принципиальная схема испытаний колец на полу-дисках.





Механический распор подвижных секторов обеспечивается перемещением под действием нагрузки  $P$  нагружающего устройства в осевом направлении (см. рисунок 2). Величины радиальной нагрузки  $P_r$  и давления  $p$  на кольцо секторами могут быть вычислены в этом случае из соотношений:

$$p = P_r / n \cdot \pi \cdot D \cdot b \quad (1)$$

$$P_r = (1-f) P \cdot \sin 2\gamma \quad (2)$$

где  $f$  – коэффициент трения между нагружающим устройством и поверхностями секторов,  $\gamma$  – угол скоса нагружающего устройства,  $D$  и  $b$  – диаметр внутренней поверхности кольца и его ширина.

Основные проблемы, связанные с использованием настоящей методики, заключается в обеспечении низких уровней трения между трущимися поверхностями. Рекомендуется использовать графитовые замасливатели для снижения влияния трения на результаты нагружения. Особое внимание следует уделить проблеме тарировки нагружающего устройства и обеспечения равномерного распределения давления  $p$  на кольцо отдельными секторами.

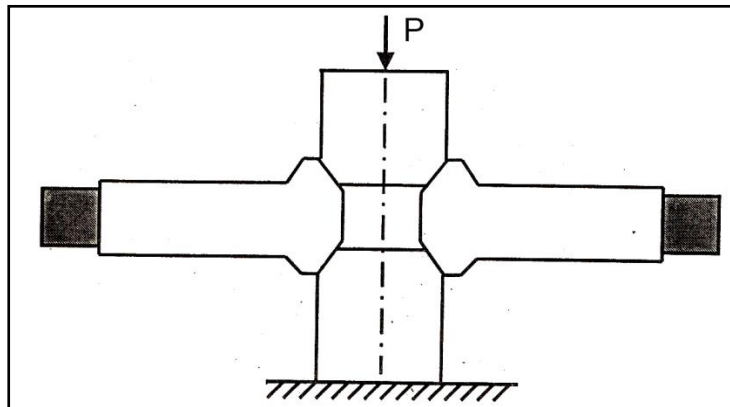


Рисунок 2 - Схема испытаний за счет механического распора

### Испытания колец в поле центробежных сил

Радиальные смещения подвижных секторов могут быть обеспечены за счет центробежных нагрузок при вращении кольца вместе с центрирующим и направляющим устройством (см. рисунок 3). В этом случае давление  $p$  на кольцо определяется из равенства:

$$p = \rho \cdot V_{\text{СЕК}} \cdot R_{\text{ЦТ}} \cdot (\pi \cdot N / 30)^2 / \pi \cdot D \cdot b \quad (5)$$

$$R_{\text{ЦТ}} = D \cdot (1 + D_{\text{ВН.У}}) / 4 \quad (6)$$

$$V_{\text{СЕК}} = (\pi \cdot D^2 / 4 \cdot n) \cdot [(1 - (D_{\text{ВН.У}} / D)^2)] \cdot h_{\text{У}} - 4 \cdot (D_{\text{Н.Ж}} - D_{\text{ВН.У}}) \cdot h_{\text{Ж}} \cdot b_{\text{Ж}} / \pi \cdot D \quad (7)$$

где  $\rho$ ,  $V_{\text{СЕК}}$  - плотность материала подвижного сектора и его объем,  $n$  - число оборотов,  $R_{\text{ЦТ}}$  - радиус центра тяжести сектора,  $N$  - число оборотов,  $D$  и  $b$  - внутренний радиус кольца и его ширина. Кроме того, принято, что  $D_{\text{Н.Ж}}$  - наружный диаметр направляющего желоба с высотой  $h_{\text{Ж}}$  и шириной  $b_{\text{Ж}}$ ,  $D_{\text{ВН.У}}$  - внутренний диаметр нагружающего устройства с толщиной  $h_{\text{У}}$ .

Прочность кольца определяется из равенства:

$$\sigma_{\text{ф}} = \rho \cdot D / 2h \quad (8)$$

Преимуществом метода является то, что испытания максимально приближены к условиям эксплуатации силовых колец работающих в поле центробежных сил. При испытаниях обеспечивается достаточно высокая равномерность нагружения и более равномерное поле напряжений, как по толщине кольца, так и по его протяженности в окружном направлении. Описанный метод разработан в ЦИАМ [3]. К недостаткам метода можно отнести необходимость использования разгонных стенов с бронеканерой и сложность изготовления приспособления.

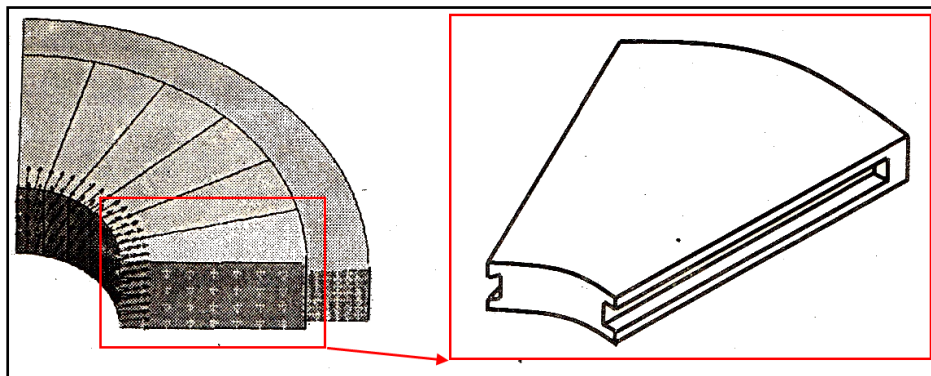


Рисунок 3 - Схема испытаний кольца в поле центробежных сил

**Перемещения подвижных секторов за счет температурного расширения специального диска**

Одним из оригинальных методов нагружения колец является нагружение за счет температурного расширения специального диска или толстого кольца. На рисунке 4 представлено схематическое изображение одного из возможных вариантов конструкции такой установки.

Радиальное перемещение  $u_T$  свободного диска диаметром  $D_D$  при равномерном его нагреве до температуры  $T$  может быть выражено:

$$u_T = \alpha_D \cdot T \cdot D_D / 2 \quad (8)$$

где  $\alpha_D$  – коэффициент линейного расширения материала диска.

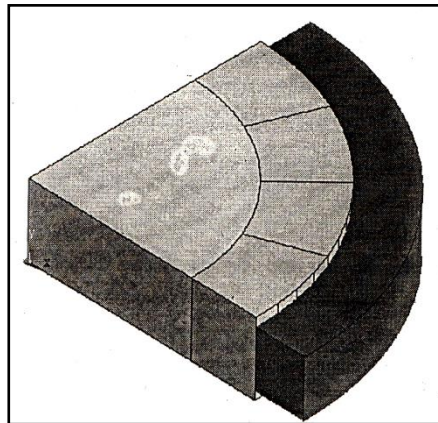


Рисунок 4 - Схема нагружения силового кольца за счет температурного расширения специального диска

### 1.3 Испытания колец внутренним давлением

Одним из способов испытания колец является испытание их внутренним гидростатическим давлением. Методически этот тип испытаний является наиболее простым. Кроме того, благодаря равномерности приложенной нагрузки в этом случае результаты испытаний наиболее точные. Вместе с тем, для исследования колец из КМ метод испытаний гидростатическим давлением используется крайне редко. Дело в том, что кольца из композиционных материалов отличаются повышенной прочностью. В связи с этим разрушения имеют место при достаточно больших значениях давлений. В этом случае из-за различных утечек, сопровождающих процесс испытаний, техническая реализация эксперимента становится затруднительной, а сама система становится объектом высокого давления.

### 1.4 Испытания «бразильского» кольца

Техническое осуществление испытаний на растяжение многих типов композиционных материалов с хрупкой матрицей и, особенно керамических материалов бывает затруднительным. Одним из методов определения прочности на растяжение таких материалов является испытание диска или толстых колец на сжатие по схеме, представленной на рисунке 5.

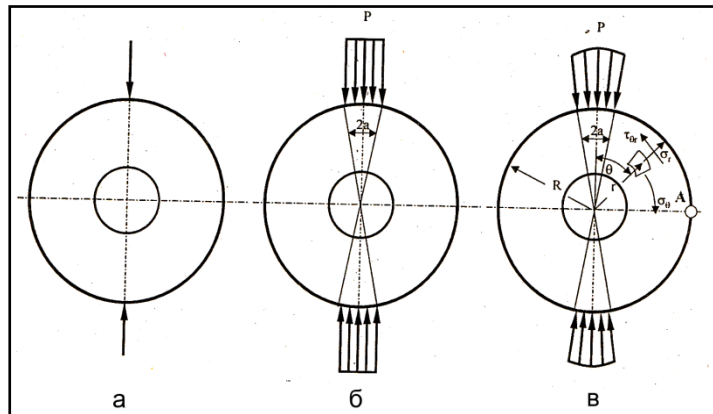


Рисунок 5 - Схема испытаний «бразильского» кольца

Радиальные  $\sigma_r$  и кольцевые  $\sigma_\phi$  напряжения на конце максимального диаметра (точка А на рисунке 5 ( $\phi = \pi/2$ )) вычисляются из равенств:

$$\sigma_r = - (2p/\pi) \cdot \left\{ \alpha - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot [1 - (1-n^{-1})] \cdot \sin 2n\alpha \right\} \quad (9)$$

$$\sigma_\phi = - (2p/\pi) \cdot \left\{ \alpha - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot [1 + (1-n^{-1})] \cdot \sin 2n\alpha \right\} \quad (10)$$

Окружные деформации  $\varepsilon_\phi$  могут быть замерены с помощью тензорезисторов, установленных в районе максимальных напряжений (точка А, рисунок 5). Кроме того, датчиками перемещения можно замерить радиальное расширение диска, кольца и оценить окружные деформации с помощью соотношения:

$$\varepsilon_\phi = u / R \quad (11)$$

Методика испытаний по схеме «бразильского» кольца успешно используется для экспресс анализа прочности. Главное преимущество заключается в простоте технической реализации.



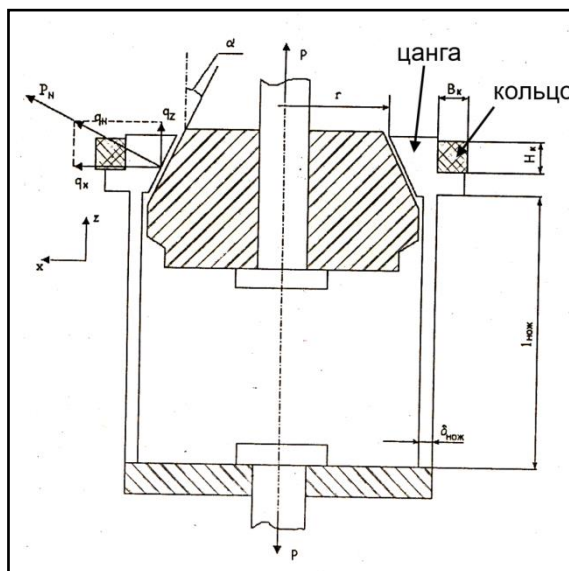
### 1.5 Испытания колец при помощи цангового приспособления

На основе проведенных исследований в ЦИАМ разработана уникальная оснастка для оценки механических характеристик кольцевых образцов. Принципиальная схема приспособления представлена на рисунке 6. Нагружение кольца осуществляется за счет механического распора секторов приспособления. За счет большого количества цанговых секторов при данном способе нагружения кольца практически удается добиться равномерного распределения деформации по окружности образца и приблизить испытания к условиям реальной эксплуатации изделий в поле центробежных сил. При данном способе нагружения прочность кольцевых образцов может быть оценена следующим образом:

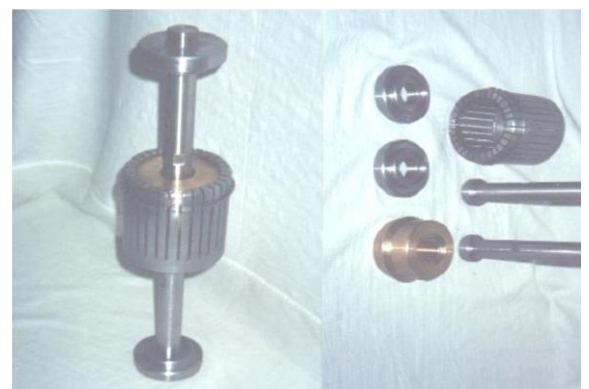
$$\sigma_{\varphi} = N_{\tau} / H_k \cdot B_k \quad (12)$$

где  $N_{\tau}$  – фактическое тангенциальное усилие на кольцевом образце, определенное с учетом сил трения на поверхности кольцо-цанга,  $H_k$  – высота кольца,  $B_k$  – толщина кольца.

Очевидно, что при данной схеме реализация испытаний при повышенных температурах не представляет большой сложности.



а - Расчетная схема



б - цанговое приспособление

Рисунок 6 – Цанговое приспособление для определения разрушающих тангенсальных напряжений в кольцевом образце

## 2 Экспериментальные исследования

### 2.1 Испытания колец из ККМ $C_f/SiC_m$

Изготовлены опытные образцы колец из керамического композиционного материала (ККМ) на основе карбид кремниевой матрицы с использованием углеродных волокон в качестве упрочняющего элемента ( $C_f/SiC_m$ ). В качестве углеродных волокон использовались жгуты с количеством филаментов 3К фирмы Aksaca A-38. Технология получения матрицы осуществлялась с помощью технологии PIP (многократная пропитка керамообразующим полимером и пиролиз). Кольца изготовлены со следующими размерами: внутренний диаметр  $\varnothing 40$  мм, ширина 5 мм, высота 5 мм (см. рисунок 7). Угол укладки  $90^\circ$ , относительно оси вращения кольца.



Рисунок 7 – Образцы колец для испытаний из ККМ  $C/SiC$

Проведены испытания образцов колец, изготовленных из материалов  $C_f/SiC_m$  на разрыв для определения предельных характеристик конструктивно-подобного элемента при температуре  $20\pm 5^\circ C$  по ГОСТ 25.603-82 на экспериментальной оснастке с полу-дисками (рисунок 8).

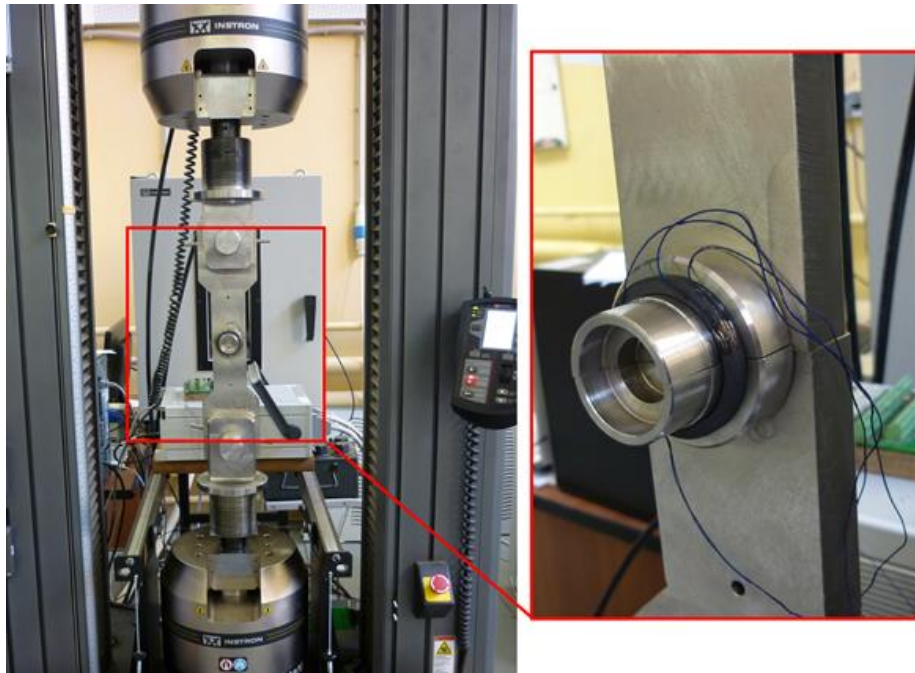


Рисунок 8 – Экспериментальная оснастка для испытаний колец на разрыв

Для определения предельных деформаций и модуля упругости на кольца наклеивались тензорезисторы. Результаты испытаний приведены в таблице 1. Средние окружные напряжения при разрушении составляют 88,84 МПа, модуль упругости 101,25 ГПа.

Таблица 1 – Результаты испытаний колец на разрыв

Ме тка образца	Ш ирин а [ mm]	То лщина [m m]	Макси мум нагрузка [kN]	Напряжени е при растяжении [MPa]	Модул ь упругости [GPa]
№2	4, 95	4,8 2	3,64	76,28	85
№5	4, 92	5,0 2	5,01	101,4	120
Среднее				88,84	101,25

## 2.2 Испытания колец из ККМ SiC<sub>f</sub>/SiC<sub>m</sub>

Аналогичным методом испытаний проведены испытания образцов колец, изготовленных из материалов SiC<sub>f</sub>/SiC<sub>m</sub> на разрыв для определения предельных характеристик конструктивно-подобного элемента при температуре 20±5°C.

В данном случае были изготовлены кольцевые образцы со следующей укладкой (+45;-45;0;+45;-45;0;+45;-45) относительно оси вращения. Кольцевые образцы представлены на рисунке 9. Результаты испытаний кольцевых образцов из ККМ SiC/SiC приведены в таблице 2. График деформаций кольцевых образцов приведен на рисунке 10.



Рисунок 9 – Кольцевые образцы с укладкой (+45;-45;0;+45;-45;0;+45;-45) из ККМ SiC/SiC

Таблица 2 – Результаты испытаний кольцевых образцов из ККМ SiC/SiC

Метка образца	Ширина [mm]	Толщин а [mm]	Максимум нагрузка [kN]	Напряжени е [MPa]	Деформация (Strain Gauge Adapter) [mm/mm]
№1	9,30	1,20	0,56	25,09	0,00021
№2	9,40	1,30	0,66	27,00	0,00131
№3	9,50	1,30	0,72	29,15	---

Метка образца	Ширина [mm]	Толщина а [mm]	Максимум нагрузка [kN]	Напряжения е [MPa]	Деформация (Strain Gauge Adapter) [mm/mm]
№4	9,50	1,30	0,44	17,81	-0,00023
№5	8,80	1,10	0,22	11,36	0,00016
№6	9,00	1,40	0,52	20,63	0,00040

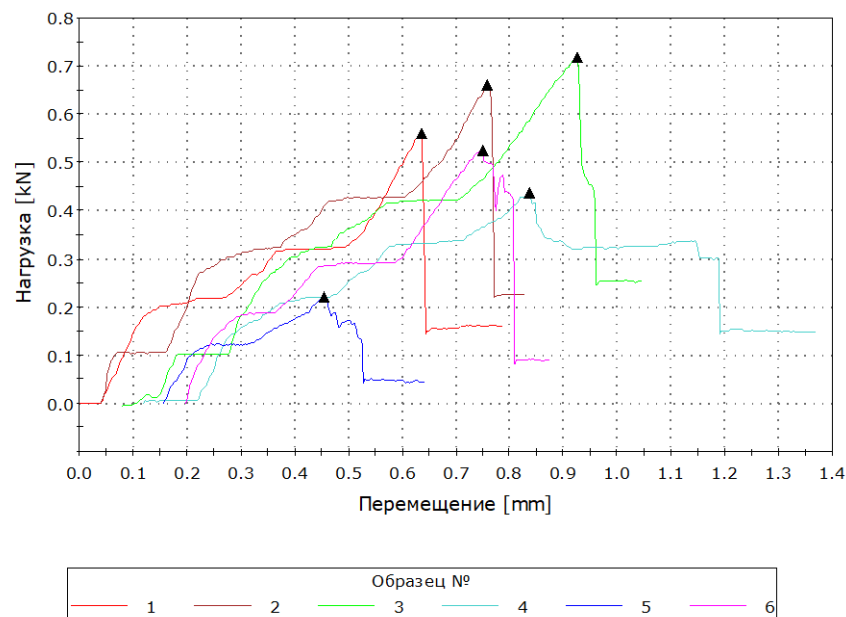


Рисунок 10 - График деформаций кольцевых образцов из ККМ SiC/SiC

Анализ разрушенных образцов силовых колец (рисунок 11) из ККМ  $\text{SiC}_f/\text{SiC}_m$  показывает, что разрушение в основном происходит за счет расслоения слоев и жгутов. Полученная предельная прочность соответствует прочности матрицы. В связи с тем что, при данных испытаниях слои  $0^\circ$ , соответствующие оси вращения колец, не несут никакой силовой нагрузки. Ширина колец составляет 9 мм, в таком случае армирование  $\pm 45^\circ$  не позволяет на данной ширине использовать их в полной мере. В связи с этим необходимо доработать образцы для испытаний с данной укладкой. И выполнить испытаний колец с армированием  $90^\circ$ , относительно оси вращения кольца.





Рисунок 11 – Разрушенные фрагменты кольцевых образцов

### **Заключение**

В результате работы отработан метод испытаний с помощью полу-дисков. Проведены испытания колец на разрыв из ККМ  $C_f/SiC_m$  с кольцевой укладкой, напряжения при разрыве оставляют  $\sim 88,9$  МПа. Испытание колец из ККМ  $SiC_f/SiC_m$  на разрыв с укладкой (+45;-45;0;+45;-45;0;+45;-45 ) необходимо проводить при большей ширине и толщине образца, т.к. результаты испытаний показывают в данном случае прочность матрицы/

### **Список использованных источников**

1. ГОСТ 25.603-82. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на растяжение кольцевых образцов при нормальной, повышенной и пониженной температурах.
2. ASTM D 2290-04. Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe by Split Disk Method.
3. Каримбаев Т.Д., Жумабаев М.Ж., Афанасьев Д.В, Петров Ю.А.. Половин М.М. – «Многослойные цилиндры и диски». Изд. ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва, 154 стр., 2001 г.

### **List of sources used**

1. GOST 25.603-82. Mechanical testing methods for composite materials with a polymer matrix (composites). Tensile test method for ring specimens at normal,

elevated and low temperatures.

2. ASTM D 2290-04. Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe by Split Disk Method.
3. Karimbaev T.D., Zhumabaev M.Zh., Afanasyev D.V., Petrov Yu.A. .. Halfin M.M. - "Multilayer cylinders and discs". Ed. FSUE "TsIAM im. P.I. Baranova ", Moscow, 154 pages, 2001

© Т.Д. Каримбаев, Б. Мыктыбеков, М.А. Мезенцев, Д.С. Пальчиков, 2021  
*Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral" №4/2021.*

**Для цитирования:** Т.Д. Каримбаев, Б. Мыктыбеков, М.А. Мезенцев, Д.С. Пальчиков  
Экспериментальные исследования и методы испытаний на статическую прочность несущих колец из керамического композиционного материала// Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral" №4/2021