

УДК 678.01

DOI 10.33113/mkmk.ras.2020.26.04.477_489.03

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В АВИАЦИОННЫХ ТОРМОЗНЫХ ДИСКАХ

Кулаков В.В., Панков М.И., Сивурова В.А., Блохин В.В.,
Лисин А.Н., Мозалев В.В.

ПАО Авиацiонная корпорация «Рубин», г. Балашиха, Россия

АННОТАЦИЯ

Проведен анализ эффективности применения ряда углерод-углеродных композиционных материалов для изготовления авиационных тормозных дисков. Рассматривались материалы, изготовленные по принципиально разным технологиям: материалы с пековой матрицей, сформированной жидкофазным методом, с графитированными, карбонизованными и с различным соотношением карбонизованных и графитированных волокон, а также материалы, изготовленные иглопрошивным методом, с пироуглеродной матрицей, армированной лентами и войлоком. Работоспособность тормозных дисков оценивалась путем испытания на установке, позволяющей определить прочность наиболее уязвимой зоны диска – шипа. Схема нагружения диска приближена к реальным условиям, т.е. обеспечено зацепление паза силовым пальцем, который выполняет роль направляющей барабана, сила нагрузки направлена в окружном направлении. В процессе испытаний производится непрерывный контроль текущих параметров нагружения вплоть до разрушения. Кроме того, проведены испытания образцов материалов на предел прочности при межслойном сдвиге и изгибе. Образцы для испытаний на прочность при изгибе вырезались из диска по радиусу с приложением силы в окружном направлении. Определена закономерность изменения прочности при межслойном сдвиге, изгибе образцов, вырезанных из диска, а также шипов диска от кажущейся плотности применяемого материала. Выяснилось, что прочность материалов при межслойном сдвиге, практически, не зависит от кажущейся плотности материала, в то время как прочность при изгибе и прочность силовых элементов конструкции диска коррелирует с плотностью материала. Установлен тип материала наиболее предпочтительный для повышения работоспособности тормозных дисков.

Ключевые слова: углерод-углеродные композиционные материалы; матрица; армирование; межслойный сдвиг; прочность; тормозные диски

EVALUATION OF CAPACITY FOR WORK OF CARBON/CARBON COMPOSITE MATERIALS FOR AIRCRAFT BRAKE DISKS

Kulakov V.V., Pankov M.I., Sivurova V.A., Blohin V.V., Lisin A.N., Mozalev V.V.

PJSC Aircraft Corporation "Rubin", Balashikha, Russia

ABSTRACT

An analysis of the effectiveness of using carbon-carbon composite materials for the manufacture of aircraft brake discs is carried out. Materials made using fundamentally different technologies were considered: materials with a pitch matrix formed by the liquid-phase method, with graphitized, carbonized and with a different ratio of carbonized and graphitized fibers,

as well as materials made by the needle-stitching method, with a pyrocarbon matrix reinforced with tapes and felt. The performance of the brake discs was evaluated by testing the disc on a device that allows you to determine the strength of the most vulnerable zone of the disc – the spike. The disk loading scheme is close to real conditions, i.e. the groove is engaged with a power finger, which acts as a guide for the drum, and the load force is directed in the circumferential direction. During the testing process, the current loading parameters are continuously monitored up to failure. In addition, tests of samples of materials for tensile strength when the interlaminar shear and bending. Samples for testing the bending strength were cut from the disk along the radius with the application of force in the circumferential direction. The regularity of changes in strength during interlayer shear, bending, and spiking of the disk from the apparent density of the material used is determined. It was found that the strength of materials during interlayer shear is practically independent of the apparent density of the material, while the Flexural type of material is most preferable for improving the performance of the brake discs. strength and strength of the force elements of the disk structure correlates with the density of the material. Set the type of material is most preferable for improving the performance of the brake discs.

Keywords: carbon/carbon composite materials; matrix; reinforce; interlaminar shear; strength; brake disks

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в конструкциях авиационных колес для изготовления тормозных дисков применяют углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ), которые благодаря сочетанию высоких прочностных характеристик, термостойкости и термостойкости, высокого и стабильного коэффициента трения и малого удельного веса, приводят к существенному снижению массы конструкции и в тоже время обеспечивают необходимую прочность в условиях возрастающих нагрузок на посадочные системы и, в первую очередь, на тормоза.

Углерод-углеродные материалы представляют собой армированные композиты, содержащие углеродные волокна и углеродную матрицу. Материалы армируют, как дискретными, так и непрерывными волокнами; для этих целей используют рубленые волокна и войлоки из них, а также ткани с различной текстильной структурой [1].

Распространены два основных способа получения заготовок: сшивание углеродными нитями вырезанных в соответствии с размерами диска слоев углеродного войлока или прессование смеси волокон с органическим связующим (смолой или пеком) и последующей термообработкой (карбонизацией) с целью преобразования последней в углеродную матрицу волокнистого композита.

Уплотнение пористых заготовок осуществляют двумя способами – пропиткой газообразными или жидкими органическими реагентами.

В данной работе оценивалась работоспособность авиационных тормозных дисков путем сравнения прочностных свойств материалов дисков. Материалы изготовлены по принципиально различным технологиям: материал, армированный углеродными лентами и войлоком с пироуглеродной матрицей, полученной газозафазным методом и материал дискретно армированный карбонизованными и графитированными волокнами с пековой матрицей, сформированной жидкофазным методом.

1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В ЗОНЕ ШИПА ТОРМОЗНОГО ДИСКА

Для оценки работоспособности диска необходимо установить основные характеристики, определяющие условия работы материала. На рис.1 схематично представлена сборка углеродных дисков в тормозном колесе самолета. Имевшие место случаи выхода из строя дисков показали, что разрушение происходило в зоне шипа под воздействием окружных усилий P_{θ} , действовавших вдоль плоскости диска θ_r (плоскости укладки волокон). Вследствие конструктивных особенностей шипов воздействие P_{θ} на последние обусловило возникновение сложнапряженного состояния материала в зоне, прилегающей к шипам.

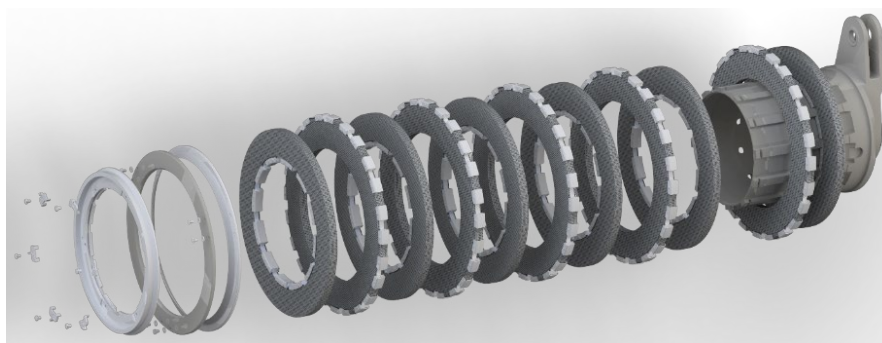


Рис.1. Схема сборки дисков.

Внешняя нагрузка передаётся на шип через металлическую скобу с четырьмя проушинами, с помощью которых крепится к диску двумя штифтами – заклёпками. Под воздействием усилия P_{θ} на боковую сторону шипа материал диска начинает деформироваться, испытывая сложнапряжённое состояние.

Прямоугольная форма шипов способствует возникновению в прилегающих к ним зонах не только нормальных сжимающих усилий P_c , но и сдвиговых усилий $P_{сд}$, направленных под углом к боковой поверхности. Поэтому помимо нормальной составляющей P_n , вызывающей деформации сжатия (смятия), в контактной зоне возникает также сдвиговая составляющая P_{τ} , направленная от центра диска к торцу большого диаметра (рис.2).

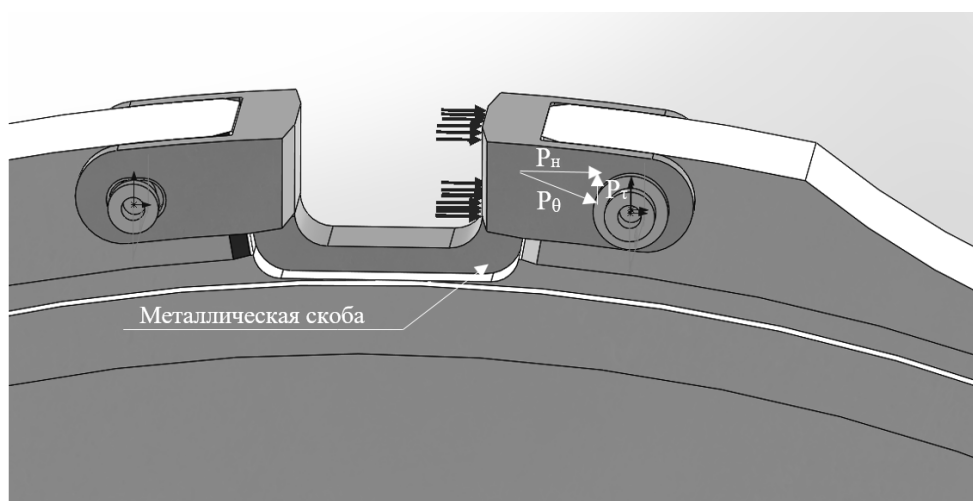


Рис.2. Воздействие окружного усилия P_{θ} на шип тормозного диска.

В результате многократного силового воздействия штифт-заклёпка начинает давить на поверхность крепёжного отверстия, в результате возникают сжимающие и сдвиговые напряжения, характеризующие состояние смятия материала под штифтом. При критических нагрузках штифт может прогнуться, приводя к разрушению материала у кромок отверстия. Под действием разрушающих нагрузок происходит расслоение материала, что вызвано воздействием межслоевого сдвига материала [2].

Таким образом, при нагружении диска окружными усилиями возможно его разрушение в зоне шипов путём сдвига под некоторым углом по отношению к боковой поверхности шипа в сторону внешнего торца паза диска, как следствие прямоугольной формы шипа и сложноподвижного состояния.

Расчетное распределение напряжений в основании паза вращающегося диска от взаимодействия паза с направляющей барабана колеса, полученное с использованием МКЭ, показано на рисунке 3 [3-5].

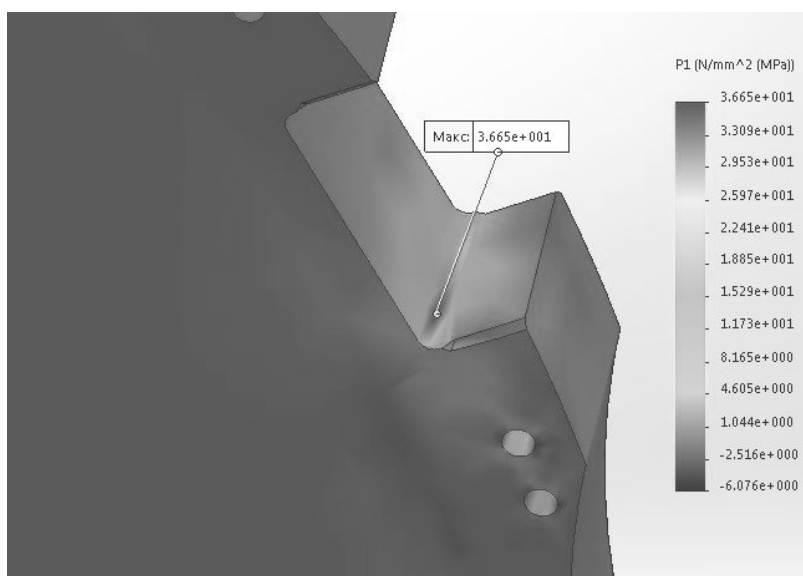


Рис.3. Распределения полей напряжений в пазах от нагрузки.

Однако, лабораторные методы определения свойств материалов дают предварительную оценку их пригодности к использованию в изделиях. Более достоверную оценку работоспособности материала в конструкции изделия можно получить при испытании тормозного диска на установке, имитирующей зацепление паза диска направляющей барабана колеса с приложением нагрузки в окружном направлении [6].

Таким образом, с точки зрения условий работы шипа диска, были выбраны такие наиболее важные прочностные характеристики, как предел прочности при межслоевом сдвиге на образцах, вырезанных в плоскости укладки волокон, предел прочности при изгибе, на образцах, вырезанных в радиальном направлении с приложением нагрузки в окружном направлении, и прочность шипов диска в окружном направлении.

2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Для исследований были использованы диски, изготовленные из ряда материалов: дискретно-армированные материалы исследованы на базе графитированных (АДФ-ОС в дальнейшем вариант1), карбонизованных и графитированных волокон (КВ-7 в дальнейшем вариант 2), карбонизованных (КВ-15 – вариант3), материал с пироуглеродной матрицей, армированной лентами и войлоком (ВУ- 205 – вариант 4), изготовленный иглопрошивным методом. Материал АДФ-ОС является базовым материалом для изготовления дисков тормозных колес. В таблице 1 представлены используемые материалы, вид наполнителя и их кажущаяся плотность, как один из важнейших показателей, который характеризует качество материала - это плотность материала с учетом открытой и закрытой пористости. Чем выше кажущаяся плотность, тем лучше сопротивление материала «усталости» под нагрузкой.

Таблица 1.

Материалы дисков, использованные в работе.

№ варианта	Марка материала	Вид наполнителя	Кажущаяся плотность, г/см ³
1	АДФ-ОС	Дискретное филаментарное волокно длиной 20-50 мм (дробление в воздухе)	1,83
2	КВ-7	Смесь карбонизованных и графитированных волокон	1,91
3	КВ-15	Карбонизованное волокно длиной 15 мм с добавкой дробленного волокна	1,89
4	ВУ-205	Углеродные ленты и войлок	1,83

Следует отметить общий признак в структуре приведенных материалов, используемых для изготовления дисков – это ярко выраженная слоистость в плоскости, перпендикулярной оси прессования материала. В материалах, дискретно армированных углеродными волокнами, слоистость обусловлена технологическим процессом – смешением углеродных волокон с порошком связующего аэродинамическим методом [7] с последующим прессованием заготовок. В результате структура имеет как хаотичное расположение волокон, так и разориентированное в плоскости прессования расположение жгутов, связанных матрицей. В материале (вариант 4), армированном углеродными лентами и войлоком с пироуглеродной матрицей, слоистость обусловлена иглопрошивным методом [8] крепления слоев углеродного войлока.

Оценка величины межслоевого сдвига была проведена с использованием приспособления, схема которого представлена на рис.4 по методике механических испытаний МИ00200851-356-2013.

Образцы на сдвиг размером 20x20x9,8 мм, вырезались в плоскости рабочей поверхности (параллельной плоскости укладки волокон) из дисков, прошедших испытания на прочностной установке. В данном приспособлении образец (3) устанавливается на неподвижный нижний пуансон (4) так, чтобы слои укладки волокон были параллельны направлению нагрузки, затем образец прижимается подвижным верхним пуансоном (2) и в таком положении удерживается фиксатором (5). Предполагаемая поверхность разрушения задается ступенчатой формой пуансонов. Расстояние между вертикальными стенками верхнего

и нижнего пуансонами практически равно толщине образца (больше на 0,2 мм) с тем, чтобы во время испытания не допустить изгиба образца, но при этом избежать влияния трения между пуансоном и стенкой корпуса на результаты испытаний. Таким образом, верхний пуансон, двигаясь под определенной нагрузкой (со скоростью 5 мм/мин) производит разрушение образца в направлении плоскостей укладки волокон.

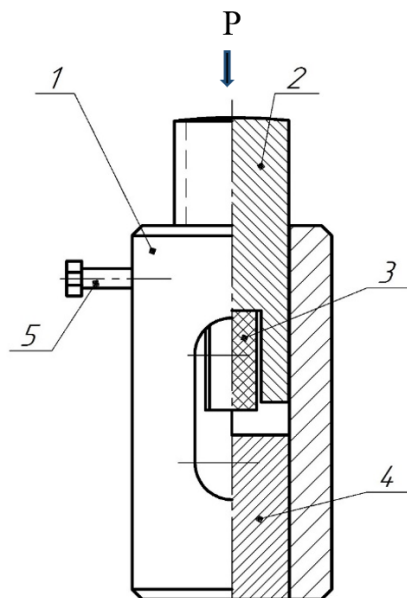
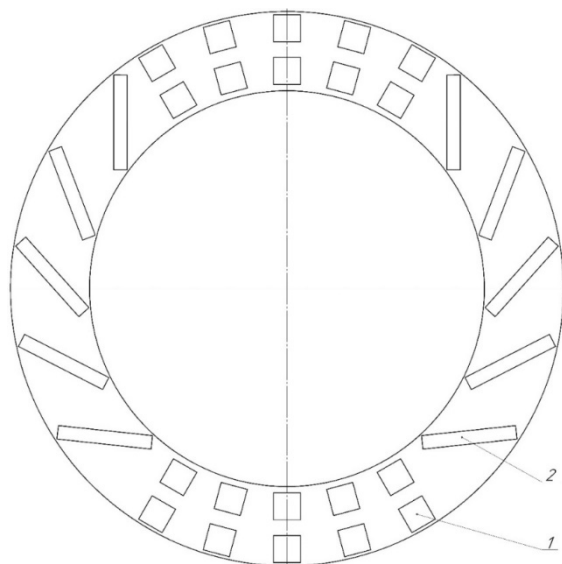


Рис.4. Схема приспособления для испытаний образцов на сдвиг. 1 – корпус; 2 – верхний пуансон; 3 – образец; 4 – нижний пуансон; 5 – фиксатор.



1. Образец на изгиб, размером 10х10х70 мм
2. Образец на сдвиг, размером 20х20х9,8 мм

Рис.5. Схема вырезки образцов для механических испытаний.

Испытания на предел прочности при изгибе проводили по ГОСТ Р 57749. Скоростной режим испытаний машины УТС 110М-50 – 8 мм/мин. Схема нагружения – трехточечная. Образцы размером 10х10х70 мм вырезались в радиальном направлении из диска в плоскости прессования, направление

нагрузки – окружное, т.е. нагрузка приходилась на слои материала. В связи с тем, что размеры образцов не позволяют разместить их на диске в строго радиальном направлении, то они были расположены в произвольном порядке, как представлено на схеме вырезки образцов из диска на рис.5.

Статическая прочность шипов определялась на установке, имитирующей условия нагружения шипов вращающихся дисков направляющими барабана колеса, схема, которой представлена на рис.6 [9].

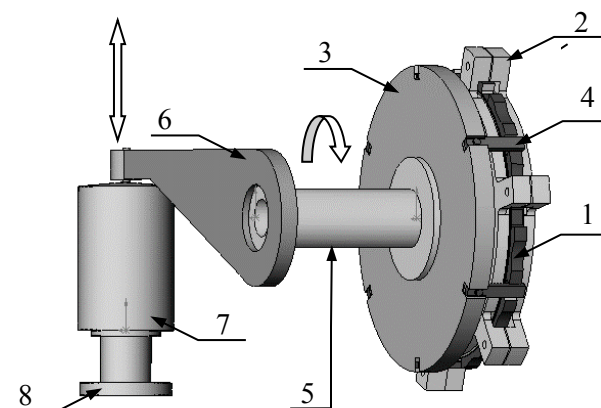


Рис.6. Схема установки для прочностных испытаний тормозного диска. 1 – тормозной диск, 2 – кассета для фиксации диска, 3 – нагружающее устройство, 4 – силовые пальцы, 5 – передаточная муфта, 6 – рычаг для передачи момента, 7 – силовой гидроцилиндр, 8 – измерительный элемент.

Действия установки заключаются в следующем: силовой гидроцилиндр (7) через рычаг (6) и промежуточную муфту (5) передает на нагружающий блок (3) с пальцами (4) усилие. Пальцы, имитирующие направляющие барабана колеса, входят в пазы испытуемого диска (1) и передают усилия (вплоть до разрушения) на боковую стенку паза.

Диски испытывались как с шипами, защищенными стальными накладками, так и без накладок с целью оценки прочности материала в конструкции.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

При рассмотрении результатов испытаний шипов дисков на прочностной установке следует обратить внимание, что профиль паза диска может быть выполнен как прямоугольной формы, так и трапециевидной.

Результаты испытаний шипов диска и прочностные характеристики материалов, полученные на лабораторных образцах обобщены в таблице 2.

Испытания дисков с шипами прямоугольной формы, не защищенных стальными накладками, показали, что наибольшую прочность имеет диск, изготовленный из материала варианта 2. Влияние конфигурации паза на величину прочности шипа определялось на примере испытаний дисков из базового материала варианта 1. Для трапециевидного паза вследствие изменения площади контакта силового пальца с боковой плоскостью паза, величина разрушающего усилия уменьшается на 25% по сравнению с величиной, необходимой для разрушения прямоугольного паза.

Таблица 2.

Прочностные характеристики испытываемых материалов.

№ варианта	Профиль шипа	P, кгс Шип без накладки	P, кгс Шип с накладкой	$\tau_{сд}$ межслоевой сдвиг			$\sigma_{изг}$ в радиальном направлении		
				$\tau_{ср}$, МПа	C, МПа	K _{вар} , %	$\sigma_{изг}$, МПа	C, МПа	K _{вар} , %
1	Прямоуг.	1130	2000	17,8	3,9	21,9			
1а	Трапец.	860	2000						
2	Прямоуг.	1460	2650	31,5	6,2	19,5	142,3	26,9	18,9
3	Прямоуг.	1175	2100	29,35	8,5	28,5	130,7	32,8	25,1
4	Трапец.	850	2150	33,3	3,6	10,7	110,7	15,0	13,5

Разрушение пазов трапециевидной формы из материалов варианта 1 и варианта 4 происходит практически при одной нагрузке $P_{разр.} = 850$ кгс не зависимо от типа матрицы материала. Следует отметить зависимость прочности конструкции от плотности материала. На рис.7 показана зависимость величины усилия, необходимого для разрушения шипа диска от плотности материала.

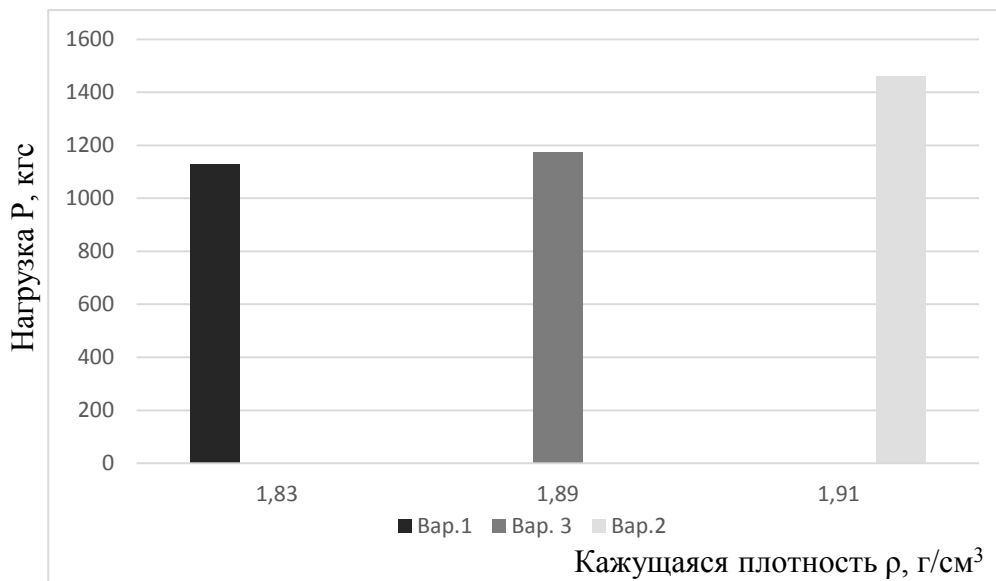


Рис.7. Зависимость прочности шипа диска от плотности материала.

Наиболее прочный материал имеет, соответственно, более высокую плотность. Обращает на себя внимание тот факт, что материалы варианта 1 и варианта 4, (изготовленные по различным технологиям), имеют как прочность, так и плотность на одном уровне.

На рис.8 представлена гистограмма величины усилия, необходимого для разрушения шипа диска, изготовленного из различных материалов, при этом шипы диска испытывались как с накладками, так и без накладок.

Результаты испытаний показывают, что оборудование шипов накладками нивелирует разницу в прочности материалов, увеличивая ее практически в 1,5-2 раза.

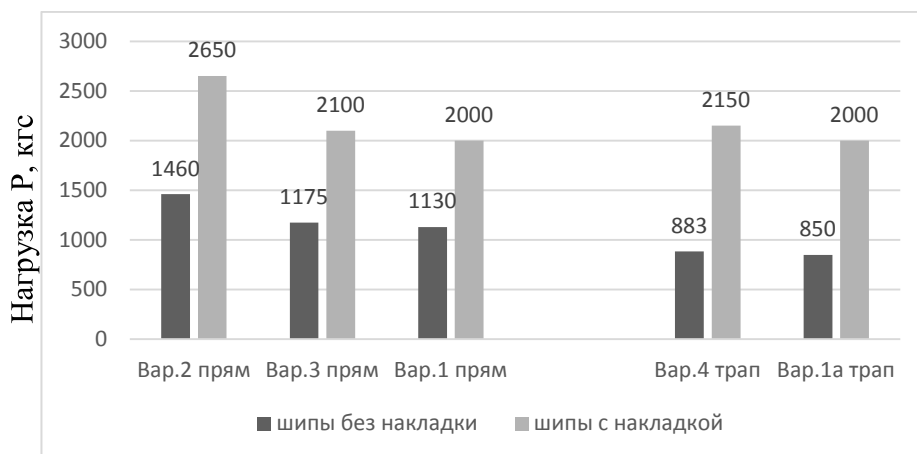


Рис.8. Разрушающая нагрузка на шипы, оборудованные накладками и без накладок.

Этот факт объясняется тем, что напряжения от воздействия направляющей на накладку в процессе нагружения распределяются, главным образом, на сами накладки, существенно защищая шипы от нагрузки, как это показано на рис.9.

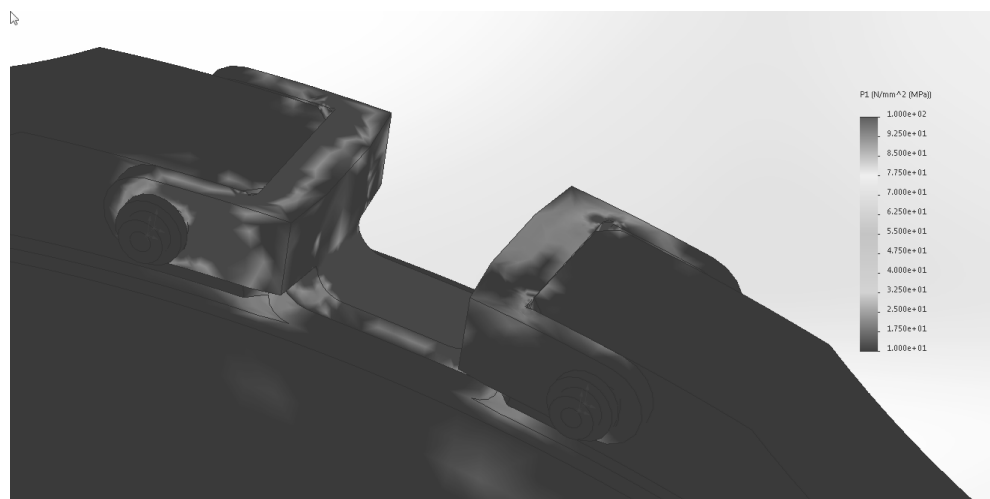


Рис.9. Распределение напряжений от действия направляющей на накладки.

Максимальную прочность шипов имеет диск, изготовленный из композиционного материала варианта 2. Анализ приведенных результатов показывает, что материал варианта 2 превосходит по прочности базовый материал варианта 1 практически на 30%. Наименьшую прочность шипов имеют материалы вариантов 1 и 4.

Как видно из таблицы значения предела прочности при межслоевом сдвиге материала варианта 4 с пироуглеродной матрицей и материалов вариантов 2 и 3 с пековой матрицей находятся практически на одном уровне, кроме базового материала. При этом образцы из материала варианта 4 показали меньший разброс результатов (стандартное отклонение – 3,6 МПа и коэффициент вариации 10,7-15,6%), чем образцы из материалов вариантов 2 и 3 (стандартное отклонение 3,9-8,5, коэффициент вариации 19,5-28,5%). Причина этого, по-видимому, состоит в том, что структура материала с пироуглеродной матрицей, армированная лентами и войлоком и изготовленная иглопрошивным методом, достаточно упорядоченная, однородная (рис.10).

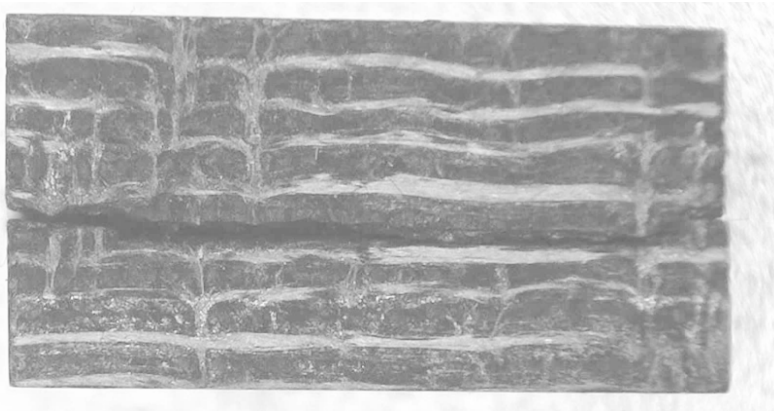


Рис.10. Линия фронта разрушения образца из материала варианта 4 с пироуглеродной матрицей после испытания на сдвиг.

На поверхности излома одной половины образца выступают конечные части игл, на другой половине наблюдаются отдельные свободные волокна (рис.11).



Рис.11. Поверхности излома образца из материала с пироуглеродной матрицей после испытания на сдвиг.

Визуальный осмотр образцов из материала с пековой матрицей показывает, что укладка слоев волокон и жгутов в матрице происходит плоскопараллельно (рис.12).



Рис.12. Линия фронта разрушения материалов на основе пековой матрицы после испытания на сдвиг.

На поверхности излома образца видно хаотичное расположение жгутов разной ширины от нитеобразных до 2-4 мм (рис.13).

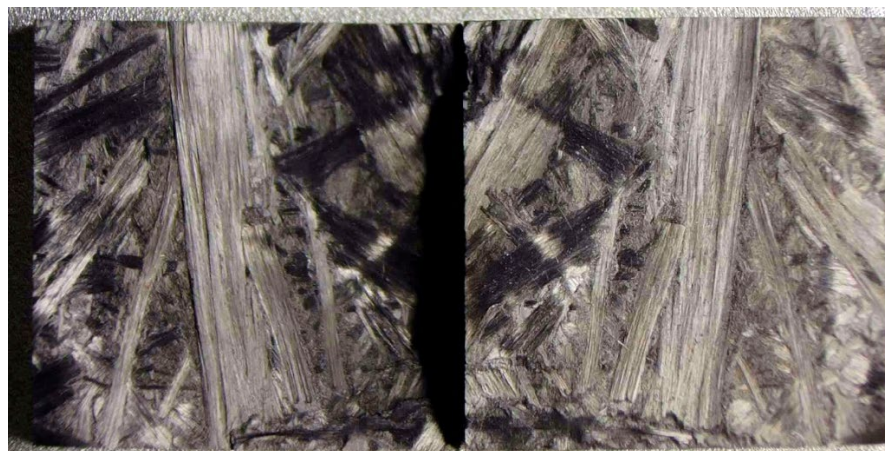


Рис.13. Поверхности излома образца из материала на основе пековой матрицы после испытания на межслоевой сдвиг.

При разрушении образца смещение слоев друг относительно друга образует блестящую, гладкую поверхность излома.

Приведенные величины значений предела прочности при межслоевом сдвиге показали отсутствие зависимости данного параметра от плотности материала. Так материал варианта 4 с пироуглеродной матрицей плотностью $1,83 \text{ г/см}^3$ имеет наибольшую величину предела прочности при сдвиге – 33,3 МПа.

При этом значения предела прочности при изгибе представленных материалов показывают четкую зависимость от их плотности (рис.14).

Предел прочности при изгибе материала варианта 2 (также, как и прочность шипов диска), выше на 30% прочности материала варианта 4 с пироуглеродной матрицей.

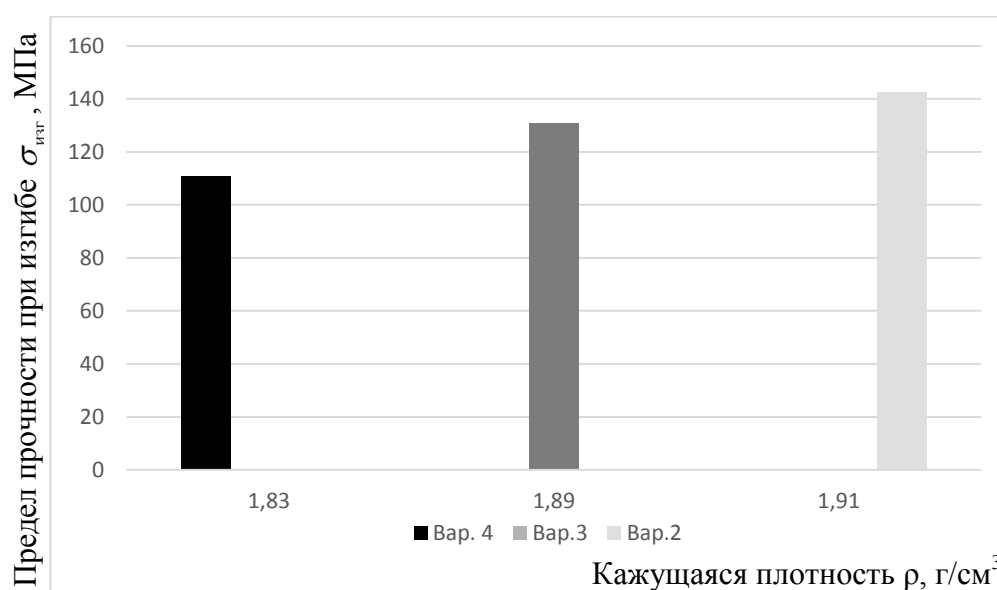


Рис.14. Зависимость прочности при изгибе от плотности материала.

ВЫВОДЫ

1. Определена закономерность изменения предела прочности при изгибе и прочности шипов диска от кажущейся плотности материала диска, при этом у параметра прочности межслоевого сдвига закономерности изменения от плотности не наблюдается.

2. Поскольку элементы диска под воздействием эксплуатационной нагрузки испытывают сложнапряжённое состояние от действия ряда напряжений, таких как изгиб, сдвиг и др., оценку работоспособности углерод-углеродных композиционных материалов, применяемых в тормозных дисках, объективнее проводить на штатном диске, используя прочностную установку.

3. Сравнительные испытания ряда материалов показали, что материал КВ-7 на основе смеси карбонизированных и графитированных волокон в сравнении с базовым материалом АДФ-ОС наиболее предпочтителен для повышения работоспособности тормозных дисков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крамаренко Е.И., Кулаков В.В., Кенигфест, А.М., Лисовский С.А., Мозалев В.В. *Авиационные тормоза с углеродными фрикционными дисками* // Трение и износ. – 2006. – Т.27. – №3. – С.290-298.
2. Болдырева А.А., Яруничева Ю.А., Дернакова А.В., Ивашов И.В. *Прочность полимерного композита (стеклопластика) при межслойном сдвиге* // Инженерно-строительный журнал. – 2016. – №2. – С.42-50.
3. Зенкевич О., Морган К. *Конечные элементы и аппроксимация*. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
4. Маслов Л.Б. *Численные методы для решения задач теории упругости. Методическое пособие*. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет, 1999. – 28 с.
5. Хечумов Р.А., Кепплер Х., Прокопьев В.И. *Применение метода конечных элементов к расчету конструкций*. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 1994. – 353 с.
6. Yoo J.-S., Sung D.-Un., Kim C.-G., Hong C.-S., Kim K.-S. *Mechanical strength experiments of carbon/ carbon brake disk* // The Korea society for composite materials. – 1999. – Vol.9. – No.2. – Pp.33-39.
7. Алифанов А.В., Демин А.В., Костиков В.И., Кулаков В.В., Окулов Б.С., Сверчков Ю.Г., Тюх В.Б. *Способ изготовления фрикционного изделия*. Патент, 2001. – RU 2194057.
8. Peter Geoffrey Lawton, Norman Smith. *Production of a shaped filamentary structure*. Патент, 1986. – EP0232059A2.
9. Крамаренко Е.И., Селезнев А.Н., Мозалев В.В., Сивурова В.А., Шевяхов С.Н., Кулаков В.В., Кенигфест А.М. *Устройство для прочностных испытаний фрикционных дисков для тормозных систем*. Патент, 2014. – №158908.

REFERENCES

1. Kramarenko E.I., Kylakov V.V., Kenigfest A.M., Lisovskiy S.A., Mozalev V.V. *Aviatsionnye tormoza s ughlerodnymi friktsionnymi diskami [Aircraftbrake with carbon friction disks]*. *Trenie i iznos*, 2006, Vol.27, No.3, Pp.290-298.

2. Boldyreva A.A., Yarunicheva Y.A., Dernakova A.V., Ivashov I.I. *Prochnost' polimernogo kompozita (stekloplastika) pri mezhslojnom sdvige [The strength of the polymer composite (fiberglass) with interlaminar shear]*. Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal, 2016, No.2, Pp.42-50.
3. Zenkevich O. Morgan K. *Konechnye ehlementy i approksimatsiya [Finite elements and approximation]*. Moskva, Mir, 1986, 318 p.
4. Maslov L.B. *Chislennye metody dlya pesheniya zadach teopii uppugosti [Numerical methods for solving problems of elasticity theory]*. Ivanovo, Ivanovskij gosudarstvennyj ehnergeticheskij universitet, 1999, 28 p.
5. Khechumov R.A., Kepler H., Prokopjev V.I. *Primenenie metoda konechnykh ehlementov k raschetu konstruksij [Application of the finite element method to the calculation of structures]*. Moskva, Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 1994, 353 p.
6. Yoo J.-S., Sung D.-Un., Kim C.-G., Hong C.-S., Kim K.-S. *Mechanical strength experiments of carbon/ carbon brake disk*. The Korea society for composite materials, 1999, Vol.9, No.2, Pp.33-39.
7. Alifanov A.V., Demin A.V., Kostikov V.I., Kulakov V.V., Okulov B.S., Sverchkov Ju.G., Tjukh V.B. *Sposob izgotovleniya friksionnogo izdeliya [Method of manufacturing frictional product]*. Patent, 2001, RU 2194057.
8. Peter Geoffrey Lawton, Norman Smith. *Production of a shaped filamentary structure*. Patent, 1986, EP0232059A2.
9. Kramarenko E.I., Seleznev A.Y., Mozalev V.V., Sivurova V.A., Shevyakhov S.N., Kulakov V.V., Kenigfest A.M. *Ustrojstvo dlya prochnostnykh ispytanij friksionnykh diskov dlya tormoznykh sistem [Arrangement for mechanical strength experiments of carbon-carbon brake disk]*. Patent, 2014, No.158908.

Поступила в редакцию 13 октября 2020 года.

Сведения об авторах:

Кулаков Валерий Васильевич – к.т.н., нач. отд. 90, ПАО Авиацонная корпорация «Рубин», г. Балашиха, Россия; e-mail: termarkv@mail.ru
Панков Михаил Игоревич – нач. бюро 90.3, ПАО Авиацонная корпорация «Рубин», г. Балашиха, Россия; e-mail: rubin_pankov@mail.ru
Сивурова Вера Алексеевна – к.т.н., вед. инженер-конструктор, ПАО Авиацонная корпорация «Рубин», г. Балашиха, Россия; e-mail: vera_147@mail.ru
Блохин Владислав Викторович – гл. конструктор по взлетно-посадочным устройствам, ПАО Авиацонная корпорация «Рубин», г. Балашиха, Россия; e-mail: blokhin_v@cloud.com
Лисин Александр Николаевич – д.т.н., консультант, ПАО Авиацонная корпорация «Рубин», г. Балашиха, Россия; e-mail: hallo_ATHP@mail.ru
Мозалев Валентин Васильевич – к.т.н., консультант, ПАО Авиацонная корпорация «Рубин», г. Балашиха, Россия; e-mail: mozalev1934@mail.ru