

УДК 678

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА УГЛЕРОДНЫЕ ЛЕНТЫ С МЕДНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Нелюб В.А., Федоров С.Ю., Бурченкова Т.Д., Панфилов Ю.В.

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва,
e-mail: admin@emtc.ru, mail@emtc.ru, panfilov@bmstu.ru

Статья посвящена исследованию условий эксплуатации и совершенствованию свойств и характеристик углепластиков. Одним из современных методов придания углепластикам новых свойств является использование углеродных тканей (лент) с предварительно нанесенным на них металлическим покрытием. Целью настоящей работы являлось исследование влияния электрического поля на углеродные ленты с медным покрытием. Для повышения надежности и прочности материалов при нанесении на поверхность углеродной ленты медного покрытия использована вакуумная технология магнетронного распыления. Приведены результаты экспериментальных исследований углеродных лент с медным покрытием, соединенных между собой ультразвуковой сваркой. Определены режимы сварки и значения температур в зоне сварки. Экспериментально установлено, что имеет место расплавление медного покрытия при температурах выше 370 °С, что существенно ниже, чем у меди. Проведено моделирование в программе COMSOL Multiphysics и определены значения температур, возникающие в процессе сварки на поверхности углеродной нити и медного покрытия. Сделан вывод о том, что с помощью технологии ультразвуковой сварки возможно соединить между собой углеродные ленты с нанесенным на них медным покрытием. Экспериментальные и теоретические результаты показали, что наличие на углеродной ленте медного покрытия способствует повышению качества углеродной ленты. В результате расчетов было установлено, что температура медного покрытия на 3 % выше, чем углеродной нити.

Ключевые слова: углепластик, углеродная лента, медное покрытие, сварка, электрическое поле, моделирование тепловых нагрузок

MODELING OF THERMAL LOADS ARISING BY ELECTRICAL FIELDS EFFECT ON CARBON TAPES WITH COPPER COATING

Nelyub V.A., Fedorov S.Yu., Burchenkova T.D., Panfilov Yu.V.

Federal State Budgetary Education Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University», Moscow, e-mail: admin@emtc.ru, mail@emtc.ru, panfilov@bmstu.ru

The article is devoted to the study of operating conditions and the improvement of the properties and characteristics of carbon plastics. One of the modern methods of imparting new properties to carbon plastics is the use of carbon fabrics (tapes) with a metallic coating previously applied to them. The purpose of this work was to study the effect of the electric field on carbon tapes with copper coating. To increase the reliability and durability of materials when applied to the surface of a carbon ribbon of copper coating, vacuum technology of magnetron sputtering is used. The results of experimental studies of carbon tapes with a copper coating interconnected by ultrasonic welding are presented. Welding modes and temperatures in the welding zone are determined. It was established experimentally that there is a melting of the copper coating at temperatures above 370 °C, which is significantly lower than that of copper. The simulation was carried out in the COMSOL Multiphysics program and the temperatures occurring during the welding process on the surface of the carbon filament and the copper coating were determined. It was concluded that using ultrasonic welding technology it is possible to interconnect carbon tapes coated with copper. Experimental and theoretical results have shown that the presence of a copper coating on a carbon tape contributes to an increase in the quality of the carbon tape. As a result of calculations, it was found that the temperature of the copper coating is 3 % higher than that of the carbon filament.

Keywords: carbon fiber, carbon tape, copper coating, welding, electric field, heat load modeling

Углепластики широко применяются в качестве конструкционных материалов в различных отраслях промышленности, в том числе в авиационной, автомобилестроении, в ракетно-космическом производстве и др. при изготовлении силовых элементов, несущих панелей и многих других деталей, от которых требуется сочетание высокой прочности, легкости, термостойкости и долговечности [1–3]. Сложные условия эксплуатации изделий из углепластиков и постоянно повышающиеся требования по повышению их надежности приводят к не-

обходимости совершенствования эксплуатационных характеристик существующих материалов [4–6].

Одним из современных методов придания углепластикам новых свойств является использование углеродных тканей (лент) с предварительно нанесенным на них металлическим покрытием. Основной целью модернизации является изменение физико-химических свойств поверхности углеродных тканей, что позволяет регулировать их теплофизические свойства [7–9]. Создание углепластиков с новым комплексом функ-

циональных свойств повысит конкурентоспособность изделий.

Авторами работ [10, 11] доказана эффективность применения медного покрытия для повышения теплопроводности углепластиков. В настоящей работе, для нанесения на поверхность углеродной ленты медного покрытия, использована вакуумная технология магнетронного распыления [12], суть которой состоит в том, что атомы напыляемого металла выбиваются из мишени ионами аргона и переносятся на поверхность углеродной ленты, где формируется твердое металлическое тонкопленочное покрытие.

Нанесение на поверхность углеродных лент медного покрытия позволяет использовать сварочные технологии для их соединения между собой. Использование сварки для соединения между собой армирующих материалов приведет к повышению прочности при межслоевом сдвиге, что в перспективе позволит применять вместо органических связующих – неорганические, основным преимуществом которых являются существенно большие значения рабочих температур, которые могут достигать 1000 °С [13], тогда как термостойкость углепластиков на органических связующих, как правило, не превышает 250 °С.

Однако для проведения сварки необходимо знать тепловые нагрузки, при которых, с одной стороны, не будет происходить расплавление медного покрытия на поверхности углеродной ленты, а с другой стороны, будут обеспечиваться условия возникновения сварного шва (или сварной точки).

Цель работы: исследование влияния электрического поля на углеродные ленты с медным покрытием.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследований выбрана углеродная лента FibArm Tape-230|300 (ТУ 1916-018-61664530-2013), толщиной 0,21 мм. Для нанесения на углеродную ленту медного покрытия использовалась отечественная промышленная установка магнетронного распыления ММР-1800М [7, 12]. В качестве мишени использовалась медь марки М1. Напыление проводили при следующих режимах: ток магнетрона 10 А; напряжение 300 В. Общая продолжительность напыления медного покрытия на рулон углеродной ленты длиной 25 м составила 5,5 ч: установка рулона с лентой в машину – 0,3 ч, создание вакуума – 3 час, напыление с использованием двух магнетронов – 2,2 ч. При использовании четырех магнетронов продолжительность напыления сокращается в два раза. Перед металлизацией на этой же машине проводили плазменную обработку углеродной ленты, что позволило не только повысить адгезионную прочность между углеродной лентой и покрытием, но и снизить значения среднеквадратических отклонений всех измеряемых характеристик.

Работа состояла из экспериментальной и теоретической части.

В экспериментальной части определяли механические характеристики элементарных нитей до и после нанесения на углеродную ленту медного покрытия. Оценку механических характеристик проводили на разрывной машине Zwick/RoellZ010. Для определения прочности элементарной нити и величины ее относительного удлинения использовали бумажные рамки, в которые клеивалась элементарная нить. После закрепления бумажной рамки в захваты разрывной машины рамка разрезалась и проводились испытания элементарных нитей на растяжение. Для определения средних значений прочности, величины относительного удлинения и значений диаметров элементарных нитей испытывали не менее 20 образцов.

Измерение диаметра элементарной нити проводилось на поляризационном микроскопе МИН-8. Толщину слоя медного покрытия определяли с помощью атомно-силового микроскопа SOLVER 47PRO.

В экспериментальной части работы также отрабатывали технологию ультразвуковой сварки углеродных лент с медным покрытием между собой. Для проведения сварки использовали генератор ультразвука, волновод подсоединяли перпендикулярной плоскости сварного шва, динамическое усилие прикладывали со стороны излучателя. Сварку проводили на следующих режимах: сдвливающее усилие – 0,1кН; потребляемая мощность – 4–4,2 кВт; рабочее время сварки – 1,5 с.

Амплитуду механических колебаний при проведении ультразвуковой сварки варьировали от 10 до 30 мкм. В процессе сварки фиксировали значения температур, при которых происходило расплавление медного покрытия.

В теоретической части работы проводили расчет температурных полей в программе COMSOL Multiphysics, что позволило рассчитать температурные поля, возникающие в процессе сварки непосредственно в тонком слое медного покрытия.

Для моделирования влияния электрических полей была создана осесимметричная модель элементарной нити (рис. 1, а), состоящая из двух усеченных конусов, диаметр которых первоначально изменяется от 7 мкм до 6 мкм на длине 100 мкм, а затем снова расширяется до 7 мкм. Такая модель позволила изменить контур волокна таким образом, чтобы искусственно создать на нем участок с наибольшей концентрацией тепловых нагрузок. За счет уменьшения площади поперечного сечения на этом участке будет возрастать плотность тока, что и приведет к возрастанию температур. В качестве основного критерия использовались не абсолютные значения температур, а их относительная величина, т.е. разница между температурой на участке с наименьшей площадью и торцами.

При моделировании были использованы геометрические характеристики элементарных нитей углеродной ленты FibArm Tape-230|300, на которой находилось покрытие из меди, толщиной 100 нм (рис. 1, б, в). Для моделирования использовалась неструктурированная расчетная сетка с тетраэдрическими элементами от 100 до 300 нм.

Для моделирования медного покрытия использовалась тетраэдрическая расчетная сетка, с размером одного элемента 60 нм. При создании конечно-элементной модели были использованы следующие допущения:

- между элементарной нитью и медным покрытием имеет место полное прилегание;
- медное покрытие по всему периметру элементарной нити имеет одинаковую толщину;

- элементный состав медного покрытия не содержит примесей и является единым для всех элементарных нитей;
- подводимое тепло полностью расходуется на нагрев и не рассеивается в окружающую среду.

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 1 приведены результаты механических испытаний элементарных нитей до и после нанесения на них медного покрытия.

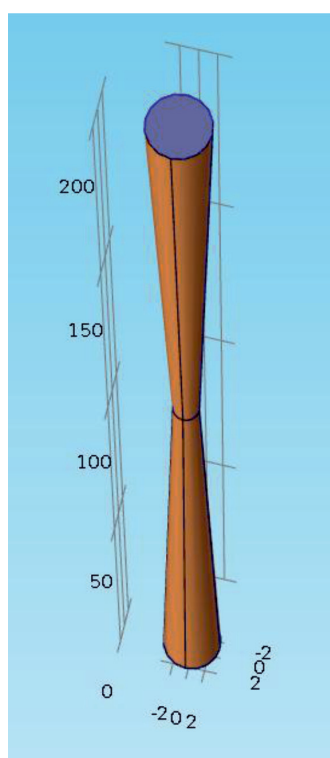
В результате проведенных механических испытаний установлено, что величина разрушающего напряжения элементарной нити, при нанесении на углеродную ленту медного покрытия увеличилась на 44%. Величина диаметра элементарной нити,

при нанесении на углеродную ленту медного покрытия, увеличилась всего на 1,2%. Очень существенно изменилась величина среднеквадратического отклонения при испытании элементарных нитей с медным покрытием. Дисперсия разрушающего напряжения снизилась в 6,2 раза, а дисперсия диаметра – в 2,16 раз. Таким образом, нанесение медного покрытия приводит не только к повышению механической прочности элементарной нити более чем на 40%, но и снижает более чем в 6 раз характеристики дисперсии. Это позволяет предположить, что наличие на углеродной ленте медного покрытия способствует повышению качества углеродной ленты.

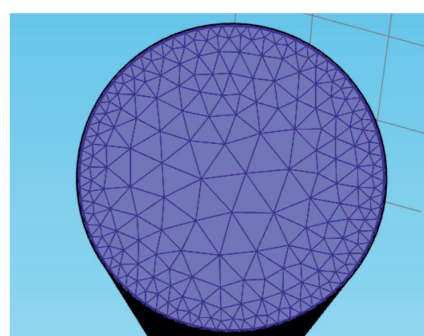
Таблица 1

Свойства элементарных нитей до и после нанесения медного покрытия

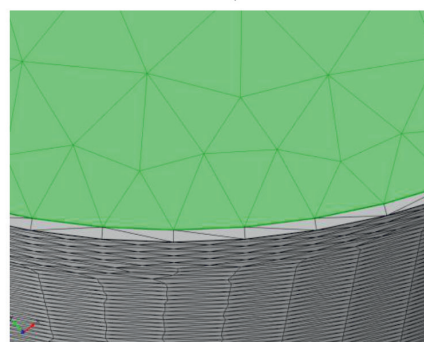
Характеристики	Тип металлического покрытия	Значение показателя	Дисперсия
Разрушающее напряжение, МПа	Без покрытия	3110	870
Относительное удлинение, %		2,05	0,62
Диаметр, нм		8610	260
Разрушающее напряжение, МПа	Медное покрытие	4490	140
Относительное удлинение, %		1,9	0,5
Диаметр, нм		8710	120



а)



б)



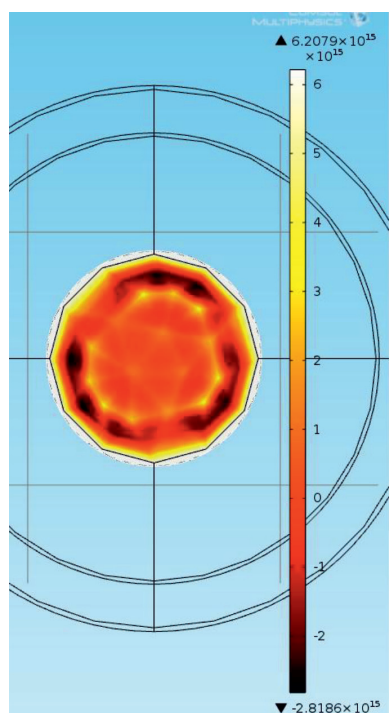
в)

Рис. 1. Осесимметричная модель элементарной нити (а), конечно-элементная модель элементарной нити (б) и металлического покрытия (в) на элементарной нити

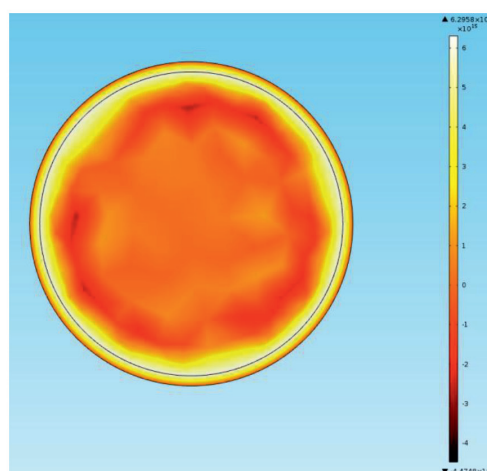
Таблица 2

Значения температур, при которых происходило расплавление медного покрытия на углеродной ленте

Частота, КГц	Температура на поверхности медного покрытия, °С	Качественная оценка структуры медного покрытия	Содержание меди, %
10	280	Структура однородная	84
15	325	Наличие единичных дефектов	68
20	370	Наличие небольших дефектов	37
25	446	Наличие множественных дефектов	15
30	500	Структура полностью повреждена	0



а)



б)

Рис. 2. Результаты моделирования тепловых полей при воздействии электрического излучения на элементарную углеродную нить с покрытием, при толщине покрытия из меди 100 нм (а) и 300 нм (б)

При проведении ультразвуковой сварки оценивали изменение температуры на поверхности медного покрытия в зависимости от частоты. Полученные данные приведены в табл. 2.

В результате проведенных исследований установлено, что имеет место существенное уменьшение температуры, при которой происходит плавление медного покрытия (с 1083 °С до 500 °С).

Результаты теоретических исследований тепловых полей частично приведены на рис. 2 и показаны в табл. 3.

В процессе моделирования использовались следующие режимы:

– продолжительность воздействия электрического тока 0,1 с;

– напряжение на одном из торцов углеродной нити 106 В;
– свободный торец углеродного волокна заземлен.

Таблица 3

Результаты моделирования температур

Условия моделирования	Значения температур T, °С	
	углеродной нити	медного покрытия
Разность потенциалов на концах волокна U, В		
1	49,95	50,75
2	139,95	143,15
3	289,95	296,95
3,5	387,45	397,05
4	499,95	512,45
5	769,85	789,45

Анализ полученных результатов показывает нелинейный рост температур углеродной элементарной нити и тонкой пленки меди в зависимости от приложенной разности потенциалов. Разница в температурах между ними не превышает 3%.

Выводы

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что величина разрушающего напряжения элементарной нити, при нанесении на углеродную ленту по технологии магнетронного распыления медного покрытия, увеличилась на 44%, а величина среднеквадратического отклонения снизилась более чем в 6 раз, что позволяет предположить, что наличие на углеродной ленте медного покрытия способствует повышению качества углеродной ленты.

С помощью технологии ультразвуковой сварки возможно соединить между собой углеродные ленты с нанесенным на них медным покрытием. В процессе сварки было установлено, что имеет место расплавление медного покрытия при температурах выше 370 °С, что существенно ниже, чем у монолитного материала. В результате расчетов было установлено, что температура тонкой пленки меди на 3% выше, чем у нагретого углеродного волокна.

Список литературы

1. Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. Полимерные композиционные материалы. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010. 352 с.
2. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. 2017. № 3 (95). С. 97–105.
3. Цибизова Т.Ю., Гузева Т.А. Системы автоматического управления технологическими процессами отверждения изделий из полимерных композитов // Клеи. Герметики. Технологии. 2015. № 5. С. 35–40.
4. Баурова Н.И., Зорин В.А. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учеб. пособие. М.: МАДИ, 2016. 264 с.
5. Баурова Н.И., Зорин В.А. Технологическая наследственность при производстве деталей машин из полимерных композиционных материалов: монография. М.: МАДИ, 2018. 220 с.
6. Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги: уч. пособие / Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2017. 472 с.
7. Берлин Е.В., Сейдман Л.А. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии. М.: Техносфера, 2010. 528 с.
8. Гайнутдинов Р.Ф., Гайсин А.Ф. К вопросу применения низкотемпературной плазмы для обработки текстильных материалов // Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т. 20. № 2. С. 72–73.
9. Гарифуллин А.Р. Исследование воздействия высокочастотного емкостного разряда, применяемого для повышения адгезионных взаимодействий в композиционных материалах, на рельеф и структуру углеродных волокон // Вестник Технологического университета. 2016. Т. 19. № 19. С. 104–105.
10. Нелюб В.А. Технология металлизации углеродных тканей и свойства углепластиков на их основе // Технология металлов. 2018. № 3. С. 7–10.
11. Нелюб В.А. Оценка влияния металлизации поверхности углеродных лент на механические характеристики элементарных нитей // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2018. № 4. С. 2–6.
12. Горберг Б.Л. Современное состояние и перспективы использования плазмохимической технологии для обработки текстильных материалов // Текстильная химия. 2003. № 1. С. 59–68.
13. Gorodetskii M.A., Nelyub V.A., Malysheva G.V., Shaulov A.Y., Berlin A.A. Technology of forming and the properties of reinforced composites based on an inorganic binder. Russian Metallurgy (Metally). 2018 (13). P. 1195–1198.