

УДК 629.735.33.023.:62-419.8

Кива Д. С.<sup>1</sup>, Забашта В. Ф.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Государственное предприятие «АНТОНОВ». Украина, г. Киев

<sup>2</sup> АО «Украинский научно-исследовательский институт авиационной технологии». Украина, г. Киев

## НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ В КОНТЕКСТЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В АВИАСТРОЕНИИ

*Приведена общая характеристика, особенности, структуры и свойства полимерных нанокмпозиционных материалов (НПКМ) в контексте перспектив применения в авиационной промышленности. Особенно это касается композитов на основе массива углеродных нанотрубок (УНТ, англ. CNTs). Приведен пример изготовления и оценки свойств эпоксидных углепластиков с наполнителем из нановолокон. Поставлены первоначальные задачи по развертыванию нанотехнологий в авиационной отрасли Украины.*

*Ключевые слова:* нанотехнологии; нанокмпозиции; углеродные нанотрубки; наномодифицированные ПКМ; нанотехнология.

### 1. Общая характеристика, структура и свойства НПКМ

Известно, что ПКМ среди других конструктивных материалов обладают высоким уровнем физико-механических характеристик. Однако их применение в авиационной промышленности в определенной мере тормозится из-за недостаточно высоких характеристик матрицы, а также из-за недостаточно полного взаимодействия матрицы на границы с наполнителем. Это понижает прочностные характеристики ПКМ, а следовательно — и изготавливаемой конструкции. Так, углепластики обладают высокими характеристиками удельной прочности на растяжение, несколько меньшей на сжатие, достаточно низкими на сдвиг, смятие и срез [1].

Одним из эффективных путей решения этой проблемы, в частности, повышение сдвиговой, межслойной и ударной прочности ПКМ является возможность использования в ряде случаев объемных преформ, т.е. пространственно армированных каркасов.

Однако и в этом случае резервом повышения прочностных характеристик ПКМ является увеличение прочности связи на границе раздела «полимерная матрица — армирующие волокна». Одним из направлений решения этой проблемы стало получение нанокмпозиций, т.е. веществ, в которых каждый компонент образует отдельную структуру, однако атомы этих структур дополнительно взаимодействуют друг с другом, создавая новые структуры и присваивая веществу новые свойства.

Таким образом, успешная реализация указанного резерва с целью повышения прочностных характеристик ПКМ и его монолитности здесь достигается на путях использования преимуществ функционирующих наносистем [2-28 и др.].

Как отмечается в [7, 8] с открытием фуллеренов и нанотрубок (наноматериалы углеродного типа) наука об углероде переживает ренессанс, сравнимый с рождением органической химии (рис. 1). В этой научно-технической сфере речь идет о новом направлении в ПКМ для различных отраслей промышленности, в том числе в авиационной — применение наномодификации ПКМ наноматериалами, прежде

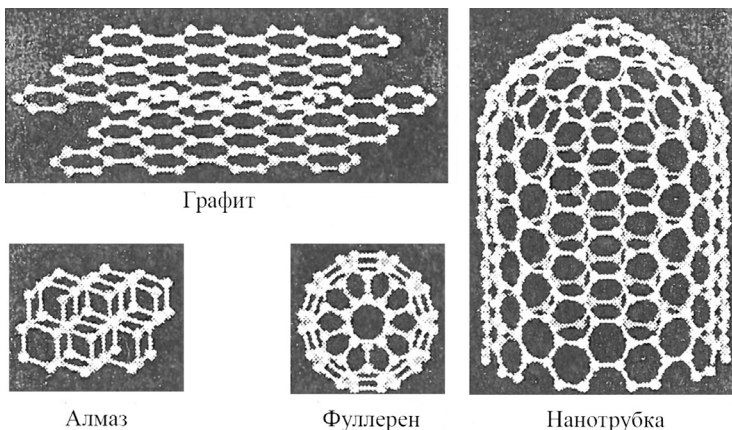


Рис. 1. Аллотропия углерода

всего углеродного и силикатного типов для совершенствования свойств ПКМ [13 и др.].

Научно-технические предпосылки использования наномодифицированных композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов связаны с характеристиками углеродных нанотрубок (УНТ) прочностные характеристики которых в сравнении со сталью приведены ниже:

	УНТ	Сталь
Модуль Юнга, Па	$1,28 \dots 1,8 \cdot 10^{12}$	$0,21 \cdot 10^{12}$
Прочность на разрыв, ГПа	$45 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^9$

Использовать УНТ непосредственно в конструкции невозможно, но применение этих трубок в качестве наполнителя-упрочнителя в композиционных материалах весьма эффективно не только из-за необычайной прочности, но также вследствие увеличения площади межфазной границы нанокомпозитов по сравнению с наполнителями обычных размеров (рис. 2). При изменении размеров наполнителя от микрон до нанометров площадь межфазной границы при той же объемной доле может увеличиться больше чем в 30 раз [11 и др.].

Мировой рынок применения углеродных нанотрубок составил в 2000 г. 1,4 млн. долларов, рынок 2004 г. превысил 430 млн. долларов, в 2014 г. он вырос до 1,1 млрд. долларов. По прогнозу американской исследовательской компании Markets and Markets к 2016 году емкость этого рынка достигнет 3,3 млрд. долларов [28]. Стоимость УНТ является высокой и колеблется, по различным источникам, в широком диапазоне цен. Например, в [28] сообщается о цене одностенных УНТ в диапазоне 25–90 \$/г.

Несмотря на высокую стоимость экономически оправданным следует признать применение фуллеренов в качестве структурных модификаторов, поскольку технически значимый эффект достигается при использовании микродоз (0,01–1%) наночастиц [2,7–11 и др.].

Сочетание в материале связующего, модифицированного углеродными наночастицами и углеродных волокон с обработанной поверхностью, позволяет увеличить реализационную прочность волокнистых композитов. Создание композитов с комби-

нированным наполнителем является перспективным направлением разработок новых наполненных полимерных материалов. Композиты комбинированного наполнения можно применять в качестве основных конструктивных элементов в самолетостроении для военной авиационной техники и для гражданской авиации, т.е. в тех областях, где требуется оптимальное сочетание прочности, стойкости к разрушению и веса. [2, 6 и др.].

В углепластиках становится возможным осуществить наноструктурную модификацию границы раздела «полимерная матрица – армирующее волокно» аппретированием волокна раствором фуллеренов. Благодаря добавлению в состав связующего углеродных нанотрубок, достигается модификация надмолекулярной структуры матрицы. Это позволяет устранить «рыхлость» и уменьшить долю свободного объема, и при этом повысить коэффициент упаковки матрицы и композита в целом.

При этом наблюдается уплотнение материала, повышение его деформативности и вязкости разрушения в 1,2–1,5 раз. В принципе, с помощью функциональных производных фуллеренов можно организовать в полимерной матрице объемный армирующий каркас. Это позволило бы ослабить отрицательное влияние анизотропии – известного недостатка слоистых ПКМ.

При введении углеродных наночастиц в диапазоне массового содержания от 0,1 до 0,25 увеличиваются следующие характеристики эпоксидного связующего: прочность при сжатии (на 11–55%), ударная прочность (на 30–50%), динамический модуль сдвига (на 27–48%). Комбинированное наполнение (углепластик на основе эпоксидного связующего модифицированного углеродными наночастицами и углеродные волокна) приводит к увеличению свойств композита: прочности углепластика на растяжение в 1,5 раза, ударной прочности на 18%, сдвиговой прочности до 40%. Наблюдается изменение динамического модуля сдвига, степени структурной однородности и диссипативных характеристик композиционного материала [2].

Введение фуллеренов и астраленов в состав углепластиков повышает их межслоевую прочность в 1,2–1,4 раза и придает новый комплекс свойств: повышенную тепло- и электропровод-

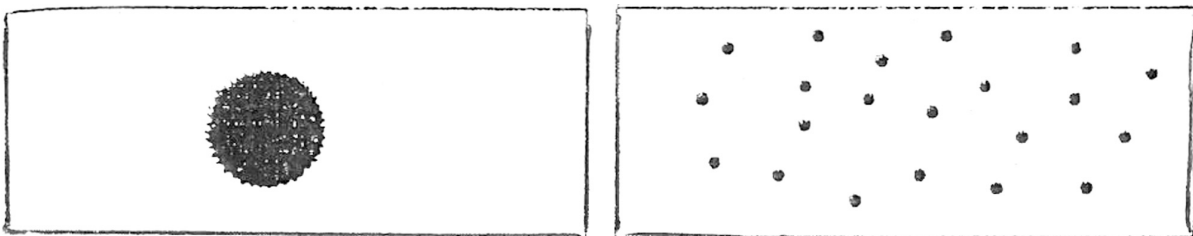


Рис. 2. Увеличение площади межфракционной границы нанокмозитов по сравнению с наполнителями обычных размеров

ность, особенно в трансверсальном направлении (3-5 раз), что позволило создать на их основе высокоэффективные молниезащитные покрытия (см. п. 5) для деталей из полимерных композитов, выходящих на внешний контур планера [7].

В [3, 7] разработана технология модифицирования углепластиков фуллероидами, обеспечивающая дезинтеграцию, равномерное распределение наночастиц. Путем применения астраленов и шунгитов достигнуто повышение в 1,5 раза поперечной тепло-, энергопроводности углепластиков. Разработана система молниезащиты, обеспечивающая целостность углепластиковых конструкций внешнего контура планера после удара молнии и сохраняющая не менее 60% остаточной прочности в зоне поражения (см. п. 5).

В [3, 7] проведен анализ и установлено, что практически ни одна из известных на данный момент молниезащитных систем для композитных конструкций не отвечает в полном объеме требованиям норм летной годности по молниестойкости, весовой эффективности, аэродинамическим характеристикам, эксплуатационной надежности. Разработанные на сегодня молниезащитные покрытия обеспечивают надежную защиту несущих элементов конструкций из углепластиков, выходящих на внешний контур планера самолета, от сквозных пробоев, прогаров, расщеплений, возникающих в результате воздействия разрядов молнии.

В [9] приведены результаты исследований прочностных характеристик ПКМ на основе связующего модифицированного наночастицами. Для упроч-

нения использовались углеродные нанотрубки (УНТ) производства ООО «НТЦ «НАНОТЕХНОЛОГИЯ» (г. Москва). В работе использовалась смесь углеродных нанотрубок и нановолокон с диаметром в интервале от 10 нанометров до 150 нанометров. В качестве композиционного материала был исследован стеклопластик и органопластик. Для изготовления стеклопластика использовалась стеклоткань полотняного переплетения с поверхностной плотностью  $285 \pm 12$  г/м<sup>2</sup> марки Т-13 ГОСТ 1\_170-2001. Для изготовления органопластика использовалась ткань полотняного переплетения с поверхностной плотностью 90 г/м<sup>2</sup> на основе арамидного волокна «РУСАР» (производство НПФ «ТЕРМОТЕКС»). В качестве связующего использовалась эпоксидная смола ЭД-20 и смола D.E.R.330 (Dow Chemical, Германия), модифицированной по технологии, разработанной в НТЦ «НАНОТЕХНОЛОГИЯ». Содержание углеродных нанотрубок в модифицированных смолах составляло 0,01–0,05%.

Стеклопластиковые образцы испытывались на изгиб по трехточечной схеме, размеры образцов (70 × 15 × 3) мм. Образцы из органопластика испытывались на сдвиг, размеры образцов (120 × 20 × 6) мм.

Стеклопластик изготавливался методом горячего прессования. В качестве основы для связующего использовались эпоксидные смолы ЭД-20 и D.E.R.330 (Dow Chemical, Германия). Результаты испытаний стеклопластика приводятся в табл. 1 и табл. 2.

Следует отметить, что наряду с увеличением предела прочности стеклопластика при изгибе воз-

Таблица 1

**Прочностные характеристики композиционного материала (стеклопластик) при изгибе**

Связующее	УНТ, %	$\sigma$ , МПа	$V_R$ , %	$\Delta\sigma$ , %
ЭД-20	0	382,4	4,3	
ЭД-20	0,001–0,02	527,1	5,8	37,8
D.E.R.330	0	430,6	3,4	
D.E.R.330	0,001–0,02	551,5	2,8	28,1

$\Delta\sigma$  – увеличение предела прочности при добавлении в композит УНТ

Таблица 2

**Модуль упругости композиционного материала (стеклопластик) при изгибе**

Связующее	УНТ, %	$E$ , ГПа	$V_R$ , %	$\Delta E$ , %
ЭД-20	0	20,00	3,5	
ЭД-20	0,001–0,02	26,18	5,8	30,8
D.E.R.330	0	21,2	3,4	
D.E.R.330	0,001–0,02	27,57	2,2	27,2

Условные обозначения:

$V_R$  – коэффициент вариации

$\Delta E$  – увеличение модуля упругости при добавлении в композит УНТ

растает и модуль упругости. Модуль упругости также увеличивается на значительную величину — более 25%, что представлено в табл. 2. Данные табл. 1 и 2 показывают значительное повышение механических характеристик ПКМ при введении в связующее углеродных нанотрубок.

## 2. Модифицирующая способность углеродных наноматериалов

Как выше отмечалось, разработка новых, экономически эффективных и технологически целесообразных, методов модификации поверхности углеродного волокна и полимерного связующего с целью улучшения механических и других специфических свойств композитов на их основе является актуальной задачей материаловедения в области конструирования и производства изделий из ПКМ.

Выбор углеродных ультрадисперсных частиц не случаен. В ходе исследования полимерных материалов содержащих ультрадисперсные частицы замечено [2 и др.], что: путь движения трещины в композите с малыми включениями требует больших затрат энергии; ультрадисперсные частицы не являются концентраторами напряжений в отличие от более крупных частиц; введение частиц приводит к упорядочению морфологической структуры полимера; ультрадисперсные частицы могут служить в качестве центров сшивки полимерной сетки (т.е. способны залечивать дефекты сетки); частицы могут агломерировать, образуя пространственный каркас в объеме ПКМ.

Модифицирующее влияние порошков ультрадисперсного алмаза (УДПА) и алмазо-графита (УДПА-АГ) оценивалось при исследовании структуры и свойств эпоксидианового связующего и однонаправленного углепластика на его основе. В настоящее время разработано две технологических схемы модификации (рис. 3): первая — модификация связующего и формирование на его основе углепластика; вторая — обработка суспензией из углеродных ультрадисперсных частиц с эпоксидными олигомерами поверхности углеродных волокон, с последующим формированием углепластика методом раздельного нанесения компонентов [2, 21 и др.]. Приведенные две схемы относятся к химическим способам модификации.

В качестве примера первой схемы на рис. 4 показана зависимость динамического модуля упругости

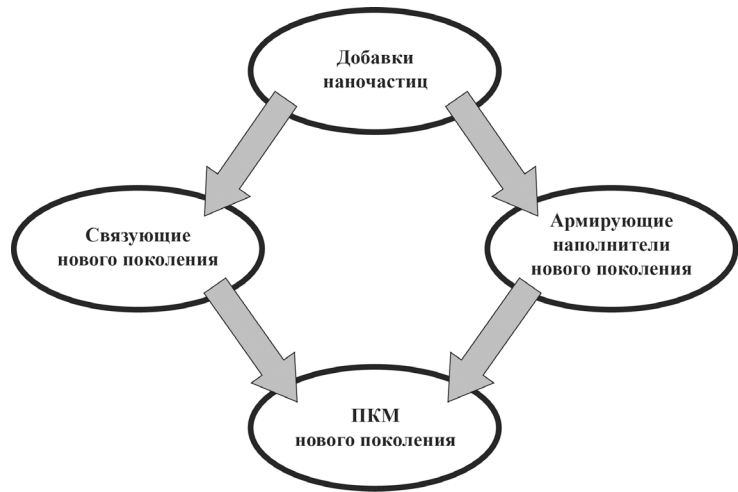


Рис. 3. Наномодификация полимерных композиционных материалов [21]

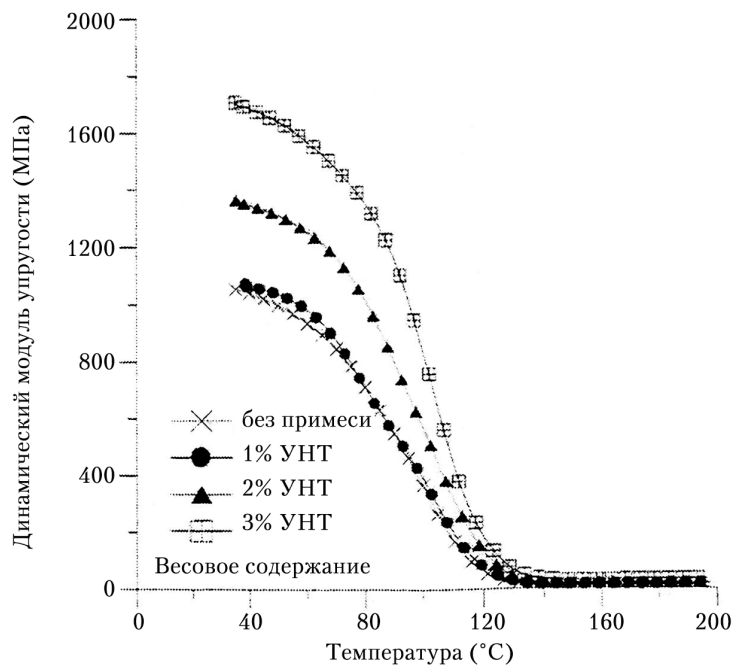


Рис. 4. Динамический модуль упругости модифицированной УНТ эпоксидной смолы в зависимости от температуры

(ДМУ)<sup>1</sup> модифицированной УНТ на уровне 3% весовых частей, динамический модуль упругости при 30 °С превысил свое первоначальное значение на 65% [27].

Влияние углеродных ультрадисперсных частиц проявляется также на технологических свойствах полимерного связующего. Высокая удельная поверхность частиц приводит к их активному взаимодействию с исходными компонентами матрицы, как на стадии совмещения компонентов, так и в процессе формирования. Введение частиц УДПА и УДПА-АГ снижает динамическую вязкость, как самого эпоксидианового олигомера, так и всей поли-

<sup>1</sup> ДМУ приблизительно равен начальному модулю упругости, определенном при статистических испытаниях.

мерной композиции в целом, а также существенно влияет на процесс отверждения композиции.

Анализ и сопоставление данных различных экспериментов показал, что все типы исследуемых частиц эффективно влияют на трещиностойкость (критический коэффициент интенсивности напряжений возрастает в 1,5–2 раза) эпоксидной матрицы [2 и др.].

Для модифицированной матрицы наблюдается смена механизма разрушения при ударном воздействии (по Шарпи образцов без надреза) с хрупкого до псевдопластичного с повышением ударной прочности ПКМ до 18% [2].

В образцах углепластиков, изготовленных по второй технологической схеме наблюдается существенный рост адгезионной и сдвиговой прочностей композита (до 120 МПа). Решающее влияние на уровень адгезии модифицированного связующего к углеродному волокну оказывает состав поверхности углеродных ультрадисперсных частиц. Исследования показали, что введение алмазографитных частиц приводит к росту адгезии связующего к волокну (выражается в росте прочности при межслоевом сдвиге, разрушение идет по волокну, а не по матрице) [2].

### 3. Нанокompозиты в лабораториях AFRL (US Air Force Research Laboratory)

Как отмечалось расширяющееся применение композитов в конструкции воздушных судов поднимает проблему электромагнитной защиты. Ее решение может успешно прийти из области нанотехнологий [12].

В центре проблематики здесь электропроводность, поскольку композиты являются намного более плохими проводниками, чем металлы. Обычный подход заключается в добавление в конструкции из композитов очень тонких листиков алюминия, которые должны быть соединены между собой и связаны с массой. Отсюда негативное влияние на величину массы конструкции и на удлинение времени изготовления. Другая отрицательная сторона: вероятность коррозии и быстрой потери электрических контактов по причине «эффекта гальванической пары».

Отделение материалов AFRL внедряет более эффективную технологию. Речь идет о применении композиционного проводящего покрытия для ПКМ. Решение обеспечивает небольшое увеличение массы для ПКМ, обходится без крепежных элементов и исключена электрохимическая коррозия. Выбор остановился на композите из нановолокон углерода (диаметр от 50 до 300 нанометров) и полимерной матрицы. Как и в работах [2, 7, 8] было показано, что нановолокна, введенные в полимер, позволяют существенно повысить электропровод-

ность. Это стало возможным из-за того, что диаметр нанонитей меньше в 100–1000 раз по сравнению с армирующими волокнами ПКМ, что при заданной массе приводит к большей длине в 10000–1000000 раз. Равномерно распределенные в матрице, эти нанонити соединяются между собой в виде сетки, придавая полимеру проводимость. Первый этап, реализованный исследователями AFRL, заключался в нахождении соответствующего метода введения волокон в матрицу, который правильно распределяет нановолокна в жидком полимере без их повреждения. Это было реализовано в планетарном смесителе со скоростью вращения 1250 об/мин. Операция перемешивания производилась при вращении 1000 об/мин., чтобы избежать возникновения пены. С целью доводки смеси перед применением она проходит затем через смеситель с высоким тангенциальным ускорением и с дополнительным применением растворителя. Что касается самого нанесения полученной смеси, то наилучшая технология заключается в использовании пульверизации при помощи системы, подобной системе распылительной покраски пистолетом.

### 4. Нанокompозиты в работах института композитных структур и адаптивных систем при германском центре аэрокосмических исследований (DLR)

Указанный в названии институт (DLR) запатентовал инновационный способ компенсации недостатков различных технологий DP-RTM [21].

На сегодня технологически высокоэффективные композиты, производимые способом впрыска все еще не могут сравниться по своим свойствам с препрегово-композитными материалами [14 и др.]. Одна из главных причин кроется в повышенной по сравнению с препреговыми технологиями химической (полимеризационной) усадке полимерных систем, что приводит в сравнении к еще более сильным усадочным напряжениям в ПКМ. Это, в свою очередь, уменьшает физико-механические, химические и другие свойства композита.

Институт композиционных структур разработал способ, который позволяет избежать этой проблемы привлекая к технологиям впрыска нанотехнологии. Для этого в производственном цикле изготовления ПКМ была применена так называемая в [14] технология «однолинейного впрыска».

В качестве полимерной матрицы использовалась эпоксидная смола с распространением в инъекционных технологиях циклом отверждения (4 часа при 80 °C и 4 часа при 120 °C).

Для модификации эпоксидной смолы были применены сфероподобные наночастицы (диаметр 1–100 нанометров) на основе диоксида кремния (SiO<sub>2</sub>) и сульфата бария (BaSO<sub>4</sub>).

В качестве усиливающих волокнистых наполнителей были использованы двунаправленные материалы: стеклоткань (0/90° с саржевым переплетением, 390 г/м<sup>2</sup>) и углеткань (0/90°, переплетение типа «рогожка», 365 г/м<sup>2</sup>).

Для определения коэффициента впрыскивания маточной смеси (эпоксидная матрица + наночастицы) был применен метод изотермического определения вязкости. Повышение содержания SiO<sub>2</sub> до 25 вес. % (который относится к эпоксидной смоле) и, соответственно, BaSO<sub>4</sub> до 20 вес. % при обычной температуре впрыска 80 °С приводит к уменьшению предельной продолжительности хранения. Последнее, равно как слабое увеличение начальной вязкости, согласно [14] приемлемо и не представляет собой препятствий при массовом производстве.

Цикл отверждения стекло- и углепластиков был идентичен применяемому для чистых смол. Во всех случаях фракция армирующего наполнителя в ПКМ комбинированного наполнения составляла 60% объема. При этом имело место однородное распределение частиц SiO<sub>2</sub> и BaSO<sub>4</sub> в реакционной смолистой среде и отсутствие значимой агломерации частиц. В результате получено повышение модуля упругости, прочности и крепости нанокompозитов.

### 5. Перспективы применения наноматериалов в авиационной промышленности

В [2-28 и др.] приведены обобщенные свойства нанокompозитов, которые должны учитываться при разработке и производстве авиаконструкций из УП, указанного комбинированного наполнения. При этом отмечается, что введение в состав ПКМ углеродных наночастиц, таких как фуллерены, нанотрубки, астралены, в количестве > 0,05%, в случае углепластиков приводит к комплексному повышению механических и эксплуатационных свойств: прочности при сжатии и сдвиге — на 20%, ударной стойкости — на 45%, остаточной прочности — в 1,5 раза, водо- и топливостойкости — в 1,5–2 раза, температуры эксплуатации — на 30% и увеличению ресурса — в 1,8 раза. Одновременно материал приобретает специальные свойства, такие как электро- и теплопроводность, рентгено- и звукопрозрачность, молниестойкость.

Созданный углепластик КМУ-18 (РФ, ВИАМ), содержащий в своем составе астралены, предназначен для использования в конструкции планеров самолетов ПАК-ФА (2-й этап), SSJ-130, MC-21 [7].

Для защиты от поражения молниевым разрядом конструкций из углепластика, выходящих на внешнюю поверхность планера (составляющих > 50%), во ФГУП «ВИАМ» для изделий MC-21, ПАК-ФА

и ряда вертолетов разработано молниестойкое покрытие, представляющее собой углепластик, содержащий в своем составе астралены и фуллерены. Благодаря повышению высокотемпературной электро-, теплопроводности, температуры термического разрушения и высоким конструкционным свойствам это покрытие обеспечивает безопасную повреждаемость углепластиковых конструкций при воздействии токов молнии и снижение массы покрытий (по сравнению с традиционно используемыми молниезащитными покрытиями (МЗП) на основе латунных сеток) на 300–500 г/м<sup>2</sup> защищаемой поверхности [3, 7].

В [15] отмечается, что в РФ нанокompозиты пока не применяются в нагруженных элементах конструкций. Это связано только с тем, что для применения наполнителей следует проходить более сложные процедуры сертификации, а значит, нужны новые системы стандартов. Ограничение по применению УНТ в авиационных материалах объясняется также высокой стоимостью и сложностью их производства.

Представители компании Lockheed сообщили, что им удалось значительно снизить стоимость производства нанокompозитов. В частности стоимость новых обтекателей из наномодифицированных ПКМ будет составлять 10% от стоимости обтекателей из углепластика. Снижение стоимости связано не только с применением экономических технологий для создания нанокompозитов, но и с разработанными компанией новыми типами связующих, которые могут отверждаться вне автоклава, что позволило исключить наиболее дорогостоящие этапы производства.

Фирма Локхид Мартин производит квалифицированные испытания обтекателя законцовок крыла для самолета пятого поколения F-35, изготовленных из термопластичного КМ введенными в него углеродными нанотрубками. При этом стоимость такого материала составляет одну десятую стоимости традиционного ПКМ на основе углеволокна, а по характеристикам новый КМ сравним с характеристиками алюминиевой обшивки [20].

Здесь можно говорить о примере эффективного функционирования конструктивно-технологической наноинженерии.

Консорциум Некст занимается разработкой сочетания в одном процессе двух технологий многослойных материалов: межслоевое наноплотнение в операции выкладки тканевого полуфабриката с ворсистым волокном [20, 25]. Сказанное прежде всего касается конструкций авиакосмической техники и представляет собой представляет собой использование вертикально выровненных УНТ (VACNTs)<sup>2</sup> для устранения стыков между соединя-

<sup>2</sup> VACNTs — vertically aligned carbon nanotubes

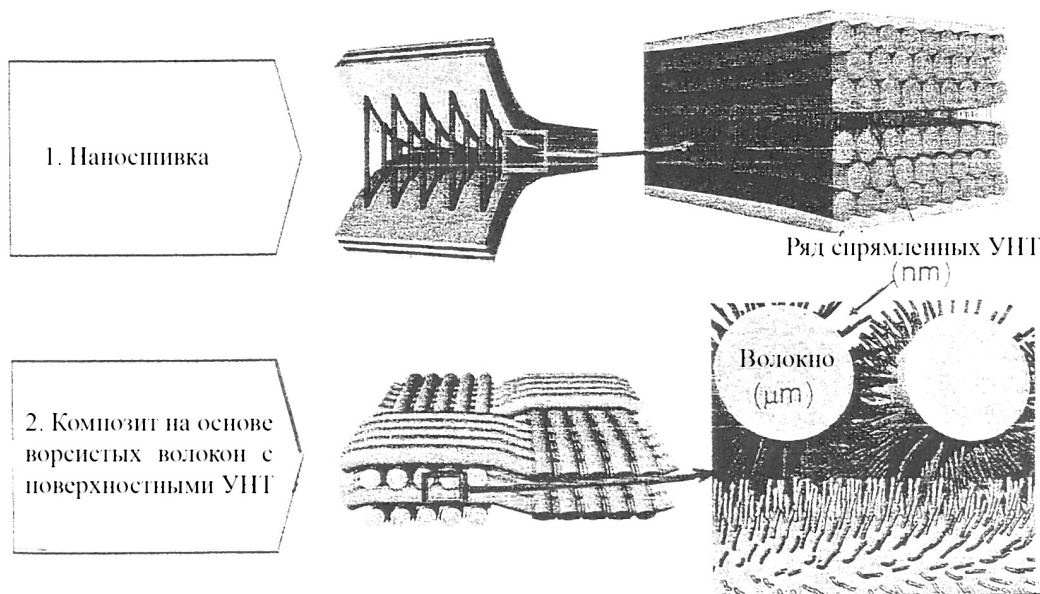


Рис. 5. Двухслойные наноконструкционные материалы с использованием для «шивки» слоев массива углеродных нанотрубок

мыми слоями углеволокон, что увеличивает прочность многослойного материала. Выровненные УНТ кладутся на поверхность полуфабриката из углеродного волокна в качестве «шивного» покрытия, а затем уже формируются слои. Ворсистое волокно «срастается» с выровненными нанотрубками на поверхности тканевого углеродного волокна, формируя трехмерный нанопропрочненный композит (рис. 5).

Следующим направлением применения нанотехнологий в производстве композитных конструкций являются материалы, защищающие от ультрафиолетового излучения. Дело в том, что органические материалы, полимеры, применяемые в качестве блокираторов ультрафиолетового излучения, имеют ограниченный срок жизни. Производство покрытий с применением нанотехнологий может, с одной стороны, обеспечить прозрачность материала, не ухудшающего визуальную дальность, а с другой стороны — защитить кабину самолета от ультрафиолетовых лучей. Использование нанопокровов на остеклении кабины предотвращает налипание частиц влаги при полете самолета во время дождя и снегопада за счет уменьшения адгезионных свойств материала. Способность влиять через нанопокров на количество поверхностного статического электричества также уменьшает эффективную площадь рассеяния объекта [20].

Фирма GION Аэроспейс также делает ставку на нанотехнологии при производстве конструкционных материалов. Одним из направлений ее исследований являются покрытия — как прозрачные, применяемые, в частности, на фонаре кабины самолета, так и непрозрачные. Некоторые материалы уже проходят испытания, хотя большинство из них

находится на этапе лабораторного эксперимента. Высокие показатели прозрачности и прочности материалов фонаря кабины также достигаются при использовании углеродных нанотрубок [20].

Разработанный UDPI (University of Dayton Research Institute) наноадаптивный гибридный материал NAFH-X (Nano Adaptive Hybrid Fabric) представляет собой ворсистый волоконный КМ, в котором углеродные нанотрубки «выращены» на углеродных волокнах. Такая новая технология модификации ПКМ способствует получению у материала высокой электро- и теплопроводности. Эти свойства материала формируются через длину и плотность распределения углеродных нанотрубок на волокне. Указанную схему модификации относят к разряду физических.

В [26] корпорацией Airbus рассматриваются потенциальные преимущества наноконструкционных материалов и схематично представлены места их рационального применения в планере самолета. В общем это снижение его массы в следствие высоких механических и динамических свойств НПКМ. В применении это панели крыла, киль (совместный изгиб и кручение конструкций), в местах совместного действия продольных и окружных напряжений (например, передний отсек фюзеляжа), защита остекления кабины самолета от ударных воздействий и ультрафиолетовых лучей и др.

Использование нанопокровов на поверхности гондолы авиационного двигателя также избавит ее от наледи за счет теплопроводных свойств материала [20].

Внедрение нанотехнологий может решить проблему старения полимерных композитов при воздействии ультрафиолетового излучения, в результате

которого пластики становятся хрупкими. Добавление наночастиц диоксида титана в углепластики повышает устойчивость к воздействию ультрафиолета в два раза и на 80% сдвиговую прочность [15].

Одним из существенных недостатков ПКМ по сравнению с металлами являются низкие температуры горения. Для повышения термостойкости в ПКМ добавляют «наноглины» (силикаты), углеродные нанотрубки и гибридные структуры типа микросилицированного графита, на котором выращены УНТ. Наночастицы обладают высокими характеристиками теплопроводности, Они создают «температурные мостики» в материале и обеспечивают равномерный отвод и распределение тепла при нагреве композита, что в итоге повышает рабочие температуры материала. Подобные технические решения, понижающие риск возникновения пожаров, являются чрезвычайно важными для самолетов, космических аппаратов, кораблей, подводных лодок, автомобилей. Поэтому в будущем наномодифицированные позволят расширить область применения полимерных композитов и заменить металлические материалы. Нанокompозиты обладают повышенным коэффициентом соотношения прочности (жесткости) и удельного веса, что особенно важно в авиа- и судостроении, их применение позволит создавать новые энергоэффективные материалы и конструкции [15].

Применение нанокompозитных материалов возможно в деталях, подвергающихся трению. Наномодификация материалов для трущихся деталей либо использование сухой смазки из наночастиц позволит снизить коэффициент трения контактирующих поверхностей. Например, известно положительное влияние добавок наночастиц сульфида вольфрама на контакт материалов, выполненных из эпоксидной смолы.

Согласно [15] в РФ (ОАО НИАТ совместно с «НаноТехЦентр») создается высокоэффективный технологический процесс серийного производства функциональных углеродных нанотрубок. Применяемый в этом процессе реактор имеет производительность до 400 кг нанотрубок в год.

В настоящее время разработан прибор для испытаний материалов на наноуровне, с помощью которого ученые теперь могут проводить точную диагностику образцов — «видеть» их на наноуровне [18].

Кроме того, считается, что летательный аппарат в перспективе будет оснащен множеством нанодатчиков, снимающих в полете информацию об обтекающем воздушном потоке. После ее обработки бортовым компьютером, наноактиваторы, воздействуя на поток, будут изменять в нужную сторону условия обтекания аппарата. Например, с целью повышения безопасности полетов в дальнейшем будут создаваться так называемые «самозалечивающиеся конструкции» из структурированных

композиционных материалов с вкрапленными наночастицами, обеспечивающими затягивание возникающих трещин.

Также планируется использовать нанотехнологии для решения таких проблем как, как обледенение конструкции, а также повышение безопасности полетов, снижение расходов топлива, повышение экологичности и комфорта [18 и др.].

### Заключение

1. Приведенные в статье обзорные материалы показывают, что в настоящее время одним из новых потенциально перспективных конструктивных материалов композитного типа для дальнейшего успешного применения в конструкциях авиационного назначения являются полимерные нанокompозиты (НПКМ). В западных странах в этом направлении успешно проявляет себя конструктивно-технологическая авиационная наноинженерия (КТАН) функционирующая параллельно с решением фундаментальных и практических многоаспектных проблем. КТАН комплексно включает: наноструктурные конструктивные элементы; наноструктурированные материалы (в первую очередь нанокompозиты); нанотехнологии с производственным промышленным оборудованием для изготовления наномодификаторов, а также инновационные технологии изготовления из нанокompозитов деталей конструкций повышенной несущей способности, эксплуатационной надежности и др.

Здесь по сравнению с немодифицированными ПКМ имеет место более широкий спектр эффективных вариантов, альтернатив и конструктивно-технологических возможностей, требующих своего выбора на основании проведенных НИОКР.

2. Среди первоочередных задач успешной реализации КТАН следует выделить:

- Координация и инвестирование работ, проводимых институтами НАН Украины в указанной научно-технической сфере;

- организацию промышленного производства наномодификаторов углеродного (первая очередь) и силикатного типа с тенденцией снижения их высокой стоимости;

- проведение опытно-конструкторских и экспериментальных работ по созданию и расширению возможностей использования наноструктурированных материалов, имеющих свойства значительно отличающихся от свойств традиционных материалов;

Здесь важно определить конструктивно-технологические приоритеты с точки зрения технических, экономических и логистических возможностей в таких целях как безопасность полетов и/или транспортной эффективности самолета, или же эффективности производства нанокompозитных



конструкций и др. В этом распределении целей, например, для гражданских самолетов первоочередным вопросом безопасности полетов, могли бы стать упоминаемое в статье молниестойкое покрытие для деталей из ПКМ, выходящих на внешний контур планера;

- разработку инновационных технологий изготовления из нанокompозитов авиационных деталей конструкций и нормативно-технической документации для сертификации изделий из нанокompозитов.

3. Создание, задействование и распространение нанокompозитов в промышленности Украины, в т. ч. в авиационной отрасли, относится к тем современным техническим направлениям, которые затормозят запущенный примерно в середине 90х годов механизм промедления технического развития [1]. Наличие в материальном облике самолета заметного объема нанокompозитов и характерное этому в авиастроении следствие для вновь применяемых конструкционных материалов — появление новых КТР, способствовало бы (по аналогии, например с ПКМ, или, ранее — с алюминием) продвижению такой продукции, в первую очередь «прорывной» на мировом рынке.

4. Использование достижений нанотехнологий в авиастроении позволит обеспечить качественно новый уровень эффективности создаваемых изделий.

### Литература

- [1] Кива Д.С. Этапы становления и начала развернутого применения полимерных композиционных материалов в конструкциях пассажирских и транспортных самолетов (1970-1995 гг.) // Авиационно-космическая техника и технология. Харьков, ХАИ, 2014, №6, с.5-16.
- [2] Ананьева В.С., Маркин Б.В. Перспективы применения углепластиков комбинированного наполнения в авиакосмической технике // Ползунов. вестн. 2009. №4. с. 223-226.
- [3] Бухаров С.В., Гуняева А.Г. и др. Исследование зоны поражения молниезащитного покрытия из углепластика высоковольтными разрядами, имитирующими токи молнии // Науч. труды (МАТИ). 2014. №22, с. 4-14.
- [4] Вермель В.Д., Доценко А.М. и др. Об упрочнении штифтовых соединений деталей из углепластика наномодифицированной клеевой композицией. // Материалы 24 научно-технической конференции. 28 февраля — 01 марта 2013, Жуковский (Моск. область), с. 85.
- [5] Гуняев Г.М. и др. Многослойное молниезащитное покрытие конструкций из углепластика, выходящих на внешний контур планера. — М.: ФГУП ВИАМ. 2007, с. 230-234.
- [6] Доронин В. Что дадут нанотехнологии авиастроению? [http://olymp.as-club.ru/publ/arkhiv\\_rabot/](http://olymp.as-club.ru/publ/arkhiv_rabot/).
- [7] Ильченко С.И., Гуняев Г.М. Углеродные фуллероидные наночастицы: влияние на структуру и свойства эпоксиуглепластиков // Нанотехника, 2005, №3, с. 18-28.
- [8] Ильченко С.И., Гуняев Г.М. Конструкционные углепластики с повышенной вязкостью разрушения: Новые материалы и технологии. — ИМТ-2206. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Т.М.: МАТИ-РТГУ. 2006, с. 125-126.
- [9] Кайсина Т.В. и др. Прочностные характеристики композиционных материалов. // В сб.: «Композиционные материалы в промышленности». Материалы 28 международной конференции. 26-30 июля 2008 г., Ялта, с. 442-444.
- [10] Каблов Е.Н. Век умных материалов (электронный ресурс) <http://agnc.ru/publication/97>
- [11] Каргопольцев В.А. Возможности и перспективы использования нанотехнологий в авиационной отрасли // Полет, 2007, №12, с. 11-17.
- [12] Мюскер А. Нанокompозиты // Air & Cosmos. 2007.-02.02. №2063, с. 33.
- [13] Натрусов В.Н. и др. Модификация эпоксидных матриц холодного отверждения наноматериалами углеродного и силикатного типов // В сб.: «Композиционные материалы в промышленности». Материалы 28 международной конференции. 26-30 июня 2008 г., Ялта, с. 3.
- [14] Передовые армированные волокном нанокompозитные материалы. Труды германского центра авиации и космонавтики (NLR), 5с. Интернет издание.
- [15] Сироткин О.С., Андрионина С.А. Перспективы применения нанокompозитов в авиации // Авиационная промышленность, 2013, №2, с. 53-55.
- [16] Углеродные волокна. Мировой рынок углеродного волокна. Дорожная карта «Использование нанотехнологий в производстве углеродных волокон и продуктов на их основе». Российская корпорация нанотехнологий, 2008.
- [17] Способ получения углеродных нанотрубок. Патент Украины 69292А.
- [18] Созинова Т.В. и др. Внедрение нанотехнологий и использование нанокompозитов в авиастроении // Междунар. журнал эксперим. образ., №2011, №7, с. 11-12.
- [19] США. Компоненты из угленанотрубок CNRP для самолета F-35 // Экспресс-инф. Гос. НИИ авиац. систем. 2011, №30, с.1-2.
- [20] Чабанов В.А. Применение нанотехнологий при создании перспективных авиационных композиционных материалов. НТН. Сер. Авиац. системы Гос. НИИ авиационных систем. 2011, №2, с.27-29.
- [21] Чернышев С.Л. Новый этап применения композиционных материалов в авиастроении. // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2013, №1, с. 3-10.
- [22] Передовые армированные волокна и нанокompозитные материалы. Труды германского центра авиации и космонавтики (NLR), 5с.

- [23] De Rosa Igor Maria and other. EMC impact of advanced carbon fiber / carbon nanotube reinforced composites for next generation aerospace applications // IEEE Trans. Electromagn. Compat. 2008. 59, №3, c. 556-553.
- [24] Nanotechnology for toughened epoxy systems // JEC Composites Magazine, №52, October, 2009, p.34.
- [25] Guzman R. Nano-architectures in aerospace composites // JEC Composites, №72, April-May 2012, p. 31-32.
- [26] Wılcken P., Beral B. and others. Potential of requirements driven nanotechnologies for airframe applications // SAMPE Europe International Conference. 2007, Paris, p.193-196.
- [27] Zhou Y., Pervin F. and others. Fabrication and evolution of carbon nano fiber filled carbon/epoxy composite // Mater. Sci and Eng. A. 2006, 426, №1-2, p. 221-228.
- [28] Информация Internet издания.

*Kiva D. S.<sup>1</sup>, Zabashta V. F.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> ANTONOV, State-owned Enterprise. Ukraine, Kiev

<sup>2</sup> Ukrainian Research Institute of Aviation Technology, JSC. Ukraine, Kiev

### NANOMODIFIED POLYMER COMPOSITES IN THE CONTEXT OF AIRCRAFT CONSTRUCTION APPLICATION

*General characteristics, features, structure and properties of nanomodified polymer composite material (NPCM) are presented in the context of aircraft construction application. This especially may be applied to the aligned CNTS arrays-based composites. Adduced is an example of fabrication and evolution of carbon nanofiber-filled carbon/epoxy composites. Primary goals for development of nano-engineering in the aeronautical industry of Ukraine formulated.*

*Keywords:* nanotechnologies; nanocomposites; carbon nanotubes; nanomodified PCM; nano-seal fabrication; nano-engineering.

#### References

- [1] Kiva D.S. Etapyi stanovleniya i nachala razvernutoho primeneniya polimernykh kompozitsionnykh materialov v konstruktsiyah passazhirskih i transportnykh samoletov (1970-1995 gg.) // Aviatsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya. Harkov, HAI, 2014, #6, p.5-16.
- [2] Ananeva V.S., Markin B.V. Perspektivy primeneniya ugleplastikov kombinirovannogo napolneniya v aviakosmicheskoy tehnike // Polzunov. vestn. 2009. #4. p. 223-226.
- [3] Buharov S.V., Gunyaeva A.G. i dr. Issledovanie zony porazheniya molniezaschitnogo pokryitiya iz ugleplastika vyisokovoltnyimi razryadami, imitiruyuschimi toki molnii // Nauch. trudy (MATI). 2014. #22, p. 4-14.
- [4] Vermel V.D., Dotsenko A.M. i dr. Ob uprochnenii shtiftovykh soedineniy detaley iz ugleplastika nanomodifitsirovannoy kleevoy kompozitsiyey. // Materialy 24 nauchno-tehnicheskoy konferentsii. 28 fevralya – 01 marta 2013, Zhukovskiy (Mosk. oblast), p. 85.
- [5] Gunyaev G.M. i dr. Mnogosloynnoe molniezaschitnoe pokryitie konstruktsiy iz ugleplastika, vyihodyaschie na vneshniy kontur planera. – M.: FGUP VIAM. 2007, p. 230-234.
- [6] Doronin V. Chto dadut nanotehnologii aviastroeniyu? [http://olymp.as-club.ru/publ/arkhiv\\_rabot/](http://olymp.as-club.ru/publ/arkhiv_rabot/).
- [7] Ilchenko S.I., Gunyaev G.M. Uglerodnyye fulleroidnyye nanochastitsyi: vliyanie na strukturu i svoystva epoksiugleplastikov // Nanotehnika, 2005, #3, p. 18-28.
- [8] Ilchenko S.I., Gunyaev G.M. Konstruktsionnyye ugleplastiki s povyishennoy vyzkostyu razrusheniya: Novyye materialy i tehnologii. – IMT-2206. Materialy Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. T.M.: MATI-RTTU. 2006, p. 125-126.
- [9] Kaysina T.V. i dr. Prochnostnyye karakteristiki kompozitsionnykh materialov. // V sb.: «Kompozitsionnyye materialy i promyshlennosti». Materialy 28 mezhdunarodnoy konferentsii. 26-30 iyulya 2008 g., Yalta, p. 442-444.
- [10] Kablov E.N. Vek umnykh materialov (elektronnyy resurs) <http://agnc.ru/publication/97>
- [11] Kartopoltsev V.A. Vozmozhnosti i perspektivy ispolzovaniya nanotehnologiy v aviatsionnoy otrasli // Polet, 2007, #12, p. 11-17.

- [12] Myusker A. Nanokompozityi // Air & Cosmos. 2007.-02.02. #2063, p. 33.
- [13] Natrusov V.N. i dr. Modifikatsiya epoksidnykh matrits holodnogo otverzheniya nanomaterialami uglerodnogo i silikatnogo tipov // V sb.: «Kompozitsionnyie materialy v promyshlennosti». Materialy 28 mezhdunarodnoy konferentsii. 26-30 iyunya 2008 g., Yalta, p. 3.
- [14] Peredovyye armirovannyye voloknom nanokompozitnyie materialy. Trudy germanskogo tsentra aviatsii i kosmonavтики (NLR), 5p. Internet izdanie.
- [15] Sirotkin O.S., Andryunina S.A. Perspektivyy primeneniya nanokompozitov v aviatsii // Aviatsionnaya promyshlennost, 2013, #2, p. 53-55.
- [16] Uglerodnyie volokna. Mirovoy ryinok uglerodnogo volokna. Dorozhnaya karta «Ispolzovanie nanotekhnologiy v proizvodstve uglerodnykh volokon i produktov na ih osnove». Rossiyskaya korporatsiya nanotekhnologiy, 2008.
- [17] Sposob polucheniya uglerodnykh nanotrubok. Patent Ukrainy 69292A.
- [18] Sozinova T.V. i dr. Vnedrenie nanotekhnologiy i ispolzovanie nanokompozitov v aviastroenii // Mezhdunar. zhurnal eksperim. obraz., #2011, #7, p. 11-12.
- [19] USA. Komponenty iz uglenanotrubok CNRP dlya samoleta F-35 // Ekspres-inf. Gos. NII aviats. sistem. 2011, #30, p.1-2.
- [20] Chabanov V.A. Primenenie nanotekhnologiy pri sozdanii perspektivnykh aviatsionnykh kompozitsionnykh materialov. NTN. Ser. Aviats. sistemy Gos. NII aviatsionnykh sistem. 2011, #2, p.27-29.
- [21] Chernyishev S.L. Novyy etap primeneniya kompozitsionnykh materialov v aviastroenii. // Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii. 2013, #1, p. 3-10.
- [22] Peredovyye armirovannyye volokna i nanokompozitnyie materialy. Trudy germanskogo tsentra aviatsii i kosmonavтики (NLR), 5p.
- [23] De Rosa Igor Maria and other. EMC impact of advanced carson fiber / carson nanotube reinforced composites for next generation aerospace applications // IEEE Trans. Electromagn. Compat. 2008. 59, №3, c. 556-553.
- [24] Nanotechnology for toughened epoxy systems // JEC Composites Magazine, №52, October, 2009, p.34.
- [25] Guzman R. Nano-architectures in aerospace composites //JEC Composites, №72, April-May 2012, p. 31-32.
- [26] Wülcken P., Beral B. and others. Potential of requirements driven nanotechnologies for airframe applications // SAMPE Europe International Conference. 2007, Paris, p.193-196.
- [27] Zhou Y., Pervin F. and others. Fabrication and evolution of carbon nano fiber filled carbon/epoxy composite // Mater. Sci and Eng. A. 2006, 426, №1-2, p. 221-228.
- [28] Informatsiya Internet izdaniya.