

**НОВЫЕ МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СВОЙСТВ УГЛЕРОДНЫХ ТКАНЕЙ:  
ПОЛУЧЕНИЕ, ОПТИМИЗАЦИЯ, ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

**NEW METHODS FOR REGULATING THE PROPERTIES OF CARBON FABRIC:  
PRODUCTION, OPTIMIZATION, OPERATIONAL CHARACTERISTICS**

В.А. Нелюб

V.A. Neluyb

Московский государственный технический университет

имени Н.Э. Баумана

Bauman Moscow State Technical University

Email: [mail@emtc.ru](mailto:mail@emtc.ru)

Приведены результаты оценки качества металлических покрытий, нанесенных на углеродные ленты методом магнетронного распыления. Рассмотрены три типа металлических покрытий: нержавеющая сталь 12X18H10T, титан VT1-0 и медь M1. Проведены результаты многокритериальной оптимизации толщины металлического покрытия, установлено, что оптимальной является толщина 100 нм. Приведены результаты оценки электропроводности углеродных лент с металлическим покрытием и характеристики прочности углепластиков при межслоевом сдвиге. Показано, что при использовании углеродных лент с металлическим покрытием имеет место повышение этих характеристик на 30-50%.

**Ключевые слова:** углеродная лента; металлические покрытия; прочность; электропроводность; теплопроводность.

The results of quality assessment of metal coatings deposited on a carbon tape by magnetron sputtering are presented. Three types of metal coatings are considered: stainless steel 12X18H10T, titanium VT1-0 and copper M1. The results of multicriteria optimization of the thickness of the metal coating were carried out, it was found that the optimum thickness is 100 nm. The results of evaluating the electrical conductivity of carbon tapes with a metal coating and the characteristics of the strength of carbon plastics during interlayer shear are presented. It is shown that when using carbon tapes with a metal coating, there is an increase in these characteristics by 30-50%.

**Key words:** carbon tape; metal coatings; strength; electrical conductivity; thermal conductivity.

Области применения полимерных композиционных материалов (ПКМ), в первую очередь – углепластиков, с каждым годом постоянно расширяются, что связано с их уникальными механическими и теплофизическими характеристиками [1]. Необходимость совершенствования эксплуатационных характеристик существующих ПКМ порождает проблематику расширения комплекса их свойств.

Для модификации свойств углеродных тканей используются самые различные технологии и одним из эффективных методов регулирования их свойств является технология металлизации [2]. Основной целью металлизации является изменение микроструктуры, топологии и физико-химических свойств поверхности углеродных тканей, что позволяет регулировать их реакционную способность, тепло- и электрофизические свойства, биосовместимость и многие др.

Разработка углепластиков с комплексом функциональных свойств позволит существенно повысить конкурентоспособность изделий. Такие материалы обеспечат повышение долговечности, снижение себестоимости и повышение эффективности использования углепластиков. Наибольшее распространение при нанесении металлических покрытий на ткани получили технологии напыления. Основной целью металлизации является изменение микроструктуры и физико-химических свойств поверхности углеродных лент и тканей, что позволяет регулировать их реакционную способность, теплофизические свойства, биосовместимость и др. В настоящей работе для напыления использована лабораторная установка МИР-2 [2].

Целью работы является оценка свойств углеродных лент с металлическими покрытиями и свойства углепластиков на их основе.

Металлические покрытия наносили на отечественную и импортную однонаправленную углеродную ленту марок ЛУП и FibArmTape-230/300 с использованием лабораторной установки магнетронного распыления МИР-2.

В качестве мишеней применяли: нержавеющую сталь марки 12Х18Н10Т, титан ВТ1-0, медь марки М1 (табл. 1).

Таблица 1  
Химический состав металлических покрытий

Содержание химических элементов, %								
Медь марки М1								
Cu+Ag	Fe	Ni	S	As	Pb	Zn	O	Sb
99,9	0,005	0,002	0,004	0,002	0,005	0,004	0,05	0,002
Титан марки ВТ1-0, ГОСТ 19807-91								
Ti	Fe		C		Si		Ni	
99,7	0,25		0,07		0,1		0,04	
Нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т								
Fe	C	S	Si	Ni	P	Cr	Ti	
67	0,12	0,02	0,8	11	0,035	19	1	

Определение оптимальных значений толщин металлических покрытий на углеродной ленте проводили методом идеальной точки. В качестве критериев оптимальности принимаемого решения использованы четыре показателя:  $x_1$  – адгезионная прочность, определенная методом pull-out ( $x_1 \rightarrow \max$ );  $x_2$  – линейная плотность ( $x_2 \rightarrow \min$ );  $x_3$  – себестоимость ( $x_3 \rightarrow \min$ );  $x_4$  – деформационные характеристики элементарных углеродных волокон ( $x_4 \rightarrow \max$ ) [3]. Толщину металлического покрытия принимали за пространство оптимизируемых параметров. Задача определения оптимальной толщины металлического покрытия формулируется как задача минимизации. В результате проведенных расчетов установлено, что оптимальной является толщина металлического покрытия, равная 100 нм.

Величину электрического сопротивления углеродной ленты определяли с помощью специального приспособления, которое представляло собой измерительную ячейку. В процессе измерений определяли величину электрического сопротивления образца углеродной ленты квадратной формы при приложении напряжения к двум противоположным сторонам измерительной ячейки.

Механические характеристики углепластика определяли по величине прочности углепластика при межслоевом сдвиге методом короткой балки по ASTM D 2344.

В качестве связующего, при изготовлении углепластиков, использовался состав из эпокси-диановой смолы ЭД-20, изометилтетрагидрофталевого ангидрида в качестве отвердителя в количестве 80 мас.ч. на 100 мас. ч. смолы и диэтиленгликоля – в качестве активного разбавителя в количестве 5 мас.ч. Формование образцов углепластиков проводили по технологии вакуумной инфузии [4].

Первоначально, после нанесения металлических покрытий на углеродную ленту определяли механические характеристики элементарных углеродных волокон (табл. 2).

Таблица 2

Свойства элементарных углеродных волокон 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
Углеродная лента FibArmTape-230/300		
Без покрытий	3010	1,96
Нержавеющая сталь	4640	1,88
Титан	4360	1,84
Медь	4430	1,95

Из полученных результатов экспериментальных исследований следует, что прочность элементарных углеродных волокон, в зависимости от типа наносимого металлического покрытия, может как увеличиваться, так и уменьшаться. Например, при нанесении на углеродную ленту ЛУП в качестве покрытия титана имеет место снижение прочности элементарных волокон на 13,7%. В то же время, при нанесении покрытия из нержавеющей стали и меди, имеет место некоторое повышение прочности элементарных углеродных волокон на 6,7% и 6% соответственно. Для углеродной ленты FibArmTape-230/300 металлические покрытия из нержавеющей стали, титана и меди приводят к повышению прочности элементарных нитей на 54%, 44% и 47% соответственно. Таким образом, в процессе металлизации не происходит повреждения элементарных углеродных волокон, однако их деформационные характеристики снижаются.

В табл. 3 приведены результаты испытаний углепластиков на межслоевой сдвиг.

Таблица 3

Прочность углепластиков при межслоевом сдвиге

Материал покрытия	Прочность при межслоевом сдвиге, МПа на углеродных лентах	
	ЛУП	FibArmTape-230/300
Без покрытия	46	49
Титан	61	68
Нержавеющая сталь	64	54
Медь	52	69

В результате проведенных исследований установлено, что при использовании углеродной ленты ЛУП имеет место повышение прочности при межслоевом сдвиге на 35%, 39% и 13% при нанесении покрытий из титана, нержавеющей стали и меди соответственно. При использовании углеродной ленты FibArmTape-230/300 имеет место повышение прочности при межслоевом сдвиге на 39%, 10% и 41% при нанесении покрытий из титана, нержавеющей стали и меди соответственно. Таким образом, металлизация позволила улучшить механические характеристики углепластиков.

Результаты определения характеристик удельного поверхностного электрического сопротивления углеродных лент с покрытием из нержавеющей стали и меди приведены в табл. 4. Чем выше характеристики электрического сопротивления, тем хуже электрические свойства, т.е. чем ниже электрическое сопротивление, тем выше проводимость.

Таблица 4

Характеристики удельного электрического сопротивления углеродных лент с покрытиями из нержавеющей стали и меди

Продолжительность напыления, мин	Величина поверхностного сопротивления, Ом для углеродных лент марок	
	ЛУП	FibArm Tape-230 300
Покрытие из нержавеющей стали		
Без металлического покрытия	1,2	2,9
1	1,0	2,7
3	0,9	2,5
5	0,85	2,2
7	0,8	2,0
10	0,78	1,9
Покрытие из меди		
Без металлического покрытия	1,2	2,9
1	0,8	2,1
3	0,75	1,9
5	0,7	1,7
7	0,65	1,5
10	0,6	1,3

Точность используемого оборудования для измерения величины удельного электрического сопротивления относительно не высока и составляет  $\pm 0,1$ , что не позволяет точно оценить разницу между влиянием продолжительности напыления в несколько минут. Однако, возможно установить общий характер закономерностей для двух типов исследованных металлических покрытий – чем больше продолжительность напыления, тем ниже характеристики электрического сопротивления. По сравнению с углеродными лентами без металлического покрытия, величина электрического сопротивления снижается на 35% при нанесении покрытия из нержавеющей стали и на 50% при нанесении покрытия из меди.

В результате проведенных исследований установлено, что при увеличении продолжительности процесса напыления металлического покрытия имеет место снижение величины электрического сопротивления для двух исследованных углеродных лент и двух типов металлических покрытий. Электропроводность углеродной ленты ЛУП как без металлического покрытия, так и с покрытием разной толщины) выше, чем для углеродной ленты FibArm Tape-230|300.

Металлизированная углеродная лента ЛУП использовалась в качестве армирующего материала при изготовлении ремонтных бандажей. Отличительной особенностью ремонтных технологий является переменный характер внешних условий, в которых проводят ремонт и для большой номенклатуры машин его выполняют на улице. Все виды ремонтных работ магистральных стальных трубопроводов для транспортировки нефти и газа также проводят только в полевых условиях. В качестве объекта исследований была использована прямошовная труба диаметром 820 мм с искусственно нанесенными по основному металлу дефектами. Испытания проводили при внутреннем давлении 2,5 МПа. Для испытаний были использованы трубы, находившиеся ранее в эксплуатации 40 и более лет. В результате проведенных исследований было установлено, что металлизация углеродной ленты позволяет существенным образом улучшить эксплуатационные характеристики ремонтных бандажей. Одновременно, на других образцах поврежденных трубопроводов, проводили испытания на герметичность. Через каждую из отремонтированных труб подавали холодную воду и если в течение 10 мин утечки воды не происходило, то вместо холодной воды подавали горячую с температурой  $+50^{\circ}\text{C}$ . В результате проведенных исследований

установлено, что нанесение металлических покрытий на углеродную ленту позволило обеспечить герметичность поврежденного фрагмента трубы. Применение обычной (не металлизированной) ленты не позволило создать герметичное соединение.

Одновременно с испытаниями на герметичность, оценивали прочность. В результате проведенных исследований установлено, что прочность соединений, изготовление которых проводилось без использования армирующей ленты при комнатной температуре на 16% выше, чем при отрицательных значениях температур. Если в качестве армирующих материалов использовать углеродную ленту, то прочность с металлизированной лентой всего на 5% выше, чем без металлизации при условии, что все операции по приготовлению, нанесению и отверждению клея проводились при комнатной температуре. Если проводить склеивание при отрицательных температурах, то усилие разрушения клеевых соединений, собранных с использованием металлизированной ленты на 27% выше, чем без металлизации.

Проведена оптимизация толщины металлического покрытия методом идеальной точки и установлено, что оптимальным является толщина 100 нм.

Металлические покрытия позволяют повышать величину прочности углепластиков при межслоевом сдвиге на 30%.

Разработана технология и проведены испытания ремонтных бандажей из углеродной ленты с покрытием из нержавеющей стали, отличающиеся тем, что все технологические операции, в том числе и приготовление и отверждение связующего проводили при отрицательных значениях температур. В результате проведенных исследований установлено, что нанесение металлических покрытий на углеродную ленту позволило обеспечить герметичность поврежденного фрагмента трубы.

Проведены изменения значений электропроводности углеродных лент в зависимости от продолжительности напыления. Установлено, что увеличение продолжительности процесса напыления металлического покрытия приводит к снижению величины электрического сопротивления для двух исследованных углеродных лент и двух типов металлических покрытий, т.е. металлизация позволила на 30-50% повысить электропроводность.

Результаты исследования получены частично в рамках гранта РФФИ №18-29-19034/18 «Разработка теоретических и технологических основ изготовления высокопрочных углепластиков с комплексом новых функциональных свойств на основе металлизированных волокон»

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баурова Н.И., Зорин В.А. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин / Учебное пособие. М. МАДИ, 2016. – 264 с.
2. Горберг Б.Л., Иванов А.А., Мамонтов О.В., Стегнин В.А., Титов В.А. Модифицирование текстильных материалов нанесением нанопокровтий методом магнетронного ионно-плазменного распыления // Российский химический журнал, 2011, Т.LV, №3, С.7-13.
3. Нелюб, В.А. Оптимизация технологических режимов изготовления деталей из углепластиков // Химическая промышленность сегодня. – 2018. – №6. – С.3-8.
4. Баурова Н.И., Зорин В.А. Технологическая наследственность при производстве деталей машин из полимерных композиционных материалов: монография. – М.: МАДИ. – 2018. – 220 с.