

**НАНОМОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОЛИМЕРНОГО СВЯЗУЮЩЕГО
С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**Г. Г. Крушенко^{1, 2*}, О. А. Исева²¹Институт вычислительного моделирования СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: genry@icm.krasn.ru

Одной из проблем космического машиностроения является снижение массы деталей, узлов и механизмов как собственно космического аппарата, так и средств доставки его на орбиту, т. е. ракеты-носителя. Прогрессивным решением этой проблемы является применение так называемых сетчатых (анизогридных – anisogrid) конструкций. В настоящее время сетчатые конструкции, материалом для которых является углепластик, широко применяются в космической технике для изготовления различных пустотелых трубчатых и конических конструкций космических аппаратов. Наиболее распространенным способом изготовления углепластиковых сетчатых конструкций является их намотка из углеродных волокон. Однако при всех положительных качествах углепластиковых конструкций, в связи с однонаправленностью их структуры, их эффективное использование возможно только при одноосном нагружении, когда растягивающие и сжимающие напряжения совпадают с направлением волокон. В случае сложного сопротивления или изгиба, когда в материале возникает сложное напряженное состояние, могут произойти разрушения как от действия скалывающих касательных напряжений, так и от нормальных напряжений. Строгая ориентация волокон в одном направлении обуславливает анизотропию физико-механических свойств однонаправленных композитов. При нагрузке, приложенной нормально к направлению волокон, происходит разрушение углепластиковой конструкции практически без ее предварительной пластической деформации. Проблема повышения механических свойств углепластиковых материалов успешно решается в результате введения в полимерное связующее нанопорошков различных химических соединений. Этот процесс называется наномодифицированием. Причем в этом плане наиболее эффективным оказались углеродные нанопорошки, включая нанодIAMАЗЫ.

Ключевые слова: космические аппараты, снижение массы, наномодифицирование полимерного связующего.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 651–657

**NANO MODIFICATION OF POLYMER BINDER
WITH THE AIM OF IMPROVING THE PROPERTIES OF CARBON FIBRE MATERIALS**G. G. Krushenko^{1, 2*}, O. A. Iseeva²¹Institute of Computational Modeling SB RAS

50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: genry@icm.krasn.ru

One of the problems in space engineering is the reduction of masses parts, assemblies and mechanisms as the actual spacecraft, and the means to deliver it to the orbit, i. e. booster. Progressive solution of this problem is the use of so-called net (anisogrid) structures. And currently mesh structure, the material for which is carbon fiber, are widely used in space technology for the manufacture of hollow tubular and conical designs of the spacecraft. The most common method of making carbon mesh designs is the winding of carbon fibers. However, with all the positive qualities of CFRP structures, in connection with the pointedness of their structure, and their effective use is possible only under uniaxial loading when tensile and compressive stresses coincide with the fiber direction. In the case of complex resistance or bending when the material occurs in the complex stress state can cause the destruction, as from the action of shear stresses and normal stresses. Strict fiber orientation in one direction leads to anisotropy of physical and mechanical properties of unidirectional composites. When the load applied normal to the direction of the fibers is destroyed by carbon fiber construction practically without preliminary plastic deformation. The problem of improving the mechanical properties of the CFRP materials was successfully solved by introducing in the polymer binder nanopowders of different chemical compounds – a process called nanomodification. And, in this regard, the most effective was the carbon nanopowders, including nanodiamonds.

Keywords: space vehicles, weight reduction, nanomodification polymer binder.

Введение. Одной из важных проблем космического машиностроения является максимально возможное снижение массы как собственно космического аппарата (КА) [1], так и средств доставки его на орбиту, т. е. ракеты-носителя (РН) [2]. При этом при изготовлении различных деталей и узлов КА и РН решение этой проблемы может реализовываться как через изменение их конструкции, так и в результате применения новых материалов и технологий.

Одним из прогрессивных решений этой проблемы явилось применение так называемых сетчатых (анизотридных – *anisogrid*, *anisotropic grid*; анизотропия – от греч. *ánisos* – «неравный» и *trópo* – «направление») конструкций, применением которых в авиастроении одним из первых начал заниматься В. В. Васильев [3]. И настоящее время сетчатые конструкции, материалом для которых является углепластик, широко применяются в космической технике [4] для изготовления различных пустотелых трубчатых и конических конструкций КА. Одна из таких конструкций – адаптер, обеспечивающий механическое соединение космического аппарата с ракетой-носителем, показана на рис. 1.

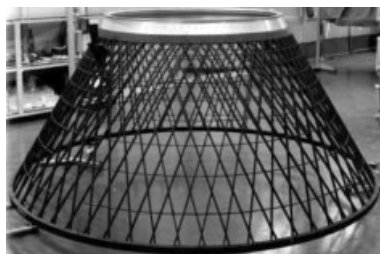


Рис. 1. Сетчатый адаптер [4]

Fig. 1. Netted adapter circuit [4]

В настоящее время распространенным способом изготовления углепластиковых сетчатых конструкций является их намотка из углеродных волокон [5]. В частности, адаптер РН «Протон-М» изготавливался намоткой ленты, состоящей из пропитанных эпоксидным связующим углеродных жгутов, на коническую оправку, покрытую эластичным материалом [4] (рис. 2).

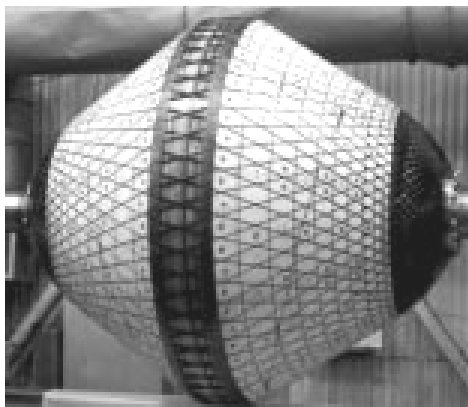


Рис. 2. Намотка двух адаптеров полезной нагрузки для ракеты-носителя «Протон-М» [4]

Fig. 2. Spinning of two adapter circuits of net load for the booster “Proton-M” [4]

Однако при всех положительных качествах углепластиковых конструкций, в связи с однонаправленностью их структуры, их эффективное использование возможно только при одноосном нагружении, когда растягивающие и сжимающие напряжения совпадают с направлением волокон [6]. В случае сложного сопротивления или изгиба, когда в материале возникает сложное напряженное состояние, могут произойти разрушения как от действия скалывающих касательных напряжений, так и от нормальных напряжений [7]. Строгая ориентация волокон в одном направлении обуславливает анизотропию физико-механических свойств однонаправленных композитов. При нагрузке, приложенной нормально к направлению волокон, происходит разрушение углепластиковой конструкции практически без ее предварительной пластической деформации, что показано, например, на рис. 3.

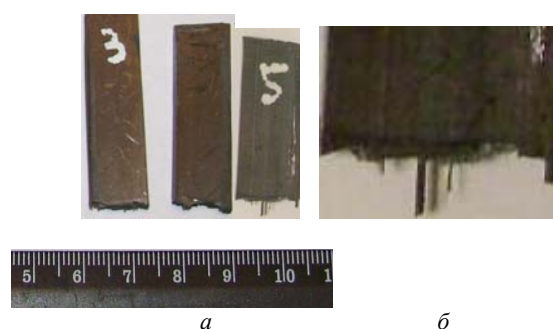


Рис. 3. Фрагменты углепластиковой конструкции адаптера (а); в нижней части образца № 5 видны волокна (б)

Fig. 3. The segment of carbon construction of adapter circuit (а); at the bottom the sample № 5 we can see threads (б)

Наномодифицирование. С целью повышения функциональных возможностей углепластиковых конструкций представляется возможным использовать результаты исследований [8], полученные при введении в протекторную резину материалов, относящихся к эластомерам, как и эпоксидные материалы, применяющиеся в качестве связующих при производстве углепластиков, нанопорошка природного графита. Работа была выполнена с целью установления возможности замены в составе протекторных резин, применяющихся при производстве грузовых шин, технического углерода – дорогостоящего продукта, получение которого технологически сложно, кроме того, это связано с ухудшением экологической обстановки.

Исходя из свойств природного скрытокристаллического графита Курейского месторождения [9] и учитывая присутствие в нем до 4 мас. % золы, содержащей различные окислы, в том числе металлов (28,38 % SiO_2 ; 14,57 % Fe_2O_3 ; 26,77 % CaO ; 0,06 % P_2O_5 ; 0,82 % TiO_2 ; 0,353 % MnO ; 1,41 % Na_2O ; 21,43 % Al_2O_3 ; 5,32 % MgO ; 0,25 % K_2O) [10], было решено опробовать его в рецептуре таких протекторных резин, в которых они выполняют активную роль в процессе структурирования каучука. Следует при этом отметить, что использование для этой цели природного графита экономически выгоднее, чем синтетического углерода, так как

последний производится на специализированных заводах, тогда как курейский графит добывается открытым способом, а для его применения в резинах требуется только произвести измельчение, в связи с чем себестоимость графитовых наполнителей оказалась на 25–30 % ниже, чем для синтетического углерода.

С этой целью была разработана технология измельчения графита [11], при которой кусочки руды с размерами порядка 10 мм измельчали вначале в щековой мельнице до размеров частиц менее 0,1 мм с удельной поверхностью до 6 м²/г, дальнейшее измельчение производили в центробежно-планетарной мельнице при ускорении 40 g. При этом были подобраны, количественно оптимизированы и интеркалированы в межплоскостное пространство графитовых сеток соответствующие детергенты, которые в процессе обработки позволили разрушить графит, практически не разрушая графитовые сетки. Такое диспергирование графита не приводит к появлению низкомолекулярных соединений со свойствами смол или асфальтентов и поэтому только увеличивает удельную поверхность до 60–80 м²/г при получении частиц графита размером около 50 нм с содержанием углерода до 91,6 мас. %. Измельчение с применением центробежно-планетарной мельницы сводится не только к диспергированию, но и к механоактивации измельчаемых частиц, что повышает их энергонасыщенность [12] в результате накопления структурных дефектов, увеличения кривизны поверхности и даже аморфизации кристаллов (в данном случае графита), что усиливает их химическую активность [13], а при использовании в изделиях – улучшает их физико-механические и, как следствие, эксплуатационные характеристики.

Полученный графитовый нанопорошок (НП) в количестве 5 мас. % вводили в состав «резиновой смеси» (каучук, технический углерод, кремниевая кислота, сера, масла и смолы, вулканизационные активаторы – до 20-ти компонентов по ГОСТ 5513–97) взамен технического углерода и выполняли все технологические операции, связанные с производством протекторных резин, в результате чего получали резину, характеристики которой превышали таковые для обычной резины (см. таблицу). Причем присутствующие в объеме резины наночастицы углерода не только приводят к ее упрочнению [14], но и вследствие того, что важнейшей особенностью ультрадисперсных систем является их исключительно развитая поверхность, вблизи которой находится значительная доля атомов [15], наночастицы вносят определенный антивибрационный вклад за счет уменьшения амплитуды колебаний в результате возникновения эффекта трения на их поверхностях.

Полученные данные показывают, что введение НП графита в протекторные резины способствует снижению теплообразования и обеспечивает существенное повышение усталостной выносливости в различных режимах деформации. Этот факт следует рассматривать как имеющий большое практическое значение, поскольку упругогистерезисные и усталостные свойства резин во многом определяют эксплуатационные характеристики пневматических шин. Кроме того, эти результаты подтвердили теоретические представления о механизме влияния природного графита на свойства резины.

Следует отметить, что эти результаты совпадают на качественном уровне с данными, опубликованными известной в области производства и применения нанопорошков фирмой NaBond Technologies Co., Ltd. HONG KONG (納邦技術有限公司) [16], согласно которым в результате введения в резину нанопорошка кабида кремния SiC повышаются эксплуатационные характеристики изготавливаемых из нее изделий, а также с данными работы [17], в которой описаны положительные эффекты от введения наночастиц оксида алюминия в металлорезиновые композиты, используемые для изготовления тормозных колодок, эксплуатация которых проходит в жестких условиях, включая вибрацию.

Увеличение прочностных характеристик пластмассы в 3–4 раза было получено [18] при введении в нее двуокиси кремния SiO₂ с размерами частиц до 50 нм, в результате того, что плавящаяся пластмасса заполняет мельчайшие пустоты в наночастицах, что создает прочные связи между атомами SiO₂ и пластмассой на большой площади поверхности. И нагрузка, воздействующая на нанопластмассу, делится в ее объеме на множество взаимодействий с наночастицами SiO₂. По мере продвижения трещины в композите она дробится на все меньшие и меньшие трещинки, пока материал не поглотит (рассеет – dissipated) энергию нагрузки. Авторы назвали разработанный способ синергетическим упрочнением, или наномасштабным упрочнением. Разработанная нанопластмасса показала такую же теплостойкость, как и пластмассы с графитовыми волокнами, но выдерживала ударные нагрузки в 4–5 раз больше.

В свете изложенного, следует согласиться с авторами работы [19], которые считают, что перспективным решением проблемы получения углепластиков с повышенными характеристиками является создание углепластиков со связующим, в объеме которого равномерно распределены ультрадисперсные углеродные частицы.

Влияние НП графита на свойства протекторных резин

Показатель	Резиновая смесь	
	Стандартный состав	С добавкой 5 мас. ч. нанопорошка графита
Условное напряжение при 300%-м удлинении, МПа	9,2	10,1
Условная прочность при растяжении, МПа	21,8	21,6
Соппротивление многократному растяжению, 1000 циклов	80	103
Соппротивление образованию трещин, 1000 циклов	219	283

Подобная технология применяется при изготовлении углепластиковых конструкций в АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения» (г. Хотьково) – ведущем предприятии России по производству конструкций из современных полимерных композитных материалов для ракетно-космической техники. Анализ и сопоставление данных различных экспериментов показал [19], что все типы исследуемых частиц эффективно влияют на трещиностойкость (критический коэффициент интенсивности напряжений возрастает в 1,5–2 раза) эпоксидной матрицы. Но при этом в зависимости от дисперсности частиц основными являются различные структурные механизмы. Для более крупных частиц (размер агрегатов от 60 до 100 нм) основным является механизм задержки фронта трещины прилегающими к агрегатам структурированными областями полимера (рис. 4). Для более мелких частиц преобладает механизм сопротивления образованию трещин на счет снижения дефектности и неоднородности эпоксидной матрицы.

При исследовании полимерных материалов, содержащих ультрадисперсные углеродные частицы (УДЧ), было замечено [20], что путь движения трещины в композите с малыми включениями требует больших затрат энергии. УДЧ не являются концентраторами напряжений в отличие от более крупных частиц; введение УДЧ приводит к упорядочению морфологической структуры полимера. Они также могут служить в качестве центров сшивки полимерной сетки (т. е. способны залечивать дефекты сетки), могут агломерировать, образуя пространственный каркас в объеме полимерного композиционного материала. Модифицирующая способность углеродных УДЧ обусловлена их большими энергетическим потенциалом [21], который связан с высокой концентрацией атомов на поверхности частицы (по сравнению с концентрацией

в объеме), большой удельной поверхностью однонаправленного углепластика на его основе. Для модифицированной матрицы наблюдается смена механизма разрушения при ударном воздействии с хрупкого до псевдопластичного, который обусловлен образованием фрактала структурной поврежденности. Исследования показали [19], что введение алмазографитных частиц приводит к росту адгезии связующего к волокну, что отражается на смене механизма разрушения однонаправленных образцов при растяжении и сдвиге (рис. 5).

Повышение функциональных возможностей углепластиковых конструкций успешно решается с помощью наномодифицирования полимерного связующего путем введения в него углеродных нанотрубок или наночастиц, включая и детонационные наноалмазы [22; 23], а также фуллеренов. В работе [24] установлено, что при модифицировании полимерной матрицы фуллеренами предел прочности углепластика при сжатии повышается на 31 %, а предел прочности при растяжении – на 10 %, что связано с повышением вязкости разрушения матрицы, в результате чего снижается вероятность образования в ней хрупкой трещины, и образующиеся при нагружении образцов трещины не распространяются прямолинейно, а проходят волнообразно.

Алюминиевые профили с волокнистой структурой. Возможен еще один вариант изготовления сетчатых пустотелых конструкций с применением протяженных профилей с волокнистым внутренним строением (рис. 6), которые получают путем прессования композиции из частиц алюминиевого сплава и нанопорошков химических соединений (нитриды, оксиды, карбиды и др.) [25]. Полученные таким способом профили имели тонкостенную оболочку (десятые доли мм) и внутреннее волокнистое строение, а их сечение определялось геометрией фильеры.

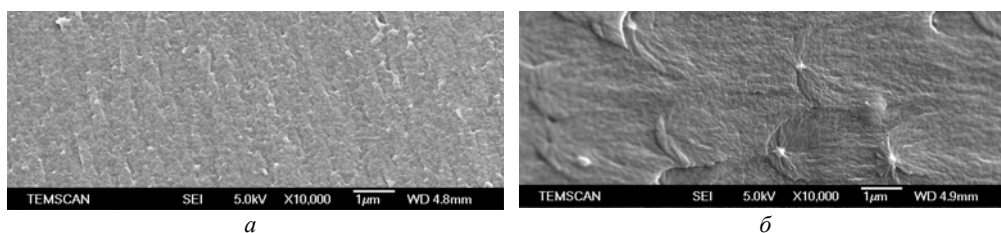


Рис. 4. Поверхность разрушения немодифицированного эпоксидного связующего (а) и модифицированного ультрадисперсными частицами 0,025 % УДП-АГ ($\times 10000$) (б) [19]

Fig. 4. The surface of destruction of intact epoxide binders (a) and modified ultrafine particles, 0.025 % UDP-AG ($\times 10000$) (b) [19]

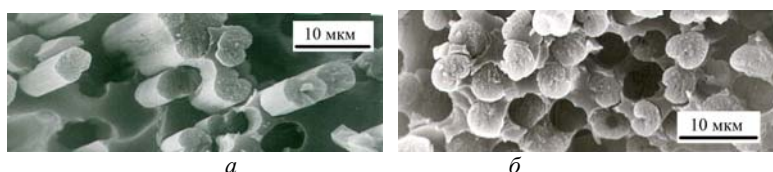


Рис. 5. Поверхность разрушения однонаправленного углепластика без модификации (а) и модифицированного АДП-АГ (б) [19]

Fig. 5. The surface of destruction of UD carbon without design change (a) and modified UDP-AG (b) [19]

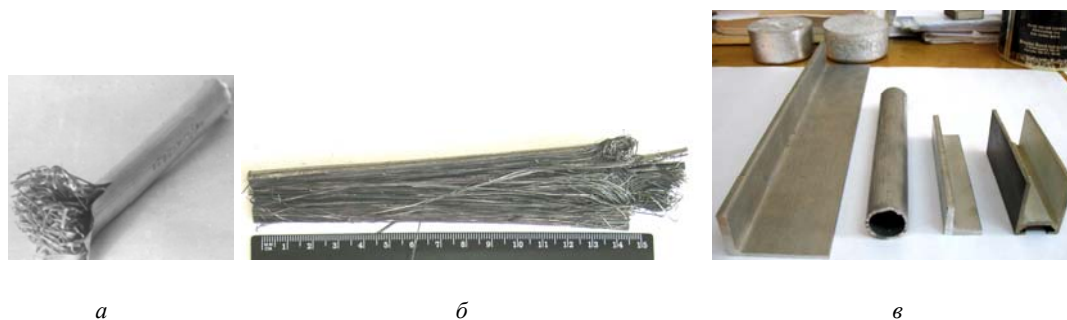


Рис. 6. Волокнистый пруток $\varnothing 9,5$ мм со вспоротой оболочкой (а, б); профили (для сравнения, на заднем плане литые пробы $\varnothing 72$ мм) (в)

Fig. 6. Fibrous bar stock $\varnothing 9,5$ m with cut open cover (a; б); the forms (on the background for comparison the molded tests $\varnothing 72$ mm are given) (в)

Механические свойства прутка $\varnothing 9,5$ мм с волокнистой структурой, отпрессованного из гранул алюминиевого сплава АД0, составляют: $\sigma_b = 98,1$ МПа, $\sigma_{0,2} = 48,1$ МПа и $\delta = 42,8$ мм, тогда как при его прессовании из смеси таких же гранул + НП ВН σ_b повышается до 113,8 МПа (на 16,0 %), $\sigma_{0,2}$ – до 56,9 МПа (на 18,3 %) и δ – до 43,2 (на 0,9 %), а из гранул и НП TiCN – σ_b повышается до 121,6 МПа (на 24,0 %), $\sigma_{0,2}$ – до 59,9 МПа (на 22,5 %) и δ – до 43,9 (на 2,6 %). Испытания при поперечном знакопеременном изгибе от вертикали в обе стороны на 90° прутков $\varnothing 5$ мм из того же сплава показали, что для их полного разрушения в месте закрепления требуется 9–11 циклов, тогда как прутки, отпрессованные из гранул и НП TiCN, разрушаются через 18–20 циклов. Высокая пластичность волокнистых профилей демонстрируется на рис. 7. В настоящее время разрабатывается техническая документация на изготовление сетчатых конструкций из профилей с волокнистой структурой.



Рис. 7. Изгиб прутка $\varnothing 5$ мм с волокнистой структурой

Fig. 7. The bar stock bend $\varnothing 5$ mm with fibrous structure

Выводы и заключение. В результате рассмотрения технологий производства пустотелых конструкций летательных аппаратов установлены те или иные особенности применения для этой цели пенометаллов и углепластиков и рассмотрена возможность применения для этой цели профилей с волокнистой структурой, полученных методом экструзии композиции, состоящей из пластичного металла (на примере алюминия или алюминиевых деформируемых сплавов) и нанопорошков высокопрочных химических соединений (нитриды, оксиды, карбиды и др.).

Библиографические ссылки

1. Доматырко Д. Г., Литвиненко В. П. Оптимизация массогабаритных характеристик космических аппаратов двойного назначения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7, № 7. С. 41–42.
2. Kishore N. P., Alekhya N. Reduction of mass for base structure of a spacecraft using CFRP // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2015. Vol. 4, iss. 8. P. 7237–7243.
3. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
4. Anisogrid composite lattice structures – Development and aerospace applications / V. V. Vasiliev [et al.] // Composite Structures. 2012. Vol. 94, iss. 3. P. 1117–1127.
5. Комков М. А., Тарасов В. А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 431 с.
6. Выбор оптимальной конфигурации при проектировании анизогридной конструкции / О. А. Исева [и др.] // Решетневские чтения: материалы XX юбилейной Междунар. науч.-практ. конф. / СибГАУ. Красноярск, 2016. Ч. 1. С. 30–32.
7. Generalov A. S., Boychuk A. S., Murashov V. V. Ultrasonic strength monitoring of carbon-fiber-reinforced plastics based on adhesive prepreps // Polymer Science. Series D. 2013. Vol. 6, № 2. P. 143–147.
8. Опыт использования ультрадисперсного порошка природного скрытокристаллического графита в протекторных резинах / В. А. Полубояров [и др.] // Ультрадисперсные порошки, материалы и наноструктуры: материалы межрегион. конф. / КГТУ. Красноярск, 1996. С. 155–156.
9. Обогащение графитовой руды Курейского месторождения / О. М. Смирнов [и др.] // Обогащение руд. 1999. № 1–2. С. 19–22.
10. Mineralogical and chemical analysis of graphite from Siberia // Short Report № MPSR/92/18. London: British Geological Survey, 1992. 4 p.
11. Новые возможности использования графитовой руды Курейского месторождения / Г. Г. Крушенко [и др.] // Обогащение руд. 1999. № 5. С. 7–8.

12. Болдырев В. В. Механохимия и механическая активация твердых веществ // *Успехи химии*. 2006. Т. 75, № 3. С. 203–216.
13. Butyagin P. Yu., Pavlichev I. K. Determination of energy yield mechanochemical reactions // *Reactivity of Solids*. 1986. Vol. 1, iss. 4. P. 361–372.
14. Упрочнение металлических, полимерных и эластомерных материалов ультрадисперсными порошками плазмохимического синтеза / М. Ф. Жуков [и др.]. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние РАН, 1999. 312 с.
15. Зубов В. И. Об особенностях термодинамики ультрадисперсных систем. Физикохимия ультрадисперсных систем : материалы IV Всерос. конф. М. : МИФИ, 1998. С. 23–26.
16. NaBond Technologies Co., Ltd. HONG KONG (納邦技術有限公司) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nabond.com/contact.htm> (дата обращения: 16.05.2017).
17. Effects of epoxidized natural rubber–alumina nanoparticles (ENRAN) composites in semi-metallic brake friction materials / A. Almaslow [et al.] (April–May 2013). Vol. 302, iss. 1–2. P. 1392–1396.
18. Toughening at nanoscale makes plastics suitable for aircraft use // *Materials Today*. 2000. Iss. 3. P. 8.
19. Ананьева Е. С., Маркин В. Б. Перспективы применения углепластиков комбинированного наполнения в авиакосмической технике // *Ползуновский вестник*. 2009. № 4. С. 223–226.
20. Структурные механизмы формирования механических свойств зернистых полимерных композитов / В. В. Мошев [и др.]. Екатеринбург : УрО РАН, 1997. 508 с.
21. Physical and chemical properties of modified nanodiamonds / A. P. Puzyr [et al.] // *Syntheses, Properties and Applications of Ultrananocrystalline: NATO Science. Series II. Mathematics, Physics and Chemistry*. 2005. Vol. 192. P. 261–270.
22. Гуняев Г. М., Каблов Е. Н., Алексашин В. М. Модифицирование конструкционных углепластиков углеродными наночастицами // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV, № 1. С. 5–8.
23. Новиковский Е. А., Ананьева Е. С. Особенности реализации технологического процесса модификации эпоксидных компаундов углеродными нанотрубками и ультрадисперсными частицами // *Ползуновский вестник*. 2016. № 1. С. 102–107.
24. Думанский А. М. Проблемы материаловедения в машиностроении. М. : Ижевск : Ин-т компьютерных исследований, 2015. 52 с.
25. Крушенко Г. Г. Многоцелевой алюминиевый композит // *Технология металлов*. 2011. № 12. С. 19–22.
- Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2015, Vol. 4, Iss. 8, P. 7237–7243.
3. Vasil'ev V. V. *Mekhanika konstruktivnykh kompozitnykh materialov*. [Mechanics of structures of composite materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, 272 p.
4. Vasiliev V. V., Barynin V. A., Razin A. F. et al. Anisogrid composite lattice structures – Development and aerospace applications. *Composite Structures*. 2012, Vol. 94, Iss. 3, P. 1117–1127.
5. Komkov M. A., Tarasov V. A. *Tekhnologiya namotki kompozitnykh konstruktivnykh raket i sredstv porazheniya* [The technology of filament winding composite structures of missiles and weapons]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman Publ., 2011, 431 p.
6. Iseeva O. A., Kravchenko Yu. S., Savitskiy V. V. et al. [Selection of the optimal configuration in the design anisogrid design]. *Reshetnevskie chteniya: materialy XX Yubileynoy mezhdunar. nauchno.-praktich. Konf.* [Reshetnev readings: proceedings of the twentieth Anniversary of the international. scientific.-practical. conf.]. 2016, Krasnoyarsk, SibSAU Publ., P. 30–32 (In Russ.).
7. Generalov A. S., Boychuk A. S., Murashov V. V. Ultrasonic strength monitoring of carbon-fiber-reinforced plastics based on adhesive prepreps. *Polymer Science. Series D*. 2013, Vol. 6, No. 2, P. 143–147.
8. Poluboyarov V. A., Krushenko G. G., Cherepanov A. N. et al. [Experience in the use of ultrafine powder of natural cryptocrystalline graphite in tread rubbers]. *Ul'tradispersnye poroshki, materialy i nanostruktury: Materialy mezhregion. konf.* [Ultradispersed powders, materials and nanostructures: Materials interregion. conf.]. Krasnoyarsk, KGTU Publ., 1996, P. 155–156 (In Russ.).
9. Smirnov O. M., Krushenko G. G., Shchipko M. L. et al. [Beneficiation of graphite ore deposits of Kureiskaya deposit]. *Obogashchenie rud*. 1999, No 1–2, P. 19–22 (In Russ.).
10. Mineralogical and chemical analysis of graphite from Siberia. Short Report № MPSR/92/18. London : British Geological Survey, 1992, 4 p.
11. Krushenko G. G., Shchipko M. L., Goncharov V. M. et al. [New uses for graphite ore deposits of Kureiskaya]. *Obogashchenie rud*. 1999, No 5, P. 7–8 (In Russ.).
12. Boldyrev V. V. [Mechanochemistry and mechanical activation of solids]. *Uspekhi khimii*. 2006, Vol. 75, No. 3, P. 203–216 (In Russ.).
13. Butyagin P. Yu., Pavlichev I. K. Determination of energy yield mechanochemical reactions. *Reactivity of Solids*. 1986, Vol. 1, Iss. 4, P. 361–372.
14. Zhukov M. F., Cherskiy I. N., Krushenko G. G. et al. *Uprochnenie metallicheskih, polimernykh i elastomernykh materialov ul'tradispersnymi poroshkami plazmokhimicheskogo sinteza*. [Strengthening of metallic, polymeric and elastomeric materials of ultradispersed powders plasma chemical synthesis]. Novosibirsk, Nauka, Sibirskoe predpriyatie RAN Publ., 312 p.
15. Zubov V. I. [About the features of the thermodynamics of ultradispersed systems]. *Fizikokhimiya ul'tradispersnykh sistem: Materialy IV Vseros. Konf.* [Physicochemistry of ultradisperse systems: materials of the IV Vseros. conf.]. Moscow, MIFI Publ., 1998, P. 23–26 (In Russ.).

References

1. Domatyрко D. G., Litvinenko V.P. [Optimization of weight and size characteristics of space vehicles of double purpose]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011, Vol. 5, No. 7, P. 41–42 (In Russ.).
2. Kishore N. P., Alekhya N. Reduction of mass for base structure of a spacecraft using CFRP. *International*

16. NaBond Technologies Co., Ltd. HONG KONG (also known as 納邦技術有限公司) Available at: <http://www.nabond.com/contact.htm> (accessed 16.05.2017).
17. Almaslow A., Ratnam C. T., Ghazali M. J. et al. Effects of epoxidized natural rubber–alumina nanoparticles (ENRAN) composites in semi-metallic brake friction materials. *Wear*. April–May 2013, Vol. 302, Iss. 1–2, P. 1392–1396.
18. Toughening at nanoscale makes plastics suitable for aircraft use. *Materials Today*. 2000, Iss. 3, P. 8.
19. Anan'eva E. S., Markin V. B. [Perspectives of application of carbon fiber reinforced plastics combined filling in aerospace engineering]. *Polzunovskiy vestnik*. 2009, No. 4, P. 223–226 (In Russ.).
20. Moshev V. V., Svistkov A. L., Garishin O. K. et al. *Strukturnye mekhanizmy formirovaniya mekhanicheskikh svoystv zernistykh polimernykh kompozitov* [Structural mechanisms of the formation of mechanical properties of granular polymer composites]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 1997, 508 p.
21. Puzyr A. P., Bondar V. S., Bukayemsky A. A., Seylutin G. E., Kargin V. F. Physical and chemical properties of modified nanodiamonds. In: *Syntheses, Properties and Applications of Ultrananocrystalline*. NATO Science Series. II. Mathematics, Physics and Chemistry, Springer. Kluwer Academic Publishers B. V., 2005, Vol. 192, P. 261–270.
22. Gunyaev G. M., Kablov E. N., Aleksashin V. M. [Modification of constructional carbon nanoparticles]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*. 2010, Vol. LIV, No. 1, P. 5–8 (In Russ.).
23. Novikovskiy E. A., Anan'eva E. S. [Features of realization of technological process of modification of epoxy resins by carbon nanotubes and ultrafine particles]. *Polzunovskiy vestnik*. 2016, No. 1, P. 102–107 (In Russ.).
24. Dumanskiy A. M. *Problemy materialovedeniya v mashinostroenii*. [Problems of material science in mechanical engineering]. Moscow-Izhevsk, Institut komp'yuternykh issledovaniy Publ., 2015, 52 p.
25. Krushenko G. G. [Multi-purpose aluminum composite]. *Tekhnologiya metallov*. 2011, No. 12, P. 19–22 (In Russ.).

© Крушенко Г. Г., Исеева О. А., 2017