

## **ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕПЛАСТИКОВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ\***

Молчанов Е.С.<sup>1</sup>, Юдин В.Е.<sup>2</sup>, Кыдралиева К.А.<sup>1</sup>, Ваганов Г.В.<sup>2</sup>, Иванькова Е.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Московский авиационный институт (Национальный  
исследовательский университет), г. Москва, Россия

<sup>2</sup>ФГБУН Институт высокомолекулярных соединений РАН, г. Санкт-Петербург,  
Россия

### **АННОТАЦИЯ**

Системы космических аппаратов, высотных самолетов, детали и узлы транспортных машин работают в условиях умеренного и глубокого охлаждения, поэтому применяемые для их изготовления конструкционные материалы должны обеспечивать надежную работу аппаратов, машин и механизмов в заданных температурных условиях. Настоящее исследование посвящено изучению влияния температуры на механические свойства углепластиков на основе эпоксидных порошковых композиций, модифицированных наночастицами различной структуры и морфологии.

В качестве добавок для эпоксидного связующего использовались силикатные наночастицы монтмориллонита и галлуазита, углеродные нановолокна и наноконусы. Получение наномодифицированного связующего проводилось методом экструдирования наночастиц в расплаве эпоксидного олигомера. Углепластики изготавливались из препрегов, полученных на основе наномодифицированного связующего и углеродной ткани методом электростатического напыления. Полученные образцы углепластиков испытывались на вязкость межслоевого разрушения и прочность при изгибе при комнатной температуре и в криогенных условиях (-50°C).

По результатам испытаний было установлено, что силикатные и углеродные наночастицы обладают разным характером взаимодействия с полимерной матрицей, что, соответственно, влияет на механические свойства углепластиков. Так, введение 1% углеродных нановолокон и 1% углеродных наноконусов в эпоксидный олигомер увеличивает показатели трещиностойкости при комнатной температуре на 62% и 33% соответственно и в криогенных условиях (-50°C) – на 66% и 24% соответственно. Это связано с тем, что часть энергии разрушения связующего в углепластике расходуется на выдёрживание частиц из объема матрицы вследствие слабого адгезионного взаимодействия с полимером.

**Ключевые слова:** углепластик; эпоксидное связующее; электростатическое распыление; монтмориллонит; галлуазит; углеродные нановолокна и наноконусы; механические свойства

## **EFFECT OF VARIOUS NANOPARTICLES ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON PLASTICS AT LOW TEMPERATURES**

Molchanov E.S.<sup>1</sup>, Yudin V.E.<sup>2</sup>, Kydraliev K.A.<sup>1</sup>, Vaganov G.V.<sup>2</sup>, Ivan'kova E.M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки (грант 14.Z50.31.0002, руководитель – проф. Х.-М. Кенни).

<sup>2</sup>*Institute of Macromolecular Compounds, Russian academy of sciences,  
Saint-Petersburg, Russia*

### ABSTRACT

Space craft and high-altitude aircraft systems, transport machine parts (and nodes) work in the conditions of normal and deep cooling. Therefore constructional materials used for their fabrication should to ensure reliable work of apparatus, machines and mechanisms in given temperature regimes. This study is aimed to study influence of temperature on mechanical properties of carbon plastics based in epoxy powder compositions, which are modified by nanoparticles with various morphology and structure.

Silicate nanoparticles of montmorillonite and halloysite, carbon nanofibers and nanocones were used as nanocontainers as the epoxy binders. The preparation of the nanomodified binder was carried out by extruding nanoparticles in the melt of an epoxy oligomer. Carbon plastics were produced from prepregs formulated on the basis of nanomodified binder and carbon fabric by electrostatic spraying. The formulated samples of carbon plastics were tested for interlayer fracture toughness and bending strength at room temperature and in cryogenic conditions (-50°C).

According to the testing results it was found that the silicate and carbon nanoparticles have a different character of interaction with the polymer matrix, which, accordingly, affects the mechanical properties of the carbon plastics. Thus, the addition of 1% of carbon nanofiber and 1% of carbon nanocones in epoxy oligomer increases fracture resistance at room temperature by 62% and 33% respectively and in cryogenic conditions (-50°C) – by 66% and 24%, respectively. This is due to the fact that part of the binding energy of the binder in the carbon plastic is expended on the removal of particles from the matrix volume because of weak adhesive interaction with polymer.

**Keywords:** carbon fiber-reinforced plastic; epoxy binder; electrostatic spraying; montmorillonite; halloysite; graphitized carbon nanofibers; nanocones; mechanical properties

### ВВЕДЕНИЕ

Полимерные материалы, армированные углеродными волокнами, или углепластики (УП) представляют перспективное поколение конструкционных материалов для авиакосмической техники, автомобилестроения и других областей промышленности. Углеродные волокна обладают высоким модулем упругости, высокой прочностью и жесткостью, малым весом, невосприимчивостью к агрессивным средам [1]. Однако, существенным недостатком УП на основе термореактивных связующих являются невысокие значения трансверсальной и сдвиговой прочности, особенно при отрицательных температурах. Решениями этой проблемы может стать создание многокомпонентных материалов или композитов комбинированного наполнения, в которых непрерывное углеродное волокно сочетается с термореактивным связующим, в объеме которого равномерно распределены наночастицы [2].

Полимерные нанокомпозиты – это особый класс полимерных композиционных материалов. В качестве добавок к полимерной матрице в них используются как различные по химическому составу, так и по морфологии наночастицы [3]. Отличительной особенностью данных добавок, т.е. наночастиц является размер составляющих их элементов (частиц, пластин, волокон и т. д.), который преимущественно должен быть менее 100 нм (нанонаполнители) [4].

Свойства нанокомпозитов такого типа могут изменяться при очень малых изменениях концентрации наполнителя благодаря его большой удельной

поверхности и интенсивному межмолекулярному взаимодействию с полимером. Введение наноразмерных углеродных или силикатных частиц в полимерные связующие – эпоксидные [5] или полиимидные [6], помимо традиционного повышения упругих характеристик полимерной матрицы, приводит к повышению трещиностойкости таких материалов [7-10].

Механизмы повышения трещиностойкости и изменения механических характеристик УП при введении наночастиц (наномодификация) до конца не выяснены, что требует систематического исследования свойств УП с различными типами наночастиц, вводимых в полимерную матрицу.

Настоящее исследование посвящено изучению влияния температуры на механические свойства углепластиков на основе эпоксидных порошковых композиций, модифицированных наночастицами различной структуры и морфологии – силикатные наночастицы монтмориллонита и галлуазита, углеродные нановолокна и наноконусы. Выбор наночастиц монтмориллонита (ММТ) в качестве одной из добавок обусловлен высокой удельной поверхностью, высокой подвижностью и пластичностью слоистой структуры ММТ, что позволяет получать интеркалированные и эксфолиированные структуры. Уникальные свойства и структура галлуазита (ГТ), такие как многостенная структура подобная углеродным нанотрубкам, низкая токсичность, биосовместимость, доступные ресурсы и низкая стоимость позволяют рассматривать наночастицы галлуазита как альтернативу углеродным нанотрубкам для производства нанокпозиционных материалов. Углеродные добавки, такие как углеродные нановолокна (УНВ) и нанопластины или наноконусы (НК), являются некой альтернативой с точки зрения химической структуры алюмосиликатам ММТ и ГТ, но подобны им с точки зрения морфологии, то есть трубчатой и пластинчатой [11].

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В данной работе в качестве армирующего наполнителя композита была использована однонаправленная углеродная ткань PORCHER-43200 (PORCHER, Франция). В качестве матрицы углепластика использовалась твердая эпоксидная смола Epicote 1004 с молекулярной массой 1480, содержание эпоксидных групп 1100-1240 ммоль/кг (Resolution performance products, США). Отвердителем служил модифицированный дициандиамида (торговая марка Casamid 780, производство Thomas Swan, Великобритания).

В качестве добавок для эпоксидного связующего использовались наночастицы с различной морфологией и структурой (Табл.1).

Получение наномодифицированного связующего проводилось методом экструдирования, описанном в [11]. В частности, в твердый эпоксидный олигомер (ЭО) Epicote-1004 вводились порошки 0,5 масс.% ММТ; 3 масс.% ГТ, по 1 масс.%, УНВ и УНК соответственно. Оптимальные концентрации добавок предварительно определялись опытным путем по результатам механических испытаний [11]. Смесь ЭО и наночастиц перемешивалась в шаровой мельнице в течение 10 мин при комнатной температуре и 200 об/мин, затем порционно ~ 5,5 г загружалась в двух-шнековый микросмеситель (DSM Xplore, Голландия). Процесс перемешивания расплава ЭО с наночастицами протекал при 100°C и скорости вращения шнеков 200 об/мин в течение 5 мин, затем ЭО с диспергированными в нём наночастицами выгружался из микросмесителя.

Полученная масса после охлаждения до комнатной температуры измельчалась в шаровой мельнице до порошкообразного состояния.

Таблица 1.

## Наименование и характеристика наночастиц.

Наименование наночастиц	Морфология наночастиц	
	Форма частиц	Размер частиц, нм
Монтмориллонит (ММТ, Southern Clay Products. Inc., США)	Пластины	$l - 200 \times d - 1$ нм
Галлуазит (ГТ, NaturalNano Inc., США)	Трубки	$l - 15$ мкм, внешний $d - 50-70$ нм и внутренний $d - 10-30$ нм
Графитизированные углеродные нановолокна (УНВ, Showa Denko, Япония)	Цилиндр	$d \sim 150$ нм; $l \sim 10$ мкм
Углеродные наноконусы (УНК, n-TEC, Норвегия)	Конусы и диски	20% наноконусов ( $h - 0,3-0,8$ мкм, $d$ базы 1-2 мкм, толщина стенки 20-50 нм); 70% нанодисков ( $d 0,8-3$ мкм, толщина стенки 20-50 нм), 10% сажи

В полученную систему (ЭО+наночастицы) добавляли отвердитель Casamid 780 в количестве 1,6 мас.% от содержания ЭО и перемешивали предварительно в шаровой мельнице при комнатной температуре и средней скорости в течение 1 ч, далее в микросмесителе при 110°C в течение 3 мин. Полученный таким образом форполимер, модифицированный наночастицами, измельчали дополнительно в шаровой мельнице до порошкообразного состояния и просеивали через сито 160 мкм.

Получение заготовок из углеродной ткани для последующего нанесения на них порошкообразного связующего (ЭО с отвердителем и наночастицами), препрегов, а также образцов для испытания термомеханических свойств полученных образцов описано в [12].

Внешний вид образца для определения вязкости межслоевого разрушения (или критической скорости высвобождения энергии деформирования)  $G_{1C}$  приведен на рис.1.



Рис.1. Образец углепластика для испытания межслоевой вязкости разрушения.

Образцы углепластиков имеют характерные размеры:  $b \sim 15$  мм,  $L = 120$  мм,  $h \sim 1.5$  мм,  $l = 30$  мм ( $l$  – длина трещины, т.е. расстояние от ее вершины до оси приложения усилий). Образцы углепластиков испытывались на разрывной машине 1958У-10-1 (Россия) при комнатной температуре по методу «двойной консольной балки». Скорость нагружения образца за берега трещины 5 мм/мин.

Образцы для испытания на трехточечный изгиб представляли собой пластины толщиной  $\sim 1$  мм и шириной  $\sim 5$  мм. Расстояние между опорами 30 мм, скорость нагружения образца 5 мм/мин.

Испытания на прочность при изгибе ( $\sigma_b$ ) углепластиков проводили методом трехточечного изгиба на разрывной машине 1958У-10-1 при комнатной температуре. Испытания в криогенных условиях ( $-50^\circ\text{C}$ ) на вязкость межслоевого разрушения и прочность при изгибе проводились на разрывной машине 1958У-10-1 с использованием криокамеры, охлаждение в которой производилось жидким азотом.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Были изготовлены образцы углепластиков из препрегов, полученных на основе наномодифицированного связующего и углеродной ткани методом электростатического напыления. Углепластики испытывались на вязкость межслоевого разрушения и прочность при изгибе при комнатной температуре и в криогенных условиях ( $-50^\circ\text{C}$ ). В таблице 2 приведены результаты механических испытаний, наполненных наночастицами углепластиков при различных температурах – комнатной и отрицательной ( $-50^\circ\text{C}$ ).

Таблица 2.

Механические характеристики УП при различных температурах.

Образец	$G_{1c}$ , Дж/м <sup>2</sup>		Предел прочности $\sigma_b$ , МПа		$G'$ , ГПа
	Ткомн	$-50^\circ\text{C}$	Ткомн	$-50^\circ\text{C}$	
без частиц	1581±354	863± 52	571± 30	804±17	2,87
0,5%ММТ	1490±212	1115±93	553± 44	905±63	3,38
3%ГТ	1613±267	840±113	568± 40	1020±192	3,13
1%УНВ	2560±78	1432±81	678± 75	989±157	2,96
1%УНК	2105±226	1066±87	612± 85	1190±263	2,33

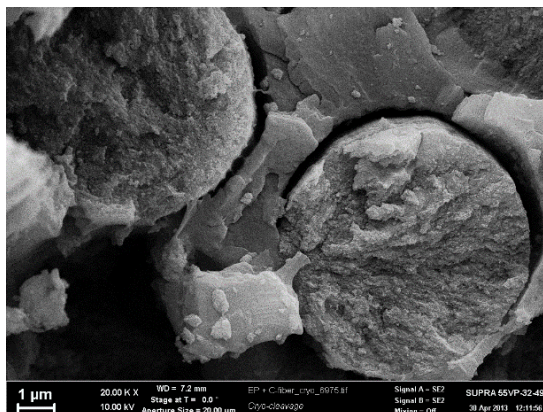
В случае введения наночастиц 1% УНВ и 1% УНК в ЭО наблюдается существенное увеличение показателей трещиностойкости при комнатной температуре на 62% и 33% соответственно. Введение 1% УНВ также увеличило предел прочности на 18%. Силикатные частицы не оказали значительного влияния на механические свойства УП при комнатной температуре. Вероятным объяснением этих результатов на данном этапе может быть значительное в сравнении с углеродными наночастицами охрупчивание эпоксидного связующего при введении в него силикатных наночастиц, которые в силу сильного адгезионного взаимодействия не препятствуют росту хрупких трещин в полимерной матрице [11].

Испытания при низких температурах УП с введенными наночастицами в связующее показали, что предел прочности возрастает у всех видов образцов, но, в то же время наблюдается существенное снижение трещиностойкости.

Так, значение  $G_{1c}$  нативного образца снизилось почти на 55%. Как видно из данных (таблица 2), введение 0,5% ММТ, 1% УНВ и 1% УНК позволяет сохранить высокие значения  $G_{1c}$ . В частности, введение 1% УНК увеличивает  $G_{1c}$  при (-50°C), относительно нативного образца, на 66%, введение 0,5% ММТ – на 29%, а введение 1% УНК – на 24%. Введение 3% ГТ и 1% УНК в связующее увеличивает значения предела прочности при этой температуре на 27 и 48 % соответственно.

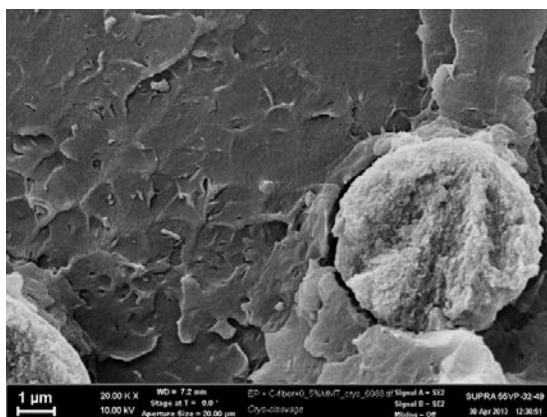
Тенденция в механическом поведении нанокompозитов, связанная с разным качеством взаимодействия эпоксидного полимера с углеродными или силикатными наночастицами, описанная согласно данным реологических испытаний в [11], распространяется в значительной степени и на УП на основе этих нанокompозитных связующих.

На рис.2-4 представлены электронно-микроскопические снимки поверхности сколов углепластиков. Можно отметить, что введение силикатных наночастиц изменило морфологию поверхности сколов исходной эпоксидной смолы (рис.2-3), на что указывает отсутствие трещин и видимых границ раздела наночастиц со связующим.

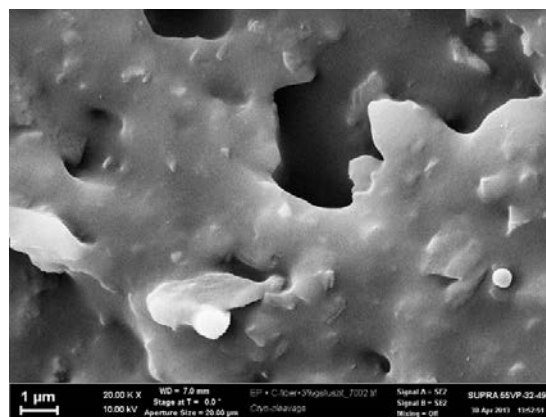


б

Рис.2. СЭМ снимок скола углепластика с чистым ЭО.

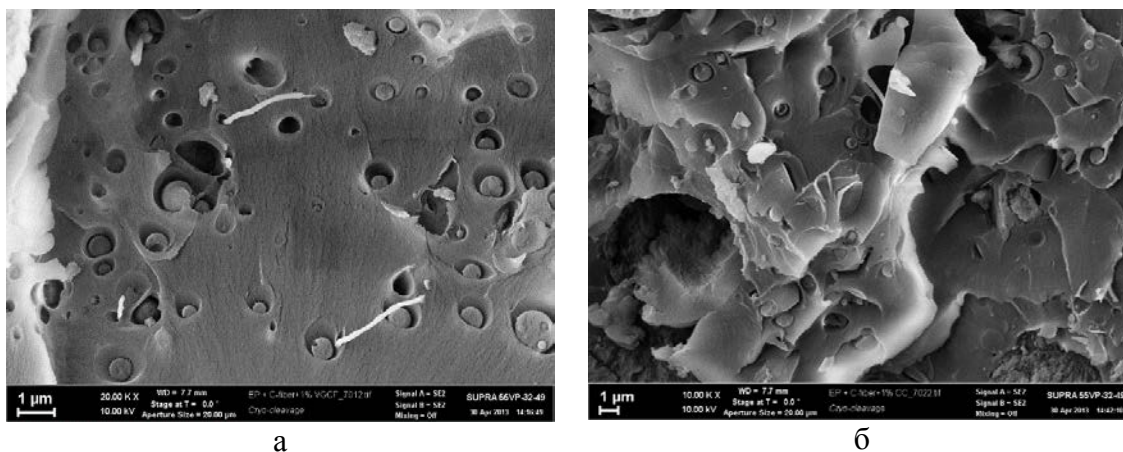


а



б

Рис.3. СЭМ снимки скола углепластиков с введенными 0,5 масс.% ММТ (а) и 3 масс.% ГТ (б).



а

б

Рис.4. СЭМ снимки скола углепластиков с введенным 1 масс.% УНК и 1 масс.% УНВ.

Как видно из снимков поверхности сколов углепластиков, модифицированных УНК и УНВ, наблюдаются многочисленные трещины и расслоения между поверхностями частицы УНК и полимера (рис.4а), а также торчащие из объёма плёнки «голые» (без полимера) нановолокна в случае УНВ (рис.4б), что вероятно указывает на слабое адгезионное взаимодействие частицы с полимером и, как следствие, на повышение трещиностойкости углепластика из-за того, что часть энергии разрушения связующего в углепластике тратится на выдёргивание частиц из объёма матрицы.

Следует заметить, что в случае добавок силикатных частиц отсутствие ярко выраженных сколов и отслоений, вероятно также связано с меньшими размерами на несколько порядков силикатных частиц (длина до 200 нм, толщина – 1 нм) по сравнению с углеродными структурами (диаметр 150 нм, длина более 10 мкм) и для детального выяснения характера связывания необходимо получение и сравнение снимков с большим увеличением, что будет представлять предмет дальнейших исследований.

## ВЫВОДЫ

На основании полученных топографических снимков поверхности сколов углепластиков, наполненных наночастицами различной природы, можно предположить разный характер взаимодействия силикатных и углеродных наночастиц с полимерной матрицей, что, соответственно, влияет на механические свойства УП. Так, введение 1% УНВ и 1% УНК в ЭО увеличивает показатели трещиностойкости при комнатной температуре на 62% и 33% соответственно и в криогенных условиях (-50°C) – на 66% и 24% соответственно. Вероятно, это связано с тем, что часть энергии разрушения связующего в УП тратится на выдёргивание частиц из объёма матрицы вследствие слабого адгезионного взаимодействия с полимером. Эффект от введения силикатных наночастиц проявляется при криогенных температурах. Так, введение 0,5% ММТ увеличило  $G_{1c}$  при -50°C на 29%, а введение 3% ГТ увеличило предел прочности при -50°C на 27%.

В заключение следует отметить, что для выяснения механизмов взаимодействия наночастиц со связующим, а также основных компонентов системы требуются дальнейшие исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Берлин А.А., Баженов С.Л., Кульков А.А., Ошмян В.Г. *Полимерные композиционные материалы. Прочность и технология.* – Долгопрудный: Интеллект, 2009. – 352 с.
2. Микитаев А. К., Козлов Г. В., Заиков Г. Е. *Полимерные наноккомпозиты. Многообразие структурных форм и приложений.* – М.: Наука, 2009. – 278 с.
3. Помогайло А.Д. *Синтез-интеркаляционная химия органо-неорганических наноккомпозитов // Высокомолекулярные соединения. Серия С.* – 2006. – Т.48. – №7. – С.1318-1351.
4. Беданокоев А.Ю., Микитаев А.К., Борисов В. А., Микитаев М. А. *Полимерные наноккомпозиты: современное состояние вопроса // Тезисы стендовых докладов первого Межд. форума по нанотехнологиям, 3-5 декабря, 2008. Секция 4.3.* – М., 2008. – 26 с.
5. Ye Y., Chen H., Wu J., Ye L. *High impact strength epoxy nanocomposites with natural nanotubes.* Polymer. – 2007. – Vol.48. – No.21. – Pp.6426-6433.
6. Yudin V.E., Svetlichnyi V.M., Shumakov A. N., Schechter R., Harel H., Marom G. *Morphology and mechanical properties of carbon fiber reinforced composites based on semicrystalline polyimides modified by carbon nanofibers // Composites: Part A.* – 2008. – Vol.39. – No.1. – Pp.85-90.
7. Sarathi R., Sahu R.K., Rajeshkumar P. *Understanding the thermal, mechanical and electrical properties of epoxy nanocomposites // Material science and engineering A.* – 2007. – №445-446. – Pp.567-578.
8. Deng S., Zhang J., Ye L., Wu Deng J. *Toughening epoxies with halloysite nanotubes // Polymer.* – 2008. – Vol.49. – Pp.5119-5127.
9. Chandrasekaran V.C.S., Advani S.G., Santare M.H. *Role of processing on interlaminar shear strength enhancement of epoxy/glass fiber/multi-walled carbon nanotube hybrid composites // Carbon.* – 2010. – Vol.48. – Pp.3692-3699.
10. Gorbatikh L., Lomov S.V., Verpoest I. *Nano-engineered composites: a multiscale approach for adding toughness to fibre reinforced composites // Procedia Engineering.* – 2011. – Vol.10. – Pp.3252-3258.
11. Molchanov E.S., Yudin V.E., Kydralievа K.A., Elokhovskiy Y.V., Vaganov G.V., Ivankova E.M. *Effect of the nanoparticles with various structures and morphologies on the thermomechanical properties of epoxy-based carbon fiber-reinforced plastics // Nanomechanics Science and Technology. Intern. Journal.* – 2013. – Vol.4. – No.1. – Pp.1-12.
12. Molchanov E.S., Yudin V.E., Kydralievа K.A., Elokhovskiy Y.V. *Comparison of the thermomechanical characteristics of Porsher carbon fabric-based composites for orthopaedic applications // Mechanic of composite materials.* – 2012. – Vol.48. – No.3. – Pp.343-350.

## REFERENCES

1. Berlin A.A., Bazhenov S.L., Kul'kov A.A., Oshmyan V.G. *Polimernye kompozitsionnye materialy. Prochnost' i tekhnologiya [Polymer compositional materials. Strength and technology].* Dolgoprudnyi, Intellect, 2009, 352 p.
2. Mikitaev A. K., Kozlov G. V., Zaikov G. E. *Polimernye nanokompozity. Многообразие структурных форм и приложений [Polymer nanocomposites. Variety of structural forms and applications].* Moskva, Nauka, 2009, 278 p.



3. Pomogailo A.D. *Sintez interkaliatsionnaia khimiia gibridnykh organo — neorganicheskikh nanokompozitov [Synthesis intercalation chemistry of organo-inorganic nanocomposites]*. Vysokomolekuliarnye soedineniia, Seriya S, 2006, Vol.48, No.7, Pp. 1318-1351.
4. Bedanokov A.Y., Mikitaev A.K., Borisov V.A., Mikitaev M.A. *Polimernye nanokompozity: sovremennoe sostoyanie voprosa [Polymer nanocomposites: Current state]*. Tezisy stendovykh dokladov pervogo Mezhdunarodnogo foruma po nanotekhnologiyam. 3-5 dekabrya 2008. Sektsiya 4.3, Moskva, 2008, P.26.
5. Ye Y., Chen H., Wu J., Ye L. *High impact strength epoxy nanocomposites with natural nanotubes*. Polymer, 2007, Vol.48, No.21, Pp. 6426-6433.
6. Yudin V.E., Svetlichnyi V.M., Shumakov A. N., Schechter R., Harel H., Marom G. *Morphology and mechanical properties of carbon fiber reinforced composites based on semicrystalline polyimides modified by carbon nanofibers*. Composites: Part A, 2008, Vol.39, No.1, Pp.85-90.
7. Sarathi R., Sahu R.K., Rajeshkumar P. *Understanding the thermal, mechanical and electrical properties of epoxy nanocomposites*. Material science and engineering A, 2007, №445-446, Pp.567-578
8. Deng S., Zhang J., Ye L., Wu Deng J. *Toughening epoxies with halloysite nanotubes*. Polymer, 2008, Vol.49, Pp.5119-5127.
9. Chandrasekaran V.C.S., Advani S.G., Santare M.H. *Role of processing on interlaminar shear strength enhancement of epoxy/glass fiber/multi-walled carbon nanotube hybrid composites*. Carbon, 2010, Vol.48, Pp.3692–3699.
10. Gorbatikh L., Lomov S.V., Verpoest I. *Nano-engineered composites: a multiscale approach for adding toughness to fibre reinforced composites*. Procedia Engineering, 2011, Vol.10, Pp.3252-3258.
11. Molchanov E.S., Yudin V.E., Kydralievа K.A., Elokhovskiy Y.V., Vaganov G.V., Ivankova E.M. *Effect of the nanoparticles with various structures and morphologies on the thermomechanical properties of epoxy-based carbon fiber-reinforced plastics*. Nanomechanics Science and Technology. Intern. Journal, 2013, Vol.4, No.1, Pp.1-12.
12. Molchanov E.S., Yudin V.E., Kydralievа K.A., Elokhovskiy Y.V. *Comparison of the thermomechanical characteristics of Porsher carbon fabric-based composites for orthopaedic applications*. Mechanic of composite materials, 2012, Vol.48, No.3, Pp.343-350.

*Поступила в редакцию 11 июля 2017 года*

---

Сведения об авторах:

Молчанов Евгений Сергеевич – асп., ФГБОУ ВО Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия; e-mail: [molchan\\_n.f@mail.ru](mailto:molchan_n.f@mail.ru)

Юдин Владимир Евгеньевич – д.ф.-м.н., зав.лаб., Лаборатория Механики полимеров и композиционных материалов, ФГБУН Институт высокомолекулярных соединений РАН, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: [yudin@hq.macro.ru](mailto:yudin@hq.macro.ru)

Кыдралиева Камиля Асылбековна – д.х.н., проф., Кафедра Материаловедение, ФГБОУ ВО Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия; e-mail: [kamila.kydralievа@gmail.com](mailto:kamila.kydralievа@gmail.com)

Ваганов Глеб Вячеславович – к.х.н., м.н.с., ФГБУН Институт высокомолекулярных соединений РАН, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: [glebvaganov@mail.ru](mailto:glebvaganov@mail.ru)

Иванькова Елена Михайловна – к.х.н., с.н.с., ФГБУН Институт высокомолекулярных соединений РАН, г. Санкт-Петербург, Россия