

УДК 691.175, 667.6

**МЕТОД УПРОЧНЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ЛЕНТ МОДИФИЦИРОВАННЫМИ НАНОТРУБКАМИ  
НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ РЕЗОНАТОРОВ**

© 2018 Р.А. Салаев, А.А. Федоров, Д.В. Мухин

Ульяновский Государственный Технический Университет,  
обособленное структурное подразделение «Институт авиационных технологий и управления»

Статья поступила в редакцию 01.11.2018

Разработан новый метод упрочнения углеродных лент модифицированными нанотрубками на основе ультразвуковых резонаторов. Установлено, что использование ультразвука для размешивания нанотрубок в связующем дает более равномерное их распределение по сравнению с существующими методами. Проведено сравнение предлагаемого метода упрочнения с применяемыми в настоящее время на производствах методами упрочнения. Предложен более эффективный метод упрочнения углеродных лент, путем внедрения углеродных нанотрубок ультразвуковым ветром в структуру углеродной ленты.

*Ключевые слова:* углеродные нанотрубки, связующее, углеродная лента, полимерно-композитные материалы, повышение прочности, ультразвуковой ветер.

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время конструкции из полимерно-композитных материалов (ПКМ), находят все большее применение в самых различных отраслях техники, в том числе в изделиях, которые работают в условиях повышенных нагрузок. Ряд исключительных свойств, которые могут быть получены при производстве этих конструкций, важнейшим среди которых является низкий удельный вес, делает исследование ПКМ наиболее перспективным направлением в современном материаловедении. Существующие подходы к решению задачи повышения прочности изделий из ПКМ имеют ряд проблемных вопросов. На данный момент наиболее перспективным способом повышения прочности ПКМ является внедрение в связующее небольшого количества углеродных нанотрубок (УНТ), что приводит к повышению прочности, появлению проводимости и радиопоглощающих свойств [1]. Однако, для получения таких свойств требуется равномерное распределение УНТ в объеме связующего и образование ковалентных связей между УНТ и связующим. Без дополнительной модификации УНТ склонны к образованию агломератов, т.е. к неравномерному распределению, что существенно снижает эффект от их внедрения. Создание дешевого и эффективного метода, позволяющего решить описанную выше

проблему, в настоящее время является одной из важнейших задач в вопросах связанных с использованием УНТ в композитных материалах.

При проведении ряда экспериментов, по внедрению и распределению УНТ в объем связующего, было замечено, что наиболее равномерное распределение удается получить при воздействии на связующее ультразвуком.

Помимо исследований по внедрению УНТ в связующее авторским коллективом был разработан другой метод повышения прочности ПКМ, который может использоваться как в качестве альтернативы внедрению УНТ в связующее, так и совместно с ним. Сущность предлагаемого метода заключается во внедрении УНТ при помощи ультразвукового резонатора в структуру углеродной ленты до пропитки связующим с использованием ультразвукового ветра. Такой метод позволит существенно повысить прочностные характеристики ленты, при минимальных затратах на оборудование и УНТ.

В настоящее время авторским коллективом проводятся дальнейшие исследования по использованию ультразвука для размешивания и внедрению УНТ в связующее и структуру углеродной ленты, целью которых является установление закономерностей протекающих при этом процессов и выбор оптимальных условий, т.е. интенсивности и мощности ультразвукового ветра и количество УНТ, обеспечивающих наибольшее упрочнение ленты и получение ПКМ с наилучшими с точки зрения дальнейшей эксплуатации изделий свойствами.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

В данной работе использовались УНТ, полученные путем химического осаждения УНТ из

*Салаев Роман Андреевич, аспирант.*

*E-mail: rayzer75@yandex.ru*

*Федоров Александр Александрович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Самолетостроение».*

*E-mail: aa.fedorov@ulstu.ru*

*Мухин Дмитрий Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Самолетостроение».*

*E-mail: dmuhin123@mail.ru*

паровой фазы (метод MOCVD) с использованием смесей летучих металлоорганических соединений и углеводородных прекурсоров в токе инертного газа при 650-900 °С [3]. Для внедрения УНТ в структуру непропитанной углеродной ленты использовалась установка, схема которой представлена на рис. 1.

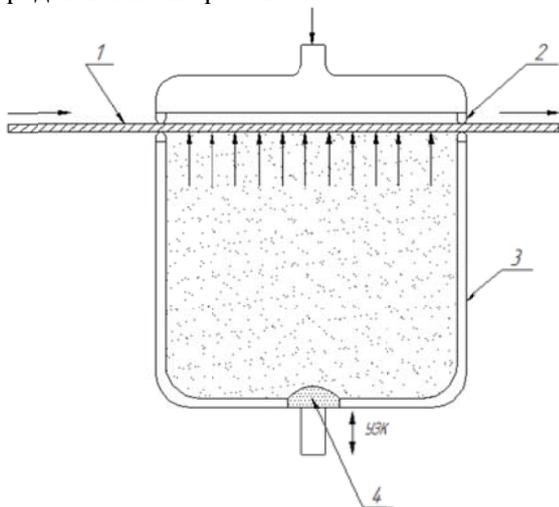


Рис. 1. Схема установки

В данной установке в небольшую емкость 4 засыпаются нанотрубки, количество которых варьируется исходя из скорости движения конвейера, а также толщины ленты. Далее при помощи ультразвукового ветра, который создается ультразвуковым резонатором УРСК-7Н-22 3 (рис. 2.), происходит внедрение УНТ в структуру углеродной ленты 1, которая движется по конвейеру с небольшой скоростью по всему её объему до пропитки ее связующим. Это дает наиболее равномерное распределение УНТ в структуре материала, тем самым повышая его прочностные характеристики. Резиновые изоляторы 2, необходимы для создания герметичного соединения, для избегания повышенного расхода материала и попадания УНТ в окружающую среду, т.к. при внедрении УНТ ультразвуковым ветром происходит их разброс в большом диапазоне. После окончания процесса внедрения УНТ, углеродная лента снимается с конвейера.

Следующим шагом является изготовление связующего с УНТ для пропитки углеродной ткани с включенными в структуру УНТ

Для приготовления связующего использовались:

- Смола эпоксидная ЭД-20 – 89,9 м.ч.
- Отвердитель ТЭГТА – 10 м.ч.
- Модифицированные углеродные нанотрубки – 0,1 м.ч.
- Лабораторные весы МАССА-К ВК-300.
- Специализированная тара для приготовления связующего.

В специальной таре, предварительно взвешенные компоненты размешиваются с использованием ультразвуковой установки, т.к.



Рис. 2. Ультразвуковой резонатор УРСК-7Н-22

при размешивании ультразвуком связующего с УНТ, происходит наиболее равномерное распределение УНТ в составе связующего. После приготовления связующего проходит дальнейшая пропитка углеродной ткани в специальной емкости, где в несколько слоев выкладывается углеродная ткань с нанесенными на ее поверхность УНТ, наносится связующее из тары, затем при помощи валика происходит дальнейший процесс пропитки слоев ткани. Готовый препрег выкладывали слоями и устанавливали под пресс гидравлический с нагревом на 24 часа.



Рис. 3. Полученные образцы

**Таблица 1.** Результаты испытания образцов

Образцы	Е, ГПа	Разрушающее напряжение при растяжении, МПа
Образец без добавления УНТ	250	2000
Образец с добавлением УНТ в связующее	275	2200
Образец с добавлением УНТ в связующее и структуру углеродной ленты	300	2400

Полученные образцы (рис. 3) устанавливаются в разрывную машину УМЭ-10ТМ, где проводятся прочностные испытания при разных скоростных режимах разрыва образцов.

Параллельно, для сравнения прочностных характеристик, проводились испытания для образцов без УНТ, а также образцов с УНТ добавленными только в состав связующего. После проведения лабораторных испытаний на разрывной машине УМЭ-10ТМ, был проведен анализ полученных результатов, который представлен в таблице 1.

### ВЫВОДЫ

Полученные в результате экспериментальных исследований результаты позволяют сделать вывод о том, что внедрение небольшого количества УНТ в углеродную ткань при помощи ультразвукового ветра, а также добавление УНТ в связующее и дальнейшая пропитка им углеродной ленты повышает прочность конструкций из ПКМ на 20 – 30%. Учитывая дешевизну УНТ и оборудования для их нанесения, предложенный метод повышения прочности

изделий из ПКМ является экономически выгодным и после завершения дополнительных исследований и установления оптимальных режимов обработки может быть рекомендован к внедрению в производство изделий, прочность которых является одним из важнейших эксплуатационных свойств.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ajayan P.M., Tour J.M.* MaterialScience: nanotubecomposites // Nature. 2007. V. 447. P. 1066 – 1068.
2. *Акатенков Р.В.* Влияние малых количеств функционализированных нанотрубок на физико – механические свойства и структуру эпоксидных композиций // Деформация и разрушение материалов. – 2011. Т. 1. – № 11. – С. 117 – 132.
3. *Климов Е. С.* Некоторые аспекты синтеза многостенных углеродных нанотрубок химическим осаждением из паровой фазы и характеристики полученного материала // Журнал прикладной химии. – 2014. – Т. 87. – №8. – С. 1128 – 1132.
4. *Zhu R., Pan E., Roy A.K.* Molecular dynamics study of stress – strain behavior of carbon – nanotube reinforced Epon 862 composites // Mater. Sci. Eng. 2007. V. A447. P. 51 – 57.

### METHOD FOR STRENGTHENING CARBON TAPES BY MODIFIED NANOTUBES BASED ON ULTRASOUND RESONATORS

© 2018 R.A. Salaev, A.A. Fedorov, D.V. Muhin

Ulyanovsk State Technical University,  
a Separate Structural Unit «Institute of Aviation Technologies and management», Ulyanovsk

A new method of hardening carbon tapes with modified nanotubes based on ultrasonic resonators has been developed. It is established that the use of ultrasound for mixing nanotubes in the binder gives a more uniform distribution compared with existing methods. A comparison of the proposed hardening method with the hardening methods currently used in manufacturing has been made. A more efficient method for hardening carbon tapes has been proposed by introducing carbon nanotubes with an ultrasonic wind into the carbon tape structure.

*Keywords:* carbon nanotubes, binder, carbon tape, polymer composite materials, increased strength, ultrasonic wind.

*Roman Salaev, Postgraduate Student.*

*E-mail: rayzer75@yandex.ru*

*Alexander Fedorov, Candidate of Technics, Head of the Aircraft Department. E-mail: aa.fedorov@ulstu.ru*

*Dmitriy Muhin, Candidate of Technics, Associate Professor at the Aircraft Department. E-mail: dmuhin123@mail.ru*