

УДК 629.8:620.22

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В АВИАСТРОЕНИИ

САВЧЕНКО В.А., к.т.н.

Кафедра композиционных материалов и технологий, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (061) 769-82-71, e-mail: savchen2007@vandex.ru. ORCID ID: 0000-0002-4305-0097

Аннотация. *Цель.* Авиастроение использует очень широкий спектр конструкционных технологий, но технический прогресс и экономический кризис приводят к поиску композиционных материалов с высоким уровнем механических и эксплуатационных свойств. Преимуществом таких материалов является низкая плотность, что приводит к снижению общего веса, экономии топлива и увеличению пассажироместности самолетов. *Методика.* Значения эксплуатационных характеристик (удельная прочность, удельная жесткость) композиционных материалов и сплавов, показывают возможность их применения в авиастроении. *Результаты.* История применения композиционных материалов в авиастроении насчитывает более 45 лет. За этот период процент использования композиционных материалов увеличился с 1 до 60. Установлена взаимосвязь развития авиастроения с развитием материаловедения композиционных материалов. Применение композиционных материалов на основе стекловолокна, борного волокна и углеродного волокна приводит к снижению общего веса самолета на 40...60% и, соответственно, к снижению стоимости самих конструкций. Показано сравнение механических свойств композиционных материалов и сплавов, которые чаще всего применяются в авиастроении (алюминий, титан, сталь со стекловолокном, борным волокном и углеродным волокном). Определены эксплуатационные свойства (удельная прочность и удельная жесткость) этих материалов. Внедрение композиционных материалов в авиастроение позволит радикально повысить прочность, надежность, безопасность и другие эксплуатационные характеристики воздушных судов – поскольку в них используются усиливающие элементы нитей, волокон, вкраплений более прочного материала, наномодифицирующих частиц. Для снижения стоимости изделий из композитов в Украине необходимо развивать материаловедение композитов и привлекать инвестиции. *Научная новизна.* Использование композиционных материалов в авиастроении, на основе стекловолокна или углеродного волокна, вместо алюминия позволит в 3...5 раз повысить эксплуатационные свойства изделий. *Практическая значимость.* Применение композиционных материалов в авиастроении привело к значительному снижению общего веса самолетов, что позволит значительно экономить топливный ресурс.

Ключевые слова: композиционные материалы; авиастроение; механические свойства; удельная прочность; удельная жесткость

ПРОБЛЕМИ І ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ В АВІАБУДУВАННІ

САВЧЕНКО В.О., к.т.н.

Кафедра композиційних матеріалів та технологій, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061) 769-82-71, e-mail: savchen2007@vandex.ru. ORCID ID: 0000-0002-4305-0097

Анотація. *Мета.* Авіабудування використовує дуже широкий спектр конструкційних технологій, але технічний прогрес і економічну кризу призводять до пошуку композиційних матеріалів з високим рівнем механічних і експлуатаційних властивостей. Перевагою таких матеріалів є низька щільність, що призводить до зниження загальної ваги, економії палива і збільшення пасажиромісткості літаків. *Методика.* Значення експлуатаційних характеристик (питома міцність, питома жорсткість) композиційних матеріалів і сплавів, показують можливість їх застосування в авіабудуванні. *Результати.* Історія застосування композиційних матеріалів в авіабудуванні налічує більше 45 років. За цей період відсоток використання композиційних матеріалів збільшився з 1 до 60. Встановлено взаємозв'язок розвитку авіабудування з розвитком матеріалознавства композиційних матеріалів. Застосування композиційних матеріалів на основі скловолокна, борного волокна і вуглецевого волокна призводить до зниження загальної ваги літака на 40 ... 60% і, відповідно, до зниження вартості самих конструкцій. Показано порівняння механічних властивостей композиційних матеріалів і сплавів, які найчастіше застосовуються в авіабудуванні (алюміній, титан, сталь зі скловолокном, борним волокном і вуглецевим волокном). Визначено експлуатаційні властивості (питома міцність і питома жорсткість) цих матеріалів. Впровадження композиційних матеріалів в авіабудування дозволить радикально підвищити міцність,

надійність, безпеку та інші експлуатаційні характеристики повітряних суден - оскільки в них використовуються підсилюючі елементи ниток, волокон, вкраплень більш міцного матеріалу, наномодифікуючих частинок. Для зниження вартості виробів з композиційних в Україні необхідно розвивати матеріалознавство композитів і залучати інвестиції. **Наукова новизна.** Використання композиційних матеріалів в авіабудуванні, на основі скловолокна або вуглецевого волокна, замість алюмінію дозволить в 3 ... 5 разів підвищити експлуатаційні властивості виробів. **Практична значимість.** Застосування композиційних матеріалів в авіабудуванні призвело до значного зниження загальної ваги літаків, що дозволить значно економити паливний ресурс.

Ключові слова: композиційні матеріали; авіабудування; механічні властивості; питома мішність; питома жорсткість

PROBLEMS AND PERSPECTIVES OF APPLICATION OF COMPOSITE MATERIALS IN AIRCRAFT

SAVCHENKO V.A., *Cand. Sc. (Tech.)*.

Department of composite materials and technologies, Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskogo street, 64, 69063, Zaporizhzhia, Ukraine, tel. +38 (061) 769-82-71, e-mail: savchen2007@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-4305-0097

Abstract. Purpose. Aircraft uses a very wide range of constructional technologies, but the technological progress and economic crisis lead to the research of composite materials with high mechanical and operational properties level. The advantage of such materials is the low density, which reduces the overall weight and increase fuel economy and increases airplanes' passenger capacity. **Methodology.** The values of the exploitation characteristics (specific strength, specific stiffness) of composite materials and alloys show the possibility of their use in aircraft. **Findings.** The history of composite materials use in aircraft totals to more than 45 years. During this period, the percentage of use of composite materials has increased from 1 to 60. The relationship between the aircraft industry and the development of material science of composite materials has been established. The application of composite materials based on glass fibers, boron and carbon fibers leads to the 40...60% decrease in the overall weight of the airplane and, consequently, to the decrease of the cost of such constructions. The comparison of mechanical properties of composite materials and alloys, which are mostly often used in the aircraft industry (aluminum, titanium, steel, glass fiber, boron fiber, and carbon fiber) is shown. The exploitation properties (specific strength and specific stiffness) of these materials have been determined. The implementation of composite materials into aircraft will allow to drastically increase the strength, reliability, safety and other exploitation characteristics of aircraft – because reinforcing yarn elements, fibers, inclusions of materials with higher strength, nano-modifying particles are used in them. In order to reduce the cost of products from composites in Ukraine it is necessary to develop material science of composite materials and bring investments in. **Originality.** The use of composite materials in aircraft, based on glass or carbon fibers, instead of aluminum will allow 3...5 times increasing of product exploitation properties. **Practical value.** Application of composite materials in aircraft has resulted in significant decrease in the total weight of the airplanes, this will allow saving of fuel resources.

Keywords: composite materials; aircraft; mechanical properties; specific strength; specific stiffness

Введение

Ранние эпохи цивилизации историки подразделяют на каменный, бронзовый и железный века. Нынешний XXI век наши потомки назовут веком композиционных материалов.

Композиционные материалы были известны еще с древних времен, например, в Вавилоне использовали тростник для армирования глины при постройке жилищ, а древние египтяне добавляли рубленую солому в глиняные кирпичи, в Древней Греции железными прутьями укрепляли мраморные колонны при постройке дворцов и храмов. Прямыми предшественниками современных композиционных материалов можно назвать булатные стали и железобетон.

Достижения человеческой цивилизации в таких областях, как аэрокосмическая техника,

машиностроение, строительство были бы не возможны без такого чуда, как композитные материалы. Это искусственно созданный материал. Применяют композиты в авиации и космонавтике (для силовых конструкций искусственных спутников, элементов конструкций летательных аппаратов, теплоизолирующие покрытия Шатлов и космических зондов и т.д.). В наше время почти все, что нас окружает - самолеты, автомобили, дома, техника - это продукт успешного применения композитного материала [1-4].

Чем же так привлекает инженера композиционный материал? Композиционный материал состоит из двух или нескольких компонентов с четко разделяющейся границей между ними. Компоненты композитов (исключение слоистые) можно разделить на связующие - матрица и наполнители - армирующие элементы.

Армирующие элементы в композитных материалах конструкционного назначения обеспечивают обычно механические характеристики материала (жесткость, прочность и т.д.), матрица - совместную работу армирующих элементов, защищая их от агрессивной химической среды и механических повреждений.

Цель

Целью данной работы является изучение проблем и перспектив применения композиционных материалов в авиастроении, сравнение механических и эксплуатационных свойств композитов и сплавов.

Методика

Рассчитаны эксплуатационные характеристики (удельная прочность, удельная жесткость) композиционных материалов и сплавов, применяемых в авиастроении.

Результаты

История композитных материалов (КМ) начинается еще с 1969 г., когда при создании Boeing-747 использовали 1% КМ от общей массы самолета, а в 2009 г. в Boeing-787 Dreamliner эта цифра уже достигла 50% (это крылья, фюзеляж, хвостовой киль и вертикальное оперение). Airbus A380 содержит примерно 30 т композитов, A350 – 14...16 т около 40% от общей массы [5]. В 1975 году для самолета АН-72 организуется и успешно развивается целое производство композиционных материалов, которое занимается изготовлением лопастей из композиционных материалов несущих винтов вертолетов, деталей и агрегатов. АН 72 - это первый отечественный самолет, выполненный с применением различных композитов. Огромное количество деталей и конструкции самолета изготавливались и продолжают изготавливаться из композиционных материалов.

Прежде всего, использование композиционных материалов дает меньший вес изделия. Это важно, например, для автомобиле- и авиастроения – за счет использования композитов, общий вес снижается до 30%, а с развитием отрасли его можно будет уменьшить до 60%, что приведет к существенному уменьшению расходов горючего.

По расчетам фирмы Porcher, за килограмм сэкономленного веса производитель гражданских самолетов готовы платить до 500 евро. В таблице 1 приведены данные по применению композиционных материалов в конструкции самолета и показано снижение массы самолета [1, 6].

Конечно, сейчас мы можем найти самолеты, которые практически полностью изготовлены из стекловолокна. Стоимость стекловолокна с высокими эксплуатационными характеристиками европейских и североамериканских производителей стоит - 1,5...3,5 евро/кг. Снижение цен на стекловолокно на 20...25%, в период 2001...2003 гг., было вызвано вводом в эксплуатацию крупных производств в

Китае. Мировой объем рынка стекловолокна составляет 4...5 миллиарда евро в год [7].

Таблица 1

Уменьшение массы элементов самолета при замене металлических деталей на композиты / Reducing the weight of aircraft components by replacing metal parts for Composites.

Элемент конструкции	Доля композитов, %	Снижение массы, %
Неподвижное крыло:		
обычное	87	29
треугольное	87	23,5
Поворотное крыло	65	20
Хвостовое оперение:		
пластина	79	23
ребро жесткости	79	30
Воздухозаборник сечения:		
постоянного	80	22
переменного	80	20
Фюзеляж	72	20
Механизм шасси	40	16
Конструкции ракет-носителей	50...90	16...33

Ответственные дорогостоящие изделия (космической и авиационной промышленности) изготавливают из специализированного углеродного волокна. Стоимость таких волокон, производимых на предприятиях Восточной Европы, составляет 11 евро/кг, Западной Европы и Японии – от 16 до 25 евро/кг [7]. За последние годы устойчиво прослеживается тенденция снижения цены на специализированные волокна при улучшении их качества.

На украинском рынке специализированных волокон сформировалась сложная ситуация, отсутствие собственного производства вынуждает импортировать качественные композиционные материалы, стоимость которых достигает 250 евро/кг. В результате стоимость материалов на изготовление изделия достигает стоимости готового изделия в стране импортера.

Развитие композиционных материалов следует рассматривать как движение в двух направлениях. Первое - разработка дешевых компонентов и методов их переработки в полуфабрикаты и изделия для гражданских целей широкого применения.

Второе направление - повышение механических характеристик композитов (табл. 2) [1-3, 8-10].

Несмотря на минусы композитов, данные материалы стали идеальными для производства из-за своей прочности, легкому весу и возможности сборки, избежав многих трудностей своих предшественников – металлов и сплавов.

Представители промышленности стремятся найти материалы, которые позволяют оптимизировать сырьевые материалы и эксплуатационные характеристики.

году мировой рынок композиционных материалов оценивался в 60 млрд. евро. По прогнозам экономистов, в этом году ожидается примерно такое же развитие.

Таблица 2

Механические свойства конструкционных материалов / The mechanical properties of structural materials

№	Материал	E_s , ГПа	σ_B , МПа	ρ , кг/м ³
1	Стекловолокно *	72,3	3170	2550
2	Стекловолокно **	51,7	1380	1940
3	Углеродное волокно высокопрочное*	241	2410	1770
4	Углеродное волокно высокопрочное**	152	1410	1500
5	Углепластик ВКУ-29	113,4	1420	1520
6	Борное волокно*	143	2760	2630
7	Борное волокно**	214	1420	2080
8	Мартенситно-старенная сталь	193	2070	8000
9	КМ системы Al-SiC (6092/SiC/17.5p)	107	434	2800
10	Алюминий 7075	68,9	565	2770
11	Титановый сплав Ti-6Al-4V	103	1070	4290

Примечание: * волокно без матрицы, ** волокно в эпоксидной матрице.

Для авиастроения важными эксплуатационными характеристиками композиционных материалов являются удельная прочность $\sigma_B/\rho, g$ и удельная жесткость $E/\rho, g$, где σ_B - временное сопротивление, E - модуль упругости, материала, ρ - плотность материала, g - ускорение свободного падения. Расчетные значения этих показателей приведены в табл.3.

Из приведенных в таблице 3 данных видно, что по удельной прочности и жесткости композиционные материалы превосходят известные конструкционные сплавы.

Удельная прочность стекловолокна в 4...5 раз выше чем у алюминия, основного материала авиастроения, а композиты, на основе борных и углеродных волокон, обладают в 3...6 раз большей удельной жесткостью.

Сочетание разнородных веществ композита приводит к созданию новых конструкционных материалов, свойства которых значительно отличаются от свойств каждого из их составляющих. Конструкции из композиционного материала – это еще один шаг вперед для авиации.

В 2014 году мировой спрос на композитные материалы в аэрокосмической промышленности вырос на 10,7%, что приводит к значительному повышению эффективности использования топлива и увеличению пассажировместимости [5]. В прошлом

Таблица 3

Эксплуатационные свойства конструкционных материалов / Operational properties of structural materials

№	Материал	Удельная жесткость $E/\rho, g$, 10 ⁻³ Дж/кг	Удельная прочность $\sigma_B/\rho, g$, 10 ⁻³ Дж/кг.
1	Стекловолокно *	2,8	126,8
2	Стекловолокно **	2,7	72,6
3	Углеродное волокно высокопрочное*	13,9	138,9
4	Углеродное волокно высокопрочное**	10,3	95,9
5	Углепластик ВКУ-29	7,6	95,3
6	Борное волокно*	5,5	107,1
7	Борное волокно**	10,4	69,7
8	Мартенситно-старенная сталь	2,5	26,4
9	КМ системы Al-SiC (6092/SiC/17.5p)	3,9	15,8
10	Алюминий 7075	2,5	20,8
11	Титановый сплав Ti-6Al-4V	2,4	25,4

Примечание: * волокно без матрицы, ** волокно в эпоксидной матрице.

На сегодня, по статистике, отрасль композитных материалов является одной из самых перспективных направлений инвестиционной деятельности. С конца 2012 года на рынке композитных материалов лидирует Китай, он занимает 28% рынка, обогнав предыдущего лидера в этой сфере – США .

Несмотря на объективные трудности, имеющиеся в деле разработки и применения композиционных материалов в авиастроении, современная наука с уверенностью смотрит в будущее. Прилагаются все усилия для того, чтобы применение и производство композиционных материалов было качественно расширено и улучшено. Внедрение композиционных материалов в авиастроение позволяет радикально повысить прочность, надежность, безопасность и другие эксплуатационные характеристики воздушных судов – поскольку в них используются усиливающие элементы нитей, волокон, вкраплений более прочного материала, наномодифицирующих частиц [11, 12]. Эта технология позволяет получить элементы конструкций с заданными требованиями по самым разнообразным свойствам. Будущее авиастроения зависит от того, как будет проходить внедрение этих материалов и технологий в

производство в Украине и от слаженной работы науки и промышленности [13].

Научная новизна и практическая значимость

Показана история, проблемы и перспективы применения композиционных материалов в авиастроении, что привело к значительному снижению общего веса самолетов.

Использование композитов в авиастроении на основе стекловолокна или углеродного волокна позволит в 3...5 раз повысить эксплуатационные свойства изделий по сравнению с алюминием.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Дж Любин Справочник по композиционным материалам [Текст] / Дж Любин. – М.: Машиностроение, 1988. – 584с.

J. Lubin Spravochnyk po kompozytsyonnym materialam [Handbook of composites] - Moscow, Mechanical Engineering Publ., 1988, 584p.

2. Промышленные полимерные композиционные материалы [Текст] / под. ред. М.Ричардсон. М.: Химия, 1980. - 262с.

Promyshlennyye polymernyye kompozytsyonnyye materialy [Industrial polymer composite materials] / Ed. M.Richardson. Moscow, Chemistry Publ., 1980, 262p.

3. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы [Текст] / Ю.А. Михайлин. – СПб.: Профессия, 2006. – 624с.

Mihailin YA Termoustoychivyye polimery y polymernyye materialy [Thermostable polymers and polymeric materials] / YA Mihailin. - St. Petersburg .: Profession, 2006. - 624s.

4. Конструктивно-технологическое решение и несущая способность межступенного отсека ракеты-носителя "Циклон-4" из полимерных композиционных материалов [Текст] / А. М. Зиновьев, А.П.Кушнарв, А. В. Кондратьев // Авиационно-космическая техника и технология . - 2013. - № 3. - С.46–53.

Konstruktivno-tekhnologicheskoye resheniye y nesushchaya sposobnost' mezhstupennogo otseka rakety-nosytelya "Tsyklon-4" yz polymernyykh kompozytsyonnykh materialov [Structural and technological solutions and carrying capacity mezhstupennogo compartment rocket "Cyclone-4" polymer composite materials] / A. M. Zynov'ev, A.P.Kushnarev, A.V.Kondrat'ev // Avyatsyonno-kosmycheskaya tekhnika y tekhnologhiya [Aerospace engineering and Technology]. - 2013. - № 3. - P.46-53.

http://nbuv.gov.ua/j-pdf/aktit_2013_3_10.pdf

5. American Composites Manufacturers Association (ACMA)

<http://www.acmanet.org/>

6. Комиссар, О.Н. Композиционные материалы и технологии для аэрокосмической промышленности [Текст] / О.Н. Комиссар // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2013. -№4

Commissar, O.N. Kompozytsyonnyye materialy y tekhnologhiya dlya aerokosmycheskoy promyshlennosti [Composite materials and technology for the aerospace industry] / O.N. Komyssar // Novosty materialovedeniya.

Выводы

Таким образом, создание, изучение и использование композиционных материалов в авиастроении — чрезвычайно перспективная и бурно развивающаяся область современного материаловедения.

Такие материалы будут всегда требоваться для авиационной техники и с годами количество композиционных материалов, их номенклатура в авиастроении возрастет, что будет способствовать развитию этой отрасли материаловедения, а технологии композиционных материалов безвозвратно изменят авиационную индустрию.

Сейчас однозначно можно сказать, что за композитными материалами стоит целое будущее.

Nauka y tekhnika [News Materials. Science and Technology]. - 2013. -№4

<http://materialsnews.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/32.pdf>

7. Гайдачук, А. В. Концепция оптимизации конструкций из композиционных материалов с учетом экономической эффективности [Текст] / А.В. Гайдачук, А.В.Чесноков // Авиационно-космическая техника и технология . - 2012. - № 9. - С.93–98.

Gaydachuk, A.V. Kontseptsiya optymizatsyy konstruksyy yz kompozytsyonnykh materialov s uchetom ekonomycheskoy effektivnosti [Concept design optimization of composite materials based on economic efficiency] / A.V. Gaydachuk, A.V.Chesnokov // Avyatsyonno-kosmycheskaya tekhnika y tekhnologhiya [Aerospace engineering and Technology]. - 2012. - № 9. - P.93-98.

http://nbuv.gov.ua/j-pdf/aktit_2012_9_19.pdf

8. Субботин В.В. Опыт применения материалов производства ФГУП «ВИАМ» и PORCHER в конструкциях узлов и деталей авиационных силовых установок из полимерных композиционных материалов [Текст] / Субботин В.В., Гринев М.А. // Новости материаловедения. Наука и техника. - №5. - 2013. - С.1-7.

Subbotyn V.V. Opyt prymereniya materialov proizvodstva FHUP «VIAM» y PORCHER v konstruksyyakh uzlov y detaley avyatsyonnykh sylovykh ustanovok yz polymernyykh kompozytsyonnykh materialov [Experience in the use of materials produced by FSUE "VIAM" and PORCHER in the construction of units and parts of aircraft powerplants from polymeric composite materials] / Subbotyn V.V., Hrynev M.A. // Novosty materialovedeniya. Nauka y tekhnika – [News Materials. Science and Technology]. -№ 5. - 2013. - P.1-7.

<http://materialsnews.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/45.pdf>

9. В.В. Березовский Применение дисперсно-упрочненных металлических композиционных материалов на основе алюминиевого сплава, армированного частицами SiC в авиационной промышленности [Текст] // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2013. -№4

Berezovskyy V.V. Prymereniye dyspersno-uprochnnykh metall'ycheskykh kompozytsyonnykh materialov na osnove alyumynyevoho splava, armyrovannoho chastytsamy SiC v avyatsyonnoy promyshlennosti [The use of dispersion-strengthened metallic composite materials based on aluminum alloy reinforced with SiC particles in the aviation industry] / V.V. Berezovskyy // Novosty materialovedeniya. Nauka y tekhnika – [News Materials. Science and Technology]. -№ 4. - 2013.

<http://materialsnews.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/38.pdf>

10. Мелешко В.В. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты [Текст] / Мелешко А.И., Половников С.П. – М.: «САЙНС-ПРЕСС», 2007. – 192с.

Meleshko V.V. Ughlerod, ughlerodnyye volokna, ughlerodnyye kompozyty [Carbon, carbon fibers, carbon composites] / Meleshko A.Y., Polovnykov S.P. – Moscow, «SAYNS-PRESS», 2007. – 192p.

11. Гуняева, А.Г. Наномодифицированный углепластик ВКУ-18 на основе ткани «Porcher» для нагруженных элементов силового набора планер [Текст] / А.Г. Гуняева, О.А. Комарова // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2013. -№5

Hunyaeva A.H. Nanomodyfytsirovannyy ughleplastyk VKU-18 na osnove tkany «Porcher» dlya nahruzhennykh elementov sylovoho nabora planer [Carbon nano-modified plastics UWC-18 on the basis of tissue «Porcher» for loaded elements of the power set Glider] // Novosty materialovedeniya. Nauka y tekhnika – [News Materials. Science and Technology]. - 2013. -№5

<http://materialsnews.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/47.pdf>

12. Наноструктурные металлокерамомагричные и интеркерамические композиционные материалы для перспективных изделий авиационной техники [Текст] / Д.А. Климов, В.Е. Низовцев, О.В. Низовцева,

А.Д.Бортников // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2013. -№4

Nanostrukturnyye metallokeramomatrychnyye y untkeramicheskiye kompozytsyonnyye materialy dlya perspektyvnykh yzdelyy avyatsyonnoy tekhniky [Nanostructured metal-keramomatrychnyye interkeramicheskiye and composite materials for advanced aviation technology products] / D.A. Klymov, V.E. Nyzovtsev, O.V. Nyzovtseva, A.D.Bortnykov // Novosty materialovedeniya. Nauka y tekhnika – [News Materials. Science and Technology]. - 2013. -№4

<http://materialsnews.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/35.pdf>

13. Предпосылки для полного цикла производства углерод-углеродных композиционных материалов в Украине [Текст] / А. В. Гайдачук, А. В. Чесноков, И. В. Гурин, А. М. Потапов // Авиационно-космическая техника и технология . - 2013. - № 2. - С. 4–13.

Predposylky dlya polnoho tsykla proyzvodstva ughlerod-ughlerodnykh kompozytsyonnykh materialov v Ukrainy [Prerequisites for a full cycle of carbon-carbon composite materials in Ukraine] / A.V. Haydachuk, A. V. Chesnokov, Y. V. Huryn, A. M. Potapov // Avyatsyonno-kosmycheskaya tekhnika y tekhnolohiya [Aerospace engineering and Technology]. - 2013. - № 2. - P.4-13.

http://nbuv.gov.ua/j-pdf/aktit_2013_2_3.pdf

Статья рекомендована к публикации д-ром. техн. наук, проф. А. А. Митяевым (Украина); д-ром. техн. наук, проф. А. Я. Качаном (Украина)

Поступила в редколлегию 24.03.2015

Принята к печати 24.03.2015