

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

- Мин П.Г., Сидоров В.В., Вадеев В.Е.** Исследование восстановления кремния из керамической формы при направленной кристаллизации монокристаллических никелевых жаропрочных сплавов 2

НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ

- Нелюб В.А.** Технологии металлизации углеродных тканей и свойства углепластиков на их основе 7

КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

- Воробьева Г.А., Складнова Е.Е.** Анализ влияния аэротермоакустической обработки на свойства литейных алюминиевых сплавов 11

- Чумадин А.С., Смыков А.Ф., Петров А.П., Шемонаева Е.С.** Об одном способе изготовления равнотолщинных днищ 18

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ, ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ И ДРУГИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

- Афанасьева Л.Е., Югов В.И.** Повышение износостойкости сталей с помощью закалки многоканальным лазером 23

НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

- Суходаев П.О., Редькин В.Е., Богданова Т.А., Ткаченко Ю.С.** Твердость и износ алюминия, модифицированного наночастицами 27

- Крушенко Г.Г.** Наномодифицирование металла при литье и сварке 33

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ОБОРУДОВАНИЯ, КОНСТРУКЦИЙ И МАТЕРИАЛОВ

- Колотилов Ю.В., Лисин И.Ю., Максименко Ю.А., Галимова Л.В.** Структурирование параметров работоспособности систем транспорта углеводородов с учетом потока отказов 40

ИНФОРМАЦИЯ. ОБМЕН ОПЫТОМ

- Снигирев А.И., Железняк Л.М., Еремин А.В.** Расширение технологических возможностей машин, устройств и инструмента в производстве изделий из медных сплавов для электромашиностроения 44

Технологии металлизации углеродных тканей и свойства углепластиков на их основе

В.А. НЕЛЮБ*, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

*E-mail: admin@emtc.ru

Рассмотрены две технологии металлизации углеродных лент с использованием установки для вакуумного и магнетронного напыления. В качестве металлического покрытия использовался титан. Для сравнения были изготовлены образцы углепластиков с использованием аппрета на основе аминпропилтриэтоксисилана. Аппрет также наносили по двум технологиям: по первой технологии его наносили непосредственно на ленту с последующей сушкой, по второй — вводили в состав связующего. В качестве объектов исследования использовались отечественная углеродная лента ЛУП и эпоксидное связующее. Углепластики для всех рассмотренных технологий изготавливали по технологии вакуумной инфузии. Установлено, что наибольшее повышение прочности при межслоевом сдвиге достигается при металлизации углеродной ленты на установке Булат-6.

Ключевые слова: углеродная лента, углепластик, металлизация, аппрет, прочность при межслоевом сдвиге.

Введение

Углеродные наполнители, такие как ткани, ленты и волокна, впервые начали использовать в ракетно-космическом производстве, что связано с их высокими удельными характеристиками [1–3]. Удельная прочность (отношение прочности к плотности) и удельная жесткость (отношение модуля к прочности) для титановых сплавов равны 25–30 и 150–200 соответственно, тогда как для углепластика эти характеристики составляют не менее 90 и 1050. Еще одним существенным преимуществом углепластиков является большое значение предела выносливости, например, для металлов предел выносливости составляет 0,2–0,3 от кратковременной прочности, тогда как для углепластиков на основе высокомодульных углерод-

ных волокон значения предела выносливости достигают 0,5–0,7. Кроме этого, углепластики имеют самый низкий коэффициент линейного термического расширения, что приводит к тому, что термические напряжения в деталях из углепластиков в 10 и более раз меньше, чем в деталях из других материалов.

Длительное время основным недостатком углепластиков являлась их высокая стоимость, но в настоящее время разработаны экономически эффективные технологии производства деталей из полимерных композиционных материалов [4–6], что привело к существенному расширению областей их применения, в том числе при производстве и ремонте машин самого широкого назначения [3, 7, 8].

Известно, что прочность однонаправленных углепластиков определяется прочностью

волокон, тогда как прочность при межслоевом сдвиге зависит от прочности адгезионного взаимодействия между волокном и матрицей [9—11]. Для повышения адгезионного взаимодействия углепластиков широкое распространение получили аппреты [12]. Аппреты можно наносить непосредственно на ткани (ленты, волокна) как на заводах, на которых их изготавливают, так и в условиях предприятий, занятых формированием деталей из углепластиков.

Еще одним способом повышения прочности при межслоевом сдвиге является металлизация поверхности углеродной ткани. Однако, по сравнению с технологиями аппретирования, этот способ еще не получил широкого распространения.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование прочности углепластиков при межслоевом сдвиге при использовании двух технологий металлизации и сравнение их с аналогичными углепластиковыми, полученными с использованием технологии аппретирования.

Объекты и методы

В качестве объектов исследования использовались однонаправленная углеродная лента ЛУП и эпоксидное связующее на основе эпоксидиановой смолы ЭД-20, изометилтетрагидрофталевого ангидрида в качестве отвердителя и диэтиленгликоля — в качестве активного разбавителя.

В качестве аппрета использовался раствор аминопропилтриэтоксисилана в смеси растворителей (фенола и ацетона) с концентрацией 1%. Аппрет наносили по двум технологиям. По первой (стандартной) его наносили на углеродную ленту, которую сушили при температуре 50 °С в течение 30 мин. По второй технологии аппрет вводили в состав связующего после его изготовления и далее осуществляли пропитывание методом вакуумной инфузии и отверждали по стандартному (для данного связующего) режиму.

Металлизацию углеродной ленты ЛУП проводили по двум технологиям. По одной технологии металлизация выполнялась на модернизированной установке Булат-6, по другой —

на установке магнетронного распыления МИР-2. В качестве металлического покрытия в обеих технологиях использовался титан. Перед нанесением титана поверхность ленты обрабатывали несколько минут в среде аргона. Продолжительность обработки в среде аргона определялась экспериментально по критерию прочности сцепления покрытия с углеродной лентой. Эта прочность оценивалась с помощью липкой ленты. Если после отрыва липкой ленты от покрытия на ней оставались следы металла, то такое качество признавалось неудовлетворительным и продолжительность предварительной обработки в среде аргона увеличивали. Общая продолжительность напыления с учетом времени на очистку при использовании данных технологий составила 12 мин на установке Булат-6 и 15 мин на установке МИР-2. Напыление проводили на обе поверхности углеродной ленты.

Для удобства дальнейшего анализа полученных результатов все используемые технологии приведены в табл. 1.

Образцы углепластиков для всех исследуемых технологий изготавливали методом вакуумной инфузии. Свойства всех используемых при этой технологии вспомогательных материалов (жертвенная ткань, разделительная сетка, трубки для подачи связующего, вакуумная пленка и др.) подробно рассмотрены в работе [13]. Образцы для испытаний на межслоевой сдвиг изготавливали из 25 слоев ткани.

Термостойкость углепластиков проводили на термогравиметрическом анализаторе мерки *TG 209 F1 Libra*.

Упругие характеристики углепластиков оценивали на динамомеханическом анализаторе марки *Netzsch 242E Artemis*.

1. Перечень изготовленных углепластиков

№	Используемые технологии повышения прочности при межслоевом сдвиге
<i>Аппретирование</i>	
1	Нанесение аппрета на углеродную ленту
2	Введение аппрета в состав связующего
<i>Металлизация</i>	
3	Установка Булат-6
4	Установка МИР-2

Результаты и обсуждение

В табл. 2 приведены значения прочности при межслоевом сдвиге для всех изготовленных образцов.

Анализ полученных результатов показывает, что, по сравнению с исходным значением, аппретирование по новой технологии путем введения аппрета в связующее позволило очень незначительно увеличить адгезионную прочность. Значение прочности при межслоевом сдвиге увеличилось всего на 4%.

Использование стандартной технологии аппретирования, путем нанесения аппрета на углеродную ленту, привело к повышению прочности на 24%.

2. Прочность при межслоевом сдвиге

№ технологии изготовления углепластиков по табл. 1	Прочность при межслоевом сдвиге, МПа	Дисперсия, МПа
Исходное значение (т.е. без аппретирования и металлизации)	46	1,7
1	48	1,8
2	57	2,6
3	61	1,9
4	52	1,4

3. Потери массы углеродной ленты ЛУП в зависимости от температуры после ее металлизации на установках Булат-6 и Мир-2

Температура, °С	Исходное волокно	Металлизация на установках	
		Булат-6 (образец № 3)	МИР-2 (образец № 4)
450	2,13	2	2,3
500	2,5	2	2,5
600	7,2	3,7	4,1
700	24,3	11,4	12,8

4. Модули упругости углепластиков на основе углеродной ленты ЛУП в зависимости от температуры после ее металлизации на установках Булат-6 и Мир-2

Температура, °С	Исходное волокно	Металлизация на установках	
		Булат-6 (образец № 3)	МИР-2 (образец № 4)
30	58372	53386	51274
180	49496	51072	45608
300	179	579	341

Металлизация на установке Булат-6 позволяет получить большие значения прочности при межслоевом сдвиге, чем все остальные использованные технологии. По сравнению с исходным композитом, прочность при межслоевом сдвиге увеличилась на 33%.

Из двух используемых способов металлизации применение для напыления вакуумной установки Булат-6 позволило получить большие значения прочности, чем при напылении на установке МИР-2. Значения дисперсии, наоборот, меньше при использовании установки МИР-2, чем для технологии напыления на установке Булат-6.

Наряду с увеличением прочности при межслоевом сдвиге, металлизация поверхности углеродной ленты позволила увеличить термостойкость углеродной ленты и углепластиков на ее основе. В табл. 3 приведены значения потерь массы образцов углеродной ленты до и после металлизации по различным технологиям в зависимости от температуры нагрева.

Как видно из полученных данных, металлизация приводит к некоторому повышению термостойкости. Аналогичные результаты получены и для углепластиков. Металлизация на установке Булат-6 привела к увеличению термостойкости на 150 °С, а металлизация на установке Мир-2 позволила увеличить термостойкость на 80 °С.

В табл. 4 приведены значения модуля упругости при различных температурах, определенные на динамомеханическом анализаторе для углепластиков без металлизации и после металлизации по двум используемым технологиям.

Модули упругости углепластиков на основе металлизированной ткани при температуре 30 °С незначительно снижаются. Это уменьшение модулей составило 8,5% (металлизация на установке Булат-6) и 13% (металлизация на установке Мир-2). При повышении температуры до 300 °С значения модулей упругости углепластиков на тканях после металлизации, наоборот, выше, чем без нее. При температурах 180 °С значения модулей упругости для углепластиков (образец № 3) повышаются, а для углепластиков (образец № 4) снижа-

ются по сравнению с исходным материалом. Предполагаем, что такое отличие в большей степени связано с ручной технологией закрепления углеродной ленты на установке Булат-6, что и привело к ее повреждению и, как следствие, к более низким значениям модуля упругости.

Выводы

Металлизация углеродных тканей перед их пропитыванием эпоксидным связующим позволяет повысить прочность углепластиков при межслоевом сдвиге на 33% при использовании установки Булат-6 и на 13% при использовании установки Мир-2. Значения дисперсии прочности при межслоевом сдвиге, наоборот, меньше при использовании установки МИР-2, чем для технологии напыления на установке Булат-6. Такой разброс дисперсии (при использовании установки Булат-6), вероятно, связан с ручным (резьбовым) способом крепления образцов ленты на оснастку.

Металлизации поверхности углеродной ленты также позволила повысить термостойкость углепластиков на 80–150 °С и привела к увеличению модуля упругости при температурах 180 °С и выше.

Результаты настоящей работы получены в рамках проекта по теме «Научные исследования по разработке композиционных материалов со структурой управляемого хаоса и их применение в высокотехнологичном производстве», задание № 11. 7291.2017/БЧ.

Список литературы

1. Nelyub V.A., Borodulin A.S., Kobets L.P., Malysheva G.V. A study of structure formation in a binder depending on the surface microrelief of carbon fiber // Polymer Science — Series D. 2016. 9 (3). P. 286–289.
2. Vaurova N.I. Influence of nanostructured defects in carbon fibers and ribbons on sensor properties // Polymer Science — Series D. 2011. 4 (3). P. 242–245.
3. Баурова Н.И., Зорин В.А. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин / Учебное пособие. М.: МАДИ, 2016. 264 с.
4. Гузева Т.А. Отверждение полимерных связующих с помощью энергии электромагнитных колебаний сверхвысоких частот // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. № 8. С. 30–32.
5. Буянов И.А., Вдовин Д.С. Разработка метода проектирования и технологии прошивки преформ для изготовления углепластиков // Клеи. Герметики. Технологии. 2016. № 10. С. 22–24.
6. Nelyub V.A., Borodulin A.S., Kobets L.P., Malysheva G.V. Capillary hydrodynamics of oligomer binders // Polymer Science — Series D. 2016. 9 (3). P. 322–325.
7. Кузнецов В.М., Нехороших Г.Е. Применение углепластиков при изготовлении сосудов давления торовой формы // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2015. № 2. С. 32–36.
8. Vaurova N.I., Sergeev A.Y. Structural studies of fracture patterns in adhesive joints after pullout testing // Polymer Science — Series D. 2014. 7 (4). P. 298–302.
9. Татарников О.В. Трехуровневое проектирование пространственно-армированных композиционных конструкций // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 7. С. 21–26.
10. Цибизова Т.Ю., Гузева Т.А. Системы автоматического управления технологическими процессами отверждения изделий из полимерных композиционных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2015. № 5. С. 35–40.
11. Нелюб В.А. Оценка адгезионного взаимодействия между углеродным волокном и эпоксидным связующим // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. № 7. С. 20–22.
12. Баженов, С. Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. Полимерные композиционные материалы. Издательский Дом «Интеллект», 2010. 352 с.
13. Городецкий М.А., Тепишкина Е.С., Чирва П.И. Типовые проблемы при выборе вспомогательных материалов для инфузионных технологий формования изделий из стеклопластиков // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2017. № 4. С. 60–65.
14. Буянов И.А. Исследование влияния технологии прошивки углеродных тканей на свойства углепластиков. Технология металлов. 2017. № 8. С. 33–37.