

УДК 678

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОДНЫХ ЛЕНТ ПОСЛЕ НАНЕСЕНИЯ НА ИХ ПОВЕРХНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Нелюб В.А.

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

В качестве армирующих наполнителей, при производстве деталей из полимерных композиционных материалов, широкое распространение получили углеродные ткани, ленты и волокна. Целью настоящей работы является разработка математических моделей, позволяющих прогнозировать напряженно-деформированное состояние элементарных нитей с металлическим покрытием. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований свойств элементарных нитей после нанесения на углеродные ленты марок Луп и Fibra металлических покрытий. Установлено, что при нанесении на углеродную ленту Луп покрытий из нержавеющей стали и меди имеет место повышение прочности элементарных нитей при растяжении, тогда как покрытия из алюминия, цинка и серебра приводят к уменьшению прочности. Значения относительного удлинения элементарных нитей при использовании всех исследованных покрытий снижаются. Разработаны модели элементарных нитей с различными типами металлических покрытий и проведено исследование напряженно-деформированного состояния в зависимости от толщины и типа нанесенного покрытия. Различия между теоретическими и экспериментальными результатами не превысили 5%. Сделан вывод о том, что разработка углепластиков с комплексом новых функциональных свойств позволит существенно повысить конкурентоспособность изделий. Такие материалы обеспечат повышение долговечности, снижение себестоимости и повышение эффективности использования углепластиков.

Ключевые слова: углеродная лента, напряженно-деформированное состояние, математическая модель, элементарная нить, металлическое покрытие, моделирование

ASSESSMENT OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CARBON TAPES AFTER DRAWING ON THEIR SURFACE OF METAL COATINGS

Nelyub V.A.

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

As reinforcing fillers, in the manufacture of parts from polymer composite materials, carbon fabrics, tapes and fibers are widely used. The purpose of this work is to develop mathematical models that allow predicting the stress-strain state of filaments with a metallic coating. The results of theoretical and experimental studies of the properties of elementary filaments after deposition of metallic coatings on Loop and Fibra carbon tapes are presented. It has been established that when coating Loop coatings made of stainless steel and copper on carbon tape, an increase in the strength of filaments under tension takes place, while coatings made of aluminum, zinc and silver lead to a decrease in strength. The values of the relative elongation of the elementary filaments with the use of all investigated coatings are reduced. The models of elementary filaments with various types of metallic coatings have been developed and a study of the stress-strain state depending on the thickness and type of the applied coating has been carried out. The differences between the theoretical and experimental results did not exceed 5%. It was concluded that the development of carbon plastics with a complex of new functional properties will significantly improve the competitiveness of products. Such materials will provide increased durability, cost reduction and increased efficiency in the use of carbon plastics.

Keywords: carbon tape, stress-strain state, mathematical model, elementary thread, metal coating, modeling

В качестве армирующих наполнителей, при производстве деталей из полимерных композиционных материалов широкое распространение получили углеродные ткани, ленты и волокна [1, 2]. По своим удельным характеристикам они в десятки раз превышают алюминийевые и титановые сплавы. Области применения углепластиков с каждым годом постоянно расширяются, что связано с их уникальными механическими и теплофизическими характеристиками. Большое разнообразие углеродных волокнистых наполнителей и сложные эксплуатационные

условия, при которых эксплуатируются композитные конструкции, приводят к необходимости совершенствования эксплуатационных характеристик существующих материалов, что порождает проблематику расширения комплекса их свойств [3–5].

Для модификации свойств углеродных тканей используются различные технологии: окисление, аппретирование, гальваническая обработка и др. Одним из методов регулирования свойств композитов на основе углеродных наполнителей является технология металлизации [6, 7].

В работах [8, 9] показано, что для регулирования свойств композитов на основе углеродных наполнителей также может быть использована технология металлизации, которую чаще всего проводят, используя такие металлы, как никель, железо, молибден, цирконий, алюминий и медь. Основной целью металлизации является изменение физико-химических свойств поверхности углеродных наполнителей, что позволяет регулировать их реакционную способность, биосовместимость и теплофизические свойства и др. Традиционным способом регулирования теплопроводности полимерных материалов является использование металлических порошкообразных наполнителей [10–12]. В настоящей работе вместо дисперсных теплопроводных наполнителей использовались углеродные ленты, на которые методом магнетронного распыления наносили различные металлические покрытия. Свойства металлизированных углеродных тканей и углепластиков на их основе исследуются экспериментальными методами, которые являются трудоемкими и дорогостоящими. Создание адекватных математических моделей позволит существенно сократить путь от идеи до опытно-конструкторского образца.

Целью настоящей работы является разработка математических моделей, позволяющих прогнозировать напряженно-деформированное состояние элементарных нитей с металлическим покрытием. Достоверность созданных моделей оценивали по результатам экспериментальных исследований путем проведения механических испытаний элементарных нитей до и после нанесения на углеродные ленты различных металлических покрытий.

Материалы и методы исследования

Задача создания математической модели элементарной углеродной нити, на поверхность которой нанесено тонкое металлическое покрытие, является актуальной, поскольку позволит моделировать поведение под нагрузкой самых различных систем. В настоящей работе рассматриваются углеродные ленты и ткани, однако даже для этого, казалось бы, ограниченного класса объектов, используются разные исходные материалы (на рис. 1 они названы – материальные объекты, в качестве которых могут быть использованы ПАН, пеки и др.).

Различные технологии производства также относятся к материальным объектам и различаются в зависимости от используемого оборудования, технологических режимов и т.д. В результате даже при условии использования в качестве исходного материала ПАН разные производители производят углеродные ткани и волокна, существенно различающихся между собой. Кроме внешней и внутренней технологических сред, на качество производимых волокон оказывает влияние рыночная конкуренция, которая среди про-

изводителей углеродных волокон очень велика, что во многом и заставляет их создавать собственные составы аппретов, технологии шликтования и т.д. Таким образом, создание адекватных моделей позволит существенно сократить путь от идеи до НИР и ОКР.

Еще в большей степени, чем свойства углеродных волокон, произведенные различными производителями, различаются свойства материалов, используемых в качестве металлических покрытий и технологии их нанесения. Проведение экспериментальных исследований требует больших затрат времени и средств.

При проведении моделирования напряженно-деформированного состояния элементарной нити с металлическим покрытием в работе использован метод решения обратных задач. Отличительной особенностью решения обратных задач (по сравнению с прямыми задачами) являлась разница в причинно-следственных связях. К причинным характеристикам, как правило [13], относят начальные и граничные условия. К следственным характеристикам относятся условия нагружения (полный набор этих показателей называют полем физических величин. Структура причинно-следственных связей при решении прямых и обратных задач показана на рис. 1. При решении прямых задач по причинным характеристикам определяют следственные характеристики. При решении обратных задач – наоборот, по заданным следственным характеристикам находят причины.

В настоящей работе была поставлена задача определения значений перемещений при известных величинах разрушающей нагрузке. Такая постановка задачи была связана с тем, что ранее [8, 9] экспериментально были найдены значения разрушающих напряжений и перемещений при заданных нагрузках. При решении прямых задач не ясно, будет ли происходить разрушение элементарных нитей при заданных величинах нагрузок. Такая неопределенность связана с тем, что нагрузки задаются случайным образом и в процессе моделирования полученные величины напряжений и перемещений могут быть сколь угодно большими. Если же решать обратную задачу (т.е. задавать такое значение нагрузки, при которой происходило разрушение исследуемого образца в процессе экспериментальных исследований), то появляется возможность сравнить ранее найденные значения перемещений (или же напряжений) с теми, что получены в результате расчетов.

Расчеты элементарной нити с покрытием проводили для металлических покрытий из нержавеющей стали и титана. Толщину покрытия изменяли от 50 до 200 нм. Модель элементарной углеродной нити (рис. 2) строили в программе SiemensNX, все расчеты проводили в программном комплексе NX/Nastran.

Достоверность созданных моделей оценивали по результатам экспериментальных исследований элементарных нитей. В качестве объектов исследования в работе использованы две углеродные ленты ЛУП и Fibra. Для нанесения на них металлических покрытий использовали установку магнетронного распыления МИР-2. В качестве мишеней применяли: медь марки М1, цинк Ц2, титан ВТ1-0, нержавеющей сталь 12Х18Н10Т, алюминиевый сплав АМц и серебро 99,99.

Механические испытания элементарных нитей с различными типами металлических покрытий проводили на универсальной испытательной машине марки Zwick/Roell.

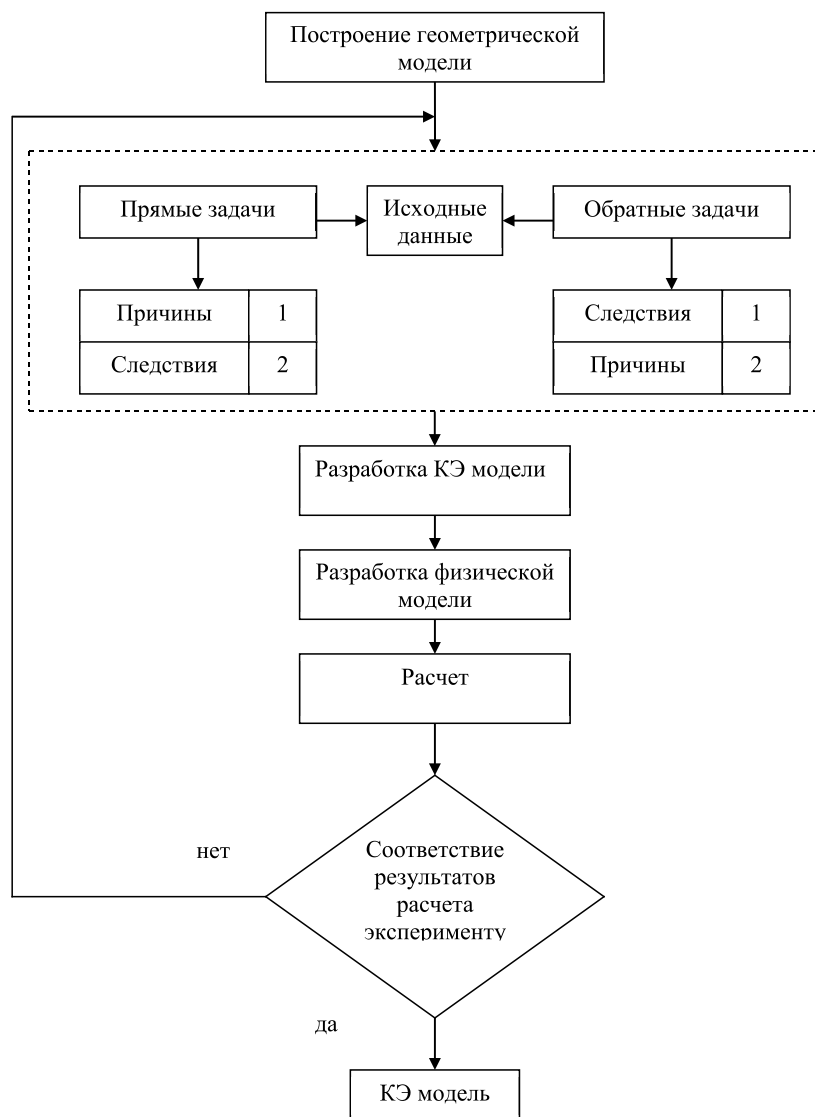


Рис. 1. Структура процесса решения прямых и обратных задач

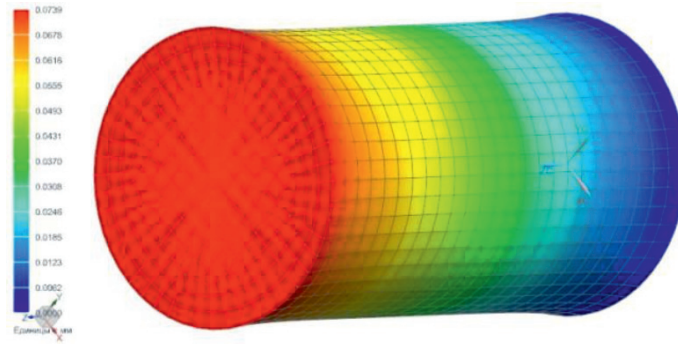
Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 1 приведены результаты экспериментальных исследований прочности элементарных нитей до и после нанесения на углеродные ленты металлических покрытий.

Из полученных результатов экспериментальных исследований следует, что прочность элементарных нитей, в зависимости от типа наносимого металлического покрытия, может как увеличиваться, так и уменьшаться. Например, при нанесении на углеродную ленту ЛУП в качестве покрытия титана, цинка, алюминия и серебра имеет место снижение прочности элементарных нитей на 13,7; 15,6; 28,9 и 25,5%

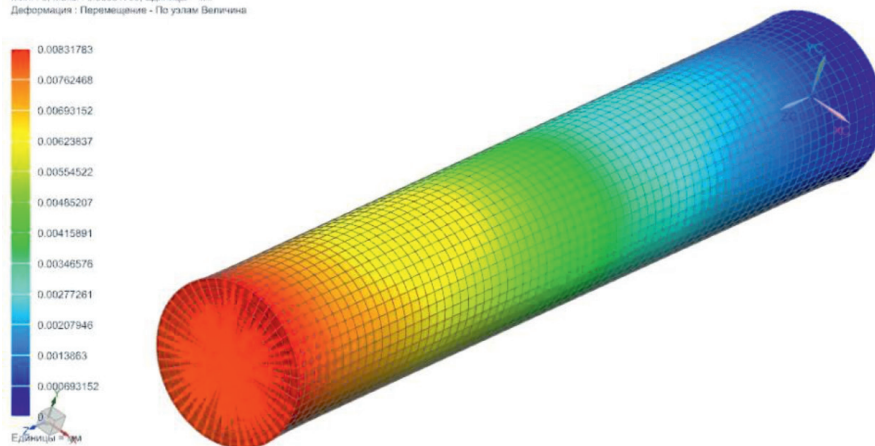
соответственно. В то же время, при нанесении покрытия из нержавеющей стали и меди имеет место повышение прочности элементарных нитей на 6,7% и 6% соответственно. Для углеродной ленты Fibra металлические покрытия из нержавеющей стали, титана, меди и серебра приводят к повышению прочности элементарных нитей на 54, 44, 47 и 26% соответственно, тогда как покрытия из цинка и алюминия, наоборот, ее уменьшают на 18% и 30% соответственно.

Для углеродных лент марок Луп и Fibra, независимо от нанесенного металлического покрытия, имеет место снижение деформационных характеристик элементарных нитей.



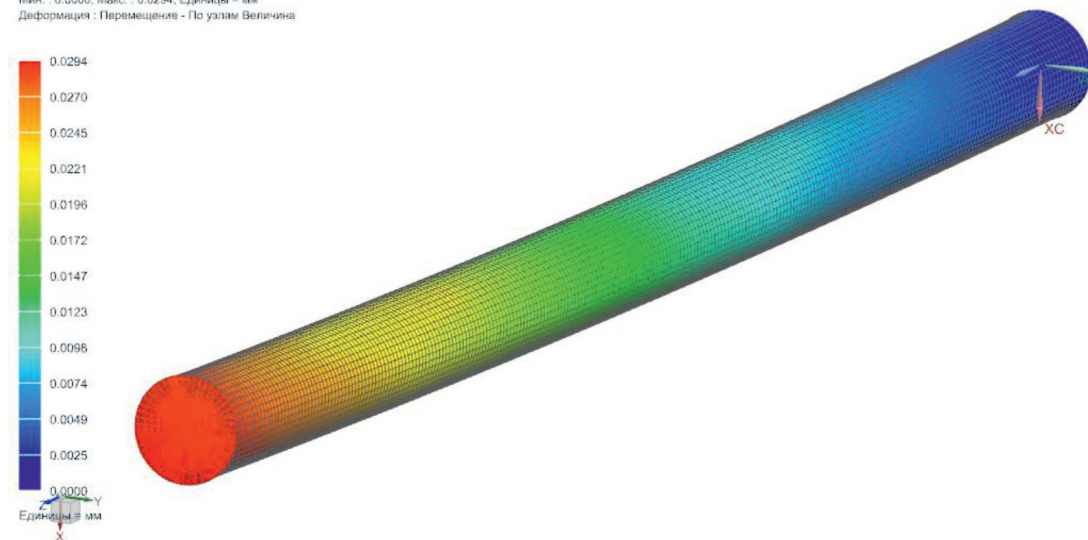
а)

Нить 30_sim1 : Solution 1 Результат
Subcase - Static Loads 1, Статический шаг: 1
Перемещение - По узлам, Величина
Мин.: 0, Макс.: 0.00831783, Единицы = мм
Деформация: Перемещение - По узлам Величина



б)

Нить 100_sim1 : Solution 1 Результат
Subcase - Static Loads 1, Статический шаг: 1
Перемещение - По узлам, Величина
Мин.: 0.0000, Макс.: 0.0294, Единицы = мм
Деформация: Перемещение - По узлам Величина



в)

Рис. 2. Результаты расчета перемещений элементарной нити, длиной 10 мм (а), 30 мм (б) и 100 мм (в)

Таблица 1

Свойства элементарных нитей до и после нанесения металлических покрытий

Материал покрытия	Разрушающее напряжение, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %
Углеродная лента ЛУП		
Без покрытий	1773	0,78
Нержавеющая сталь	1893	0,73
Титан	1529	0,60
Медь	1881	0,72
Цинк	1397	0,59
Алюминий	1260	0,74
Серебро	1320	0,77
Углеродная лента Fibra		
Без покрытий	3010	1,96
Нержавеющая сталь	4640	1,88
Титан	4360	1,84
Медь	4430	1,95
Цинк	2460	1,93
Алюминий	2120	1,95
Серебро	3810	1,94

Таблица 2

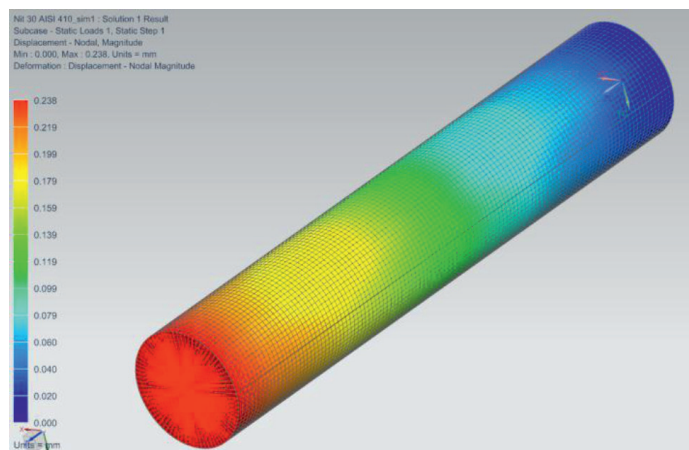
Значения перемещений, % по длине элементарной нити при разных нагрузках

Длина элементарной нити, на которой фиксировали значение перемещений, от общей длины, %	Длина элементарной нити, мкм		
	10	30	100
100	0,026	0,028	0,029
90	0,024	0,025	0,027
80	0,022	0,023	0,025
70	0,020	0,021	0,022
60	0,018	0,018	0,020
50	0,015	0,016	0,017
40	0,013	0,014	0,015
30	0,011	0,012	0,012
20	0,009	0,009	0,010
15	0,007	0,007	0,007
10	0,004	0,005	0,005
5	0,002	0,002	0,003
0	0,000	0,000	0,000

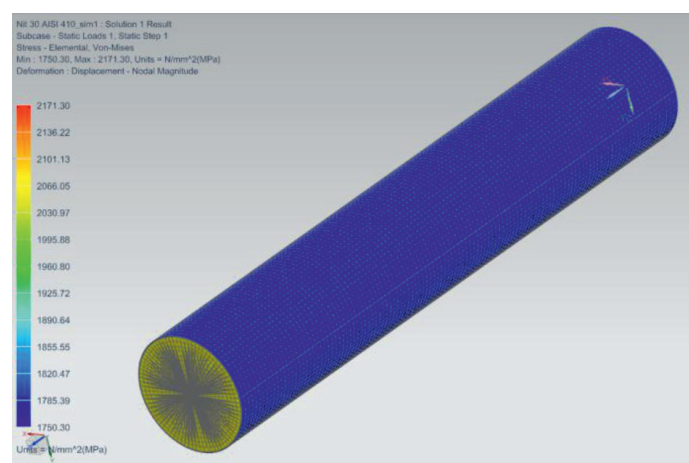
Теоретические оценки напряженно-деформированного состояния элементарных нитей проводили по величине перемещений. Первоначально была построена модель элементарной нити без покрытия. При построении геометрической модели полагали, что диаметр элементарной нити равен 10 мкм, ее длину варьировали от 10 до 100 мкм. Для модели нити был использован трехмерный тип сетки, размер конечного элемента составил 250 нм. К модели прикладывали нагрузку 200 сН в виде распределенной растягивающей силы. С противоположной стороны образца использовалась заделка. Результаты расчетов показаны в табл. 2 и частично на рис. 2. Значения длин элементарных нитей, на которых фиксировались значения перемещений, указан-

ных в процентах в табл. 2, соответствует различным цветам, которыми показаны соответствующие значения перемещений по длине образцов на рис. 2.

В результате проведенных расчетов установлено, что при увеличении длины элементарной нити, значения перемещений по своей абсолютной величине не изменяются, а только перераспределяются по его длине. Величина удлинения, при которой происходит разрыв элементарной нити, составляет 0,78% (табл. 1), что соответствует результатам экспериментальных исследований. При построении модели элементарной нити с металлическим покрытием размер конечных элементов уменьшили до 25 нм. Для расчетов использовали данные, приведенные в табл. 3.



а)



б)

Рис. 3. Результаты расчета перемещений (а) и напряжений (б) элементарной нити с покрытием из нержавеющей стали, при толщине покрытия 50 нм

Таблица 3

Характеристики элементарных нитей с покрытием из нержавеющей стали

Показатели	Толщина покрытия, нм		
	50	100	200
Модуль Юнга, ГПа	282	299	332
Линейная плотность, текс	5,7	6,5	8

Результаты расчета перемещений, проведенные для элементарной нити с покрытием из нержавеющей стали и титана при толщине 50, 100 и 200 нм, приведены в табл. 3 и частично показаны на рис. 3.

Погрешность определяли путем сравнения результатов теоретических и экспериментальных исследований (табл. 1 и табл. 4). Если предположить, что толщина покрытия на элементарной нити составляет 100 нм, то в этом случае погрешность для покрытия из

нержавеющей стали составит 4,1 и 5% для покрытия из титана. Аналогичным образом определим значения перемещений для покрытий из цинка, алюминия, серебра и меди.

Таблица 4

Теоретические значения перемещений в зависимости от толщины и типа металлического покрытия на углеродной ленте Луп

Тип металлического покрытия	Толщина металлического покрытия, нм	Перемещение, %
Без покрытия		0,78
Нержавеющая сталь	50	0,76
	100	0,72
	200	0,64
Титан	50	0,69
	100	0,63
	200	0,54

Созданные теоретические модели элементарных нитей позволяют расчетным путем оценивать значения перемещений в зависимости от толщины нанесенного покрытия. Чем больше толщина, тем ниже деформационные характеристики элементарных нитей, больше модуль упругости и выше величина линейной плотности.

Выводы

В результате проведенных исследований экспериментально определены свойства элементарных нитей, из которых изготовлены углеродные ленты ЛУП и Fibra до после нанесения на них различных металлических покрытий. Установлено, что после нанесение покрытий имеет место изменение механических свойств элементарных нитей. При нанесении на углеродную ленту ЛУП в качестве покрытия титана, цинка, алюминия и серебра имеет место снижение прочности элементарных нитей на от 13,7 до 28,9%, а при нанесении покрытия из нержавеющей стали и меди имеет место повышение прочности элементарных нитей на 6%. Существенно более высокое изменение прочности элементарных нитей при нанесении металлических покрытий имеет место при использовании углеродной ленты Fibra, для которой металлические покрытия из нержавеющей стали, титана, меди и серебра приводят к повышению прочности элементарных нитей на 54%, 44%, 47% и 26% соответственно.

Создана модель элементарной нити с покрытием, которая позволила провести оценку напряженно-деформированного состояния в зависимости от толщины нанесенного покрытия. Установлено, что покрытия оказывают незначительное влияния на напряженно-деформированное состояние элементарной нити, приводят к его изменению (менее 2%) при толщине 50 нм и не более 5% при толщине 200 нм. Созданные модели позволяют проводить выбор типа и толщины металлического покрытия.

Разработка углепластиков с комплексом новых функциональных свойств позволит существенно повысить конкурентоспособность изделий. Такие материалы обеспечат

повышение долговечности, снижение себестоимости и повышение эффективности использования углепластиков.

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» по заданию № 11.7291.2017/БЧ.

Список литературы

1. Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. Полимерные композиционные материалы. Долгосрочный: 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. DOI: 10.22204/2410-4639-2017-095-03-97-105.
3. Гузева Т.А., Цибизова Т.Ю. Системы автоматического управления технологическими процессами отверждения изделий из полимерных композитов // Клеи. Герметики. Технологии. 2015. № 5. С. 35–40.
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. Особенности оценки теплостойкости полимерных связующих // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2013. № 4. С. 42–45.
6. Берлин Е.В., Сейдман Л.А. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии. М.: Техносфера, 2010. 528 с.
7. Берлин Е.В., Сейдман Л.А. Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением. М.: Техносфера, 2014. 256 с.
8. Нелоб В.А. Технология металлизации углеродных тканей и свойства углепластиков на их основе // Технология металлов. 2018. № 3. С. 7–10.
9. Нелоб В.А. Оценка влияния металлизации поверхности углеродных лент на механические характеристики элементарных нитей // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2018. № 4. С. 2–6.
10. Баурова Н.И., Зорин В.А. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учеб. пособие. М.: МАДИ, 2016. 264 с.
11. Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги: учеб. пособие. М.: Изд-во ВИАМ, 2017. 472 с.
12. Полилов А.Н. Экспериментальная механика композитов: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 375 с.
13. Алифанов О.М. и др. Основы идентификации и проектирования тепловых процессов и систем: учеб. пособие. М.: Логос, 2001. 399 с.