

УДК 678.01

DOI 10.33113/mkmk.ras.2021.27.02.261_271.07

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ ФРИКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ, НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНЫХ ВОЛОКОН

Кулаков В.В., Шмелев Д.С., Иванова А.Н., Голубков А.К.

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

АННОТАЦИЯ

Проектирование углерод-углеродных композитов (УУКМ) фрикционного назначения является важной задачей, поскольку существующие подходы применимы только к технологиям получения материалов с использованием непрерывного волокна в виде лент и тканей и не подходят для изделий с хаотичным армированием короткими волокнами, использование которых улучшает механические характеристики УУКМ как при статических, так и при динамических воздействиях. Также такая технология имеет экономические преимущества за счет использования более дешевого сырья и значительного сокращения времени стадии формования при наличии сопоставимых физико-механических и фрикционных свойств с УУКМ на основе иглопробивания. Для обеспечения прочности дискретно армированных фрикционных изделий необходимо обеспечивать требуемую эффективную длину углеродного волокна в жгутах, распределенных в объеме материала, за счет их оценки по степени разделения филаментов. В данной статье приведена зависимость критической длины жгута от количества его волокон, из которой выяснено, что критическая длина жгута устанавливает минимальное пороговое значение, при котором материал способен реализовать высокие прочностные характеристики. Указанные соотношения позволяют оценить минимально необходимую степень разделения жгута для заданной длины волокна, что позволит реализовать максимальную прочность материала с учетом технологических ограничений в степени разделения. Также предложены модели, позволяющие оценить технологические перспективы изготовления дискретно армированных углерод-углеродных материалов фрикционного назначения и прогнозировать их свойства. Показано влияние дополнительного армирования межжгутовых пространств композиционного материала на его износостойкость при высоких удельных энергиях трения.

Ключевые слова: углерод-углеродные композиционные материалы; армирование; жгуты; прочность; моделирование; межжгутовые пространства

DESIGN FEATURES OF CARBON-CARBON FRICTION COMPOSITES MADE BY THE AERODYNAMIC METHOD BASED ON DISCRETE FIBERS

Kulakov V.V., Shmelev D.S., Golubkov A.K., Ivanova A.N.

PJSC Aircraft Corporation "Rubin", Balashikha, Russia

The designing of carbon-carbon composites (CCC) for friction use is an important problem, since the existing approaches are applicable only to technologies for obtaining

materials using continuous fiber in the form of tapes and fabrics and are not suitable for products with chaotic reinforcement by short fibers, the use of which improves the mechanical characteristics of CCC both under static and dynamic influences. Also, this technology has economic advantages due to the use of cheaper raw materials and a significant reduction in the time of the molding stage in the presence of comparable physical, mechanical and frictional properties with CCC based on needle-punching and needle-piercing. To ensure the strength of discretely reinforced friction products, it is necessary to ensure the required effective length of the carbon fiber in the bundles distributed in the volume of the material, due to their evaluation by the degree of separation of the filaments. This article shows the dependence of the critical length of the bundle on the number of its fibers, from which it is found out that the critical length of the bundle sets the minimum threshold value at which the material is able to realize high strength characteristics. These ratios allow us to estimate the minimum necessary rate of separation of the bundle for a given fiber length. this will allow you to realize the maximum strength of the material, taking into account the technological limitations in the rate of separation. Models are also proposed that allow us to evaluate the technological prospects for the manufacture of discretely reinforced carbon-carbon materials for friction purposes and to predict their properties. The effect of additional reinforcement of the inter-joint spaces of the composite material on its wear resistance at high specific friction energies is shown.

Keywords: carbon-carbon composite materials; reinforcement; harnesses; strength; modeling; interstitial spaces

Дискретно армированные углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) занимают особое место среди современных композиционных материалов вследствие уникальности тепломеханических и фрикционных свойств, возможностей управления ими на стадии производства и очевидных экономических преимуществ. Особое значение преимущества дискретно армированных УУКМ приобретают в высоконагруженных тормозных системах различных типов самолетов, где требуется, повышенная износостойчивость при различных условиях эксплуатации при относительно низкой цене фрикционных элементов [1-2].

В настоящее время в авиационных тормозах используются УУКМ на базе комбинированных схем армирования, включающих сочетание углеродных тканей, лент или других структур из непрерывных волокон с дискретными, например, в виде войлоков. Для связывания армирующих слоев в этом случае применяется иглопробивная технология, обеспечивающая внедрение жгутов волокна в трансверсальном направлении (*Z*-армирование) в слои основного материала [3].

В данной статье рассматриваются возможности применения альтернативной технологии получения композитов тонкой структуры с микросвязыванием так называемых «псевдослоев» дискретно армированного композита, образующихся при послойной укладке дискретного армирующего наполнителя путем применения специальных методов аэродинамического формирования структуры и без использования широко известных различных приемов разволокнения и гидропробивания [4-5]. Технология производства дискретно армированных композиционных материалов методом аэродинамического формования имеет экономические преимущества, за счет использования более дешевого сырья и значительного сокращения технологической стадии формования, однако процесс аэродинамического формования требует точной настройки для обеспечения физико-механических и фрикционно-износных характеристик получаемого материала, на которые в значительной степени

вливают характеристики исходного сырья, например, длина жгутов углеродных волокон, толщина жгутов, содержание аппрета и т.д.

В отличие от иглопробивных технологий макросвязывания, основанных на механическом внедрении армирующих элементов в трансверсальном направлении, при микросвязывании аэродинамическим методом происходит предварительное разделение жгутов на отдельные части и отдельные волокна путем аэродинамического воздействия и внедрение их в псевдослой, образованные армирующими элементами. Исходные, предварительно нарезанные до заданной длины жгуты волокон разделяются и определенным образом ориентируются в потоках воздуха, в результате чего формируется смешанная среда, включающая связанные между собой тонкие разделенные жгуты и элементарные волокна. Принципиальная схема установки аэродинамического формования показана на рис.1.

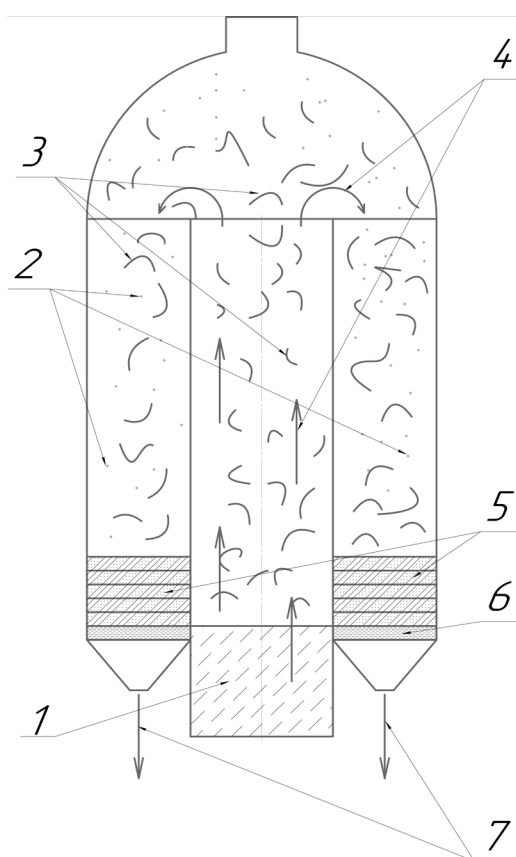


Рис.1. Принципиальная схема установки аэродинамического формования.
1 – предварительно нарезанные жгуты, 2 – порошок связующего, 3 – жгуты, разделяемые потоками воздуха, 4 – направление воздуха, 5 – псевдослой пресспакета, 6 – фильтр, 7 – отсос воздуха.

Предварительно нарезанное на жгуты заданной длины волокно (1) помещается в гильзу, где под действием направленных потоков воздуха (4), разделяется (3), и смешивается с порошком связующего (2) в турбулентных воздушных потоках, осаждаясь на фильтре (6) с образованием псевдослоев пресспакета (7). В результате происходит уменьшение толщины жгутов волокна.

Степень связанности композита при таком способе производства определяется геометрическими размерами (длиной и диаметром) исходного

жгута, ориентацией отдельных жгутов в объеме материала и объемной долей армирующих волокон (степенью армирования).

Основными факторами, определяющие прочность дискретно армированных композиционных материалов при аэродинамическом формовании являются:

- длина жгутов волокна композиционного материала;
- толщина жгутов волокна;
- объемное содержание армирующего наполнителя;
- прочностные характеристики компонентов (предел прочности, модуль упругости и др.).

Для обеспечения прочности в композиционном материале необходимо обеспечить требуемую длину волокна. В дискретно армированных материалах в качестве армирующего элемента применяются жгуты углеродного волокна, которые в результате аэродинамического формования в готовом композите различаются по степени разделения (в основном, от 1К до 22К). Жгуты разного разделения будут иметь различную эффективную длину волокна (за счет различного диаметра). Для проведения этой оценки, примем жгут за монолитную армирующую единицу круглого сечения, одновременно примем то, что жгут бездефектный и равномерно армированный (в жгуте отсутствуют усадки, диаметр филамента равен 7 мкм, расстояние между соседними филаментами постоянно и равно 0,75 мкм). Учитывая принятый диаметр филамента и используя формулу Келли [6-7] для определения критической длины волокна в мм, получаем

$$l_{кр} = \frac{D\sigma}{2\tau}, \quad (1)$$

где D – диаметр жгута в мм, σ – прочность углеродного волокна, τ – прочность границы связи волокно-матрица, а также формулу для оценки диаметра жгута исходя из его толщины

$$D = 8,5 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{4f}{\pi}}, \quad (2)$$

где f – количество филаментов в жгуте, коэффициент $8,5 \cdot 10^{-3}$ – диаметр элементарного филамента и окружающей его матрицы.

Формулы (1) и (2) могут быть объединены для описания зависимости $l_{кр}$ от количества филаментов в жгуте для дискретно армированного композиционного материала

$$l_{кр} = \frac{8,5 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{4f}{\pi}}}{2\tau}. \quad (3)$$

Таким образом, зависимость критической длины жгута от его количества филаментов может быть представлена следующим графиком (рис.2).

Из приведенного графика следует, что критическая длина жгута устанавливает минимальное пороговое значение, при котором материал способен реализовать высокие прочностные характеристики, является нецелесообразно использовать жгуты меньшей длины или при формовании дискретно армированного материала разделять исходное волокно на более крупные жгуты.

Указанные соотношения позволяют оценить минимально необходимую степень разделения жгута для заданной длины волокна, что позволит реализовать максимальную прочность материала с учетом технологических ограничений

в степени разделения. Например, при невозможности реализации разделения жгутов менее 5К, длина волокна должна составлять 20 и более мм.

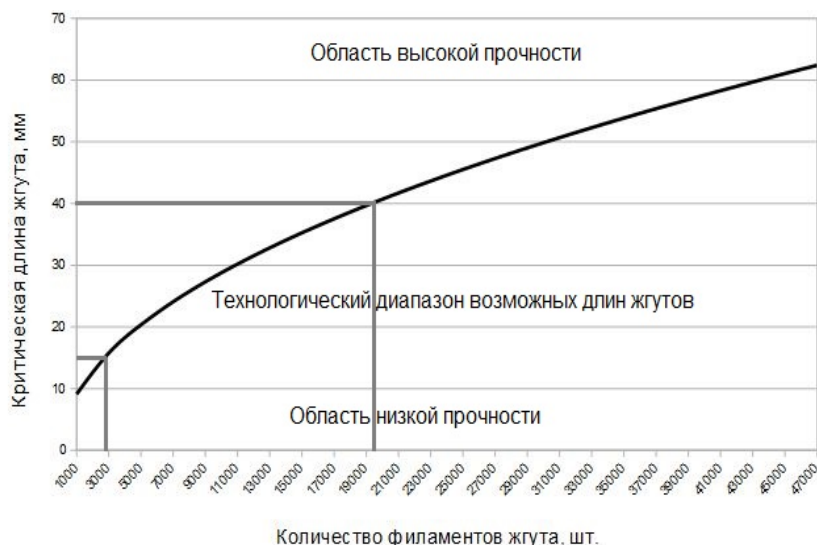


Рис.2. Зависимость критической длины жгута от количества филаментов.

Рассмотрены две модели прочности композита, в первой из которых длина жгутов не достигает критической длины для заданной толщины жгута, а в другой соответственно, в структуре композита все жгуты имеют длину, превосходящую критическую. Для приведенных расчетов принято, что материал армирован дискретными волокнами однонаправленно, все жгуты одинаковой толщины и равномерно распределены, в структуре отсутствуют какие-либо дефекты. Также допущено, что фазы армирующего наполнителя и связующего идеально связаны, что позволяет воспользоваться правилом смесей. Если длина жгутов меньше критической, учитывая слагаемое, отвечающее за прочность матрицы, прочность УУКМ может быть определена по следующей формуле

$$\sigma = \frac{\tau l}{D} \Psi + \sigma_m (1 - \Psi), \quad (4)$$

где Ψ – степень армирования, σ_m – прочность матрицы.

По сути, она зависит только от прочности матрицы. Однако, начиная с критической длины жгутов, прочность композиционного материала будет отличаться. Увеличение длины волокна приводит к увеличению участка волокон, на которых действует напряжение, равное растягивающему напряжению в бесконечно длинном волокне. Если растягивающее напряжение от концов волокон растет линейно, то прочность композита будет определяться следующим соотношением

$$\sigma = \sigma_f \left(1 - \frac{l_{cr}}{2l} \right) \Psi + \sigma_m (1 - \Psi) \quad (5)$$

и теоретическая прочность материала начинает возрастать (рис.3).

На графике виден резкий рост прочности после превышения жгутом критической длины. Например, для случая 1К критическая длина жгута составляет 9,1 мм, что приводит к резкому увеличению прочности уже при длине жгута 10 мм за счет превышения критической длины жгута, вследствие чего

механизм разрушения материала происходит по модели, учитывающей жгутовое армирование.

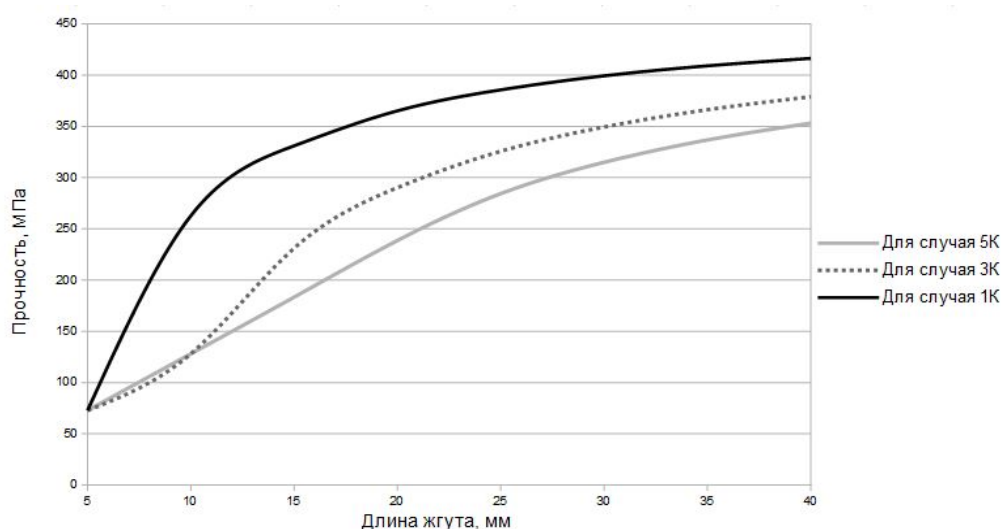


Рис.3. График зависимости прочности дискретно армированного УУКМ от длины жгута и количества филаментов в нем.

Исходя из приведенных выше данных, является оправданным с точки зрения прочности формировать материал максимально тонкой структуры. Однако, технологические особенности производства дискретно армированных композиционных материалов не позволяют сформировать структуру, состоящую из однонаправленных жгутов одинаковой толщины. Проведенные исследования показали, что, например, при формировании материала методом аэродиспергирования на основе исходного жгута волокон длиной 15 мм и толщиной 48 К в материале образуются жгуты преимущественно средней толщины 7,3 К (содержание жгутов в объеме – 37%) и стандартным отклонением 3,7 К. При этом в реальном композите встречаются жгуты толщинами от 1,6 К до 26 К, что очевидно приводит к локальному уменьшению прочности.

Таким образом, прочность скорректируется с учетом равномерного распределения в материале только тонких и толстых жгутов, оказывающих разное влияние на прочность. С учетом вышеизложенного для оценки прочности дискретно армированного УУКМ авторами использована следующая формула

$$\sigma = \frac{3}{8} \sigma_f \left(1 - \frac{l_{кр1}}{2l} \right) \Psi \alpha + \frac{3 \tau l_2}{8 D} \Psi (1 - \alpha) + \sigma_m (1 - \Psi), \quad (6)$$

где $l_{кр1}$ – критическая длина для тонких жгутов, l_2 – длина толстых жгутов, α – доля тонких жгутов, коэффициент $\frac{3}{8}$ – поправочный коэффициент для хаотично армированного материала [8].

Теоретическая прочность композиционного материала с длиной жгутов, например, 15 мм и вышеприведенным распределением жгутов по толщинам может составить $\sigma = 290,28$ МПа.

Однако, данная оценка является достаточно условной, так как жгуты разной толщины оказывают разное влияние на прочность КМ. Вероятностное распределение различных по толщинам жгутов представлено на рис.4.

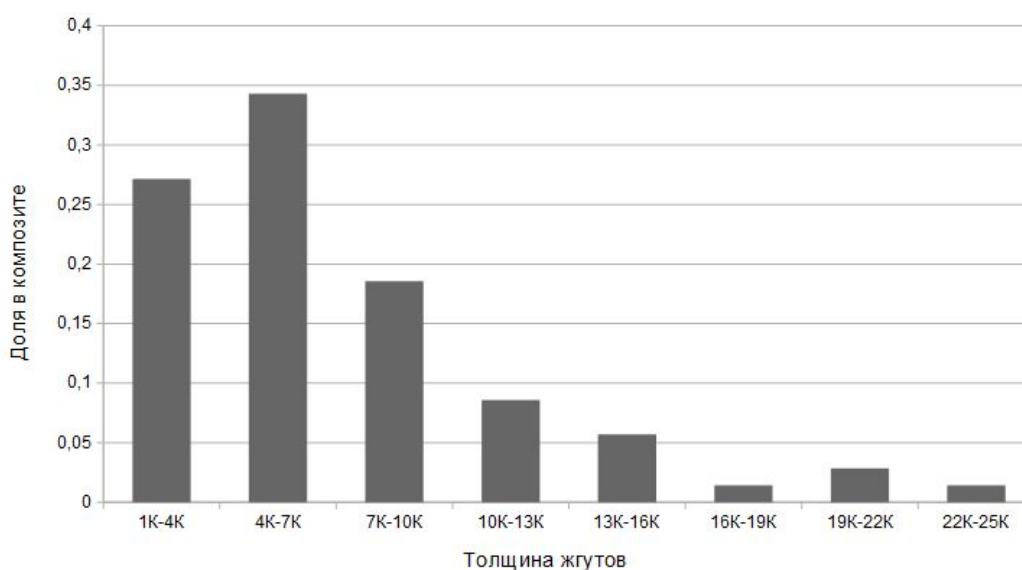


Рис.4. Гистограмма распределения толщин жгутов в КМ.

Для более точного прогнозирования итоговой прочности получаемого композита может быть применена уточненная формула, использующая правило смесей с учетом разбиения толщин армирующего компонента на i интервалов, каждый из которых может быть охарактеризован средней толщиной жгута и долей жгутов i -того интервала в композиции

$$\sigma = \sum_{i=1}^n \left(\frac{3}{8} \sigma_f \left(1 - \frac{l_{kpi}}{2l} \right) \Psi \alpha_i \right) + \sum_{j=1}^k \left(\frac{3}{8} \frac{\tau l}{D_j} \Psi \beta_j \right) + \sigma_m (1 - \Psi), \quad (7)$$

где i – порядковый номер интервала с волокнами длиннее l_{kp} , j – порядковый номер интервала с волокнами короче l_{kp} , n – общее количество интервалов для волокон, превышающих критическую длину, k – общее количество интервалов для волокон, не превышающих критическую длину, l_{kpi} – критическая длина для жгутов i -того интервала, α_i – доля жгутов i -того интервала, D_j – диаметр жгутов j -того интервала, β_j – доля жгутов j -того интервала.

Прочность КМ, с указанным распределением жгутов по размерам и длиной исходных жгутов 15 мм составит $\sigma = 126$ МПа.

Другой особенностью дискретно армированных УУКМ является образование при разделении жгутов в структуре межжгутовых зон (МЖЗ) (рис.5). Определенный интерес представляло выявить их влияние на прочностные и фрикционные свойства. Типичные МЖЗ, заполненные короткими волокнами, могут быть рассмотрены как композиционный материал, имеющий изотропное армирование филаментами. Длина филаментов, армирующих МЖЗ в среднем составляет от 80 до 130 мкм, что, в соответствии с расчетом критической длины волокна (1-3), позволяет сделать вывод о том, что при указанной длине критическая длина волокна для филамента $d = 7$ мкм составляет 288 мкм.

Прочность композиционного материала в межжгутовом пространстве может быть вычислена по формуле (4) и не превысит 118,2 МПа, что говорит о низком влиянии армирования межжгутового пространства на прочность материала. Расчеты показали, что прочность дискретно армированного композита определяет

каркас, образованный жгутами, в то время как МЖЗ существенно влияют на фрикционно-износные характеристики (таблица 1).

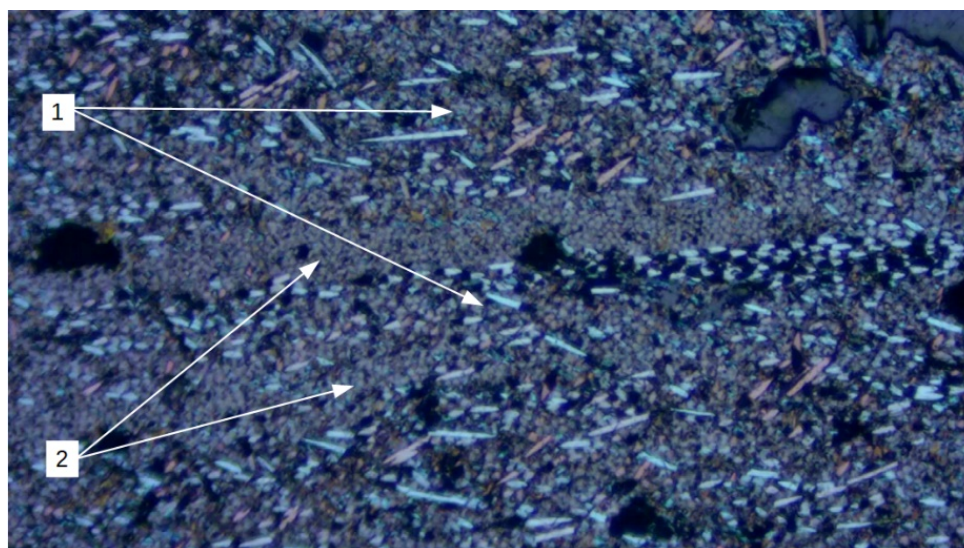


Рис.5. Типичная структура дискретно армированного УУКМ. 1 – армированные межжгутовые пространства, 2 – разделенные жгуты.

Таблица 1.

Сравнение физико-механических и фрикционных характеристик микро- и макросвязанных УУКМ.

Материал	Предел прочности при изгибе, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочности при межслоевом сдвиге, МПа	Линейный износ, мкм/торм	Коэффициент трения
Исходные жгуты длиной 30 мм, армированные межжгутовые пространства	179,56	199,86	31,7	0,4-1,1	0,26-0,31
Исходные жгуты длиной 30 мм, неармированные межжгутовые пространства	184,8	198,73	32,2	1,5-3,7	0,28-0,38

Влияние введения в МЖЗ дополнительного армирующего компонента показало, что таким образом можно увеличить износостойкость в 3-5 раза, особенно на высоких удельных энергиях, при этом способствуя повышению твердости МЖЗ и образованию в результате более однородной поверхности трения (рис.6).

Представленные на рис.6 зависимости подтверждают предположение о значительном влиянии армирования МЖП на износостойкость дискретно армированных композитов. При малых удельных энергиях это влияние незначительно, тогда как при повышении удельных энергий трения эффект снижения линейного износа становится более явным, тогда как фрикционный

материал с армированными МЖП сохраняет свою износостойкость на всем диапазоне удельных энергий, показывая значительно более низкий линейный износ.

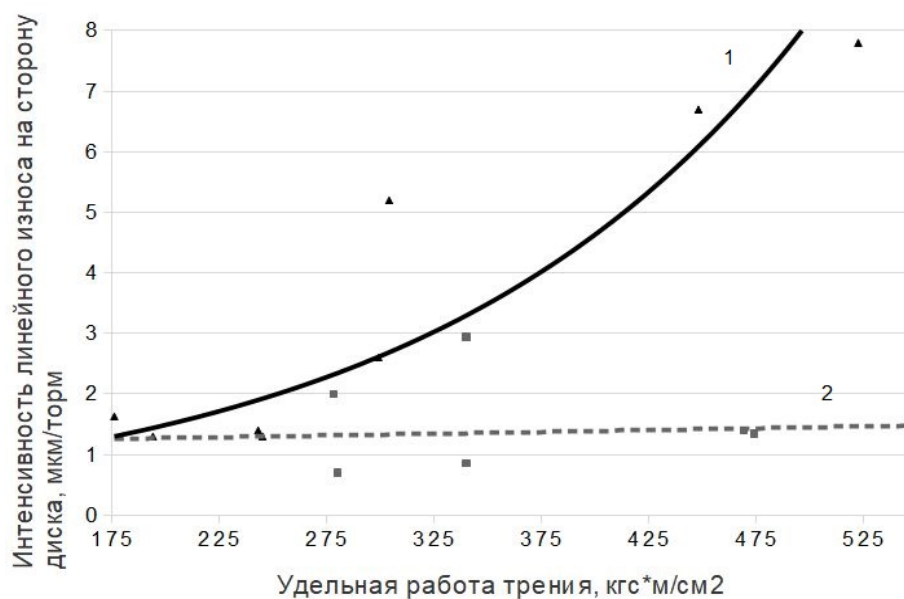


Рис.6. Износостойкость различных типов дискретно армированных УУКМ в зависимости от удельной работы трения. 1 – с армированными межжгутовыми пространствами, 2 – с неармированными межжгутовыми пространствами.

В процессе разделения жгутов, исследования микроструктуры показали, что имеет место разориентация армирующих жгутов. Наличие подобной Z-составляющей позволяет предположить его положительное влияние на межслоевой сдвиг композиционного материала.

Анализ представленных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Показана возможность конструирования фрикционных УУКМ, обладающих микросвязанной структурой и имеющих сопоставимые свойства при использовании аэродинамического метода формования с широко распространенными в мире УУКМ, произведенными с использованием технологий иглопробивания;

2. Предложена модель определения оптимальной длины исходных армирующих жгутов для обеспечения требуемой прочности композиционного материала на основе дискретного армирования;

3. Предложены модели, позволяющие оценить перспективы изготовления дискретно армированного УУКМ и прогнозировать его свойства;

4. Экспериментально установлено положительное влияние дополнительного армирования межжгутовых пространств композиционного материала на износостойкость, позволяющее увеличить ее в 3-5 раз, в особенности на высоких удельных энергиях трения.

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. Степашкин А.А. *Работоспособность углерод-углеродных композиционных материалов фрикционного назначения при циклическом нагружении: дис. канд. техн. наук: 05.16.01.* – М., 2013. – 168 с.
3. Vassilis Kostopoulos, Nikolaos Sarantinos, Stavros Tsantzalis. *Review of Through-the-Thickness Reinforced z-Pinned Composites* // J. of Composites Science. – 2020. – No.4. – Iss.1. – 31. – 42 p.
4. Галигузов А.А., Селезнев А.Н., Малахо А.П., Авдеев В.В., Кенигфест А.М., Кулаков В.В., Крамаренко Е.И. *Пресс-пакет для производства фрикционных углерод-углеродных композиционных материалов и способ его получения.* Патент RU 2488569, 2013.
5. Галигузов А.А., Малахо А.П., Кулаков В.В., Крамаренко Е.И., Авдеев В.В. *Способ получения фрикционного композиционного углерод-углеродного материала и материал.* Патент RU 2510387, 2014.
6. Коротева Л.И. *Проектирование композиционных материалов с заданной структурой и свойствами* // Пластические массы. – 2016. – №5-6. – С.15-16.
7. Philippe Boisse. *Composite reinforcements for optimum performance.* – Woodhead publishing series, 2011. – 704 p.
8. Фудзии Т., Дзако М. *Механика разрушения композиционных материалов.* – М.: Мир, 1982. – 232 с.

REFERENCES

1. Kramarenko E.I., Kulakov V.V., Kenigfest, A.M, Lisovskij S.A., Mozalev V.V. *Aviatsionnye tormoza s uglerodnymi friktsionnymi diskami [Aviation brakes with carbon friction discs].* Trenie i iznos, 2006, Vol.27, No.3, Pp.290-298.
2. Stepashkin A.A. *Rabotosposobnost' uglerod-uglerodnykh kompozitsionnykh materialov friktsionnogo naznacheniya pri tsiklicheskom nagruzhenii [Efficiency of carbon-carbon composite materials for friction purposes under cyclic loading]:* dis. kand. tekhn. nauk: 05.16.01, Moskva, 2013, 168 p.
3. Vassilis Kostopoulos, Nikolaos Sarantinos, Stavros Tsantzalis. *Review of Through-the-Thickness Reinforced z-Pinned Composites.* J. of Composites Science, 2020, No.4, Iss.1, 31, 42 p.
4. Galiguzov A.A., Seleznev A.N., Malaho A.P., Avdeev V.V., Kenigfest A.M., Kulakov V.V., Kramarenko E.I. *Press-paket dlya proizvodstva friktsionnykh uglerod-uglerodnykh kompozitsionnykh materialov i sposob ego polucheniya [Press package for the production of friction carbon-carbon composite materials and the method of its production].* Patent, 2013, RU 2488569.
5. Galiguzov A.A., Malaho A.P., Kulakov V.V., Kramarenko E.I., Avdeev V.V. *Sposob polucheniya friktsionnogo kompozitsionnogo uglerod-uglerodnogo materiala i material [Method for producing a friction composite carbon-carbon material and the material].* Patent, 2014, RU 2510387.
6. Koroteeva L.I. *Proektirovanie kompozitsionnykh materialov s zadannoj strukturoj i svojstvami [Design of composite materials with a given structure and properties].* Plasticheskie massy, 2016, No.5-6, Pp.15-16.

7. Philippe Boisse. *Composite reinforcements for optimum performance*. Woodhead publishing series, 2011, 704 p.
8. Fudzii T., Dzako M. *Mekhanika razrusheniya kompozitsionnykh materialov [Mechanics of destruction of composite materials]* / Perevod s yaponskogo. Moskva, Mir, 1982, 232 p.

Поступила в редакцию 20 апреля 2021 года.

Сведения об авторах:

Кулаков Валерий Васильевич – к.т.н., нач.отдела 90, ПАО Авиационная корпорация «Рубин», г. Балашиха, Россия; e-mail: termarkv@mail.ru

Шмелев Денис Сергеевич – нач. бюро 90.2 отдела 90, ПАО Авиационная корпорация «Рубин», г. Балашиха, Россия; e-mail: shmelev_d@akrubin.ru

Голубков Андрей Константинович – нач.лаб. отдела 90, ПАО Авиационная корпорация «Рубин», г. Балашиха, Россия; e-mail: gaz_250@mail.ru

Иванова Анастасия Николаевна – инж.-исследователь 1-ой кат. отдела 90, ПАО Авиационная корпорация «Рубин», г. Балашиха, Россия; e-mail: carbonenergies@gmail.com