

PAPER

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕРОДНЫХ И БОРНЫХ ВОЛОКОН КАК АРМИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Бозоров Носиржон Содикович^{1,*}, Умуркулов Каюмжон Парпиевич²,
Нурматова Гулнорахан Адхамжан Кизи³

¹канд. физ-мат. наук, Профессор кафедры физики и астрономии. Кокандский государственный университет

² Преподаватель кафедры физики и астрономии. Кокандский государственный университет

³Магистрант 1-го курса Кокандского государственного университета

* bozorov@gmail.uz

Abstract

В статье рассматриваются физико-механические свойства углеродных и борных волокон, применяемых в качестве армирующих компонентов композиционных материалов. Приведены классификация волокон, особенности их структуры, методы получения и термообработки, влияние поверхностных покрытий на прочность и адгезию с матрицей. Отдельное внимание уделено различиям в механических характеристиках углеродных и борных волокон, их применению в конструкционных материалах и промышленной переработке.

Key words: углеродные волокна, борные волокна, армирующие материалы, композиционные материалы, термостойкость, модуль упругости, прочность.

Введение

Армирующие волокна являются важнейшими компонентами современных композиционных материалов, обеспечивая высокую прочность,

жесткость и термостойкость конструкций при минимальной массе. Среди них особое место занимают углеродные и борные волокна, отличающиеся уникальным сочетанием механических, термических и физико-химических

Compiled on: December 17, 2025.

Copyright: ©2025 by the authors. Submitted to *Advances in Science and Education* for possible open access publication under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution \(CC BY\) 4.0 license](#).

свойств. Эти волокна находят широкое применение в авиации, космической отрасли, судостроении и энергетике. Развитие технологий производства и обработки армирующих волокон позволяет создавать композиты с заданными свойствами, управлять коэффициентом теплового расширения и повышать долговечность материалов. Научное исследование структуры, механических характеристик и методов получения углеродных и борных волокон имеет ключевое значение для повышения эффективности их применения в конструкционных материалах.

Углеродные волокна. Свойства и классификация. Углеродные волокна обладают высокой теплостойкостью, низким коэффициентом трения и термического расширения, высокой стойкостью к химическим реагентам и атмосферным воздействиям, а также разнообразными электрофизическими свойствами (от полупроводников до проводников). Они характеризуются высокой удельной прочностью и модулем упругости.

Классификация углеродных волокон: Карбонизированные: температура термообработки 1173–2273 К, содержание углерода 80–90%.

Графитизированные: температура термообработки до 3273 К, содержание углерода выше 90%.

Исходные материалы и методы получения

Основные типы исходных материалов:

Химические волокна: вискозные или полиакрилонитрильные (ПАН). Углеродные пеки: смесь олигомерных продуктов, образующихся при перегонке нефти или каменного угля.

Процесс получения углеродных волокон из ПАН включает текстильную подготовку материала, окисление, высокотемпературную обработку (карбонизацию и графитизацию). Окисление способствует дегидрированию полимера, предотвращает усадку волокна и обеспечивает высокую ориентацию макромолекул. Высокотемпературная обработка проводится в вакууме или инертной среде (азот, гелий, аргон) и определяет конечные механические свойства волокна. Пековые волокна формируют путем пропускания расплава через фильеры диаметром 0,3 мм при температуре 370–620 К с последующим вытяжением. Карбонизация и графитизация про-

водятся аналогично ПАН-волокнам.

Структура и механические свойства. Углеродные волокна имеют фибриллярное строение с закрытыми иглоподобными порами, ориентированными вдоль оси волокна (доля пор достигает 33% объема). Структура волокна состоит из поверхностного слоя, высоко- и низкоориентированных зон, микрофибрилл и аморфного углерода. Углеродные волокна делят на:

Высокомодульные: $E = 300\text{--}700$ ГПа, $\sigma = 2\text{--}2,5$

Высокопрочные: $E = 200\text{--}250$ ГПа, $\sigma = 2,5\text{--}3,2$

Сочетание высокой прочности и модуля упругости обеспечивает стабильность характеристик при нагреве до 600 °С. Механические свойства некоторых высокопрочных и высокомодульных волокон приведены в таблице 1.

Таблица 1

Страна, марка	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг·м ⁻³	Диаметр d_f , мкм	Модуль упругости E , ГПа	Средняя прочность на базе 10 мм σ^* , ГПа	Предельная деформация ϵ^* , %
Россия					
ВМН-3	1,71	7,0	250	1,43	0,6
ВМН-4	1,71	6,0	270	2,21	0,8
ВЭН-210	—	9,9	343	1,47	0,4
Кулон	1,90	—	400–600	2,0	0,4
ЛУ-2	1,70	—	230	2,0–2,5	1,0
ЛУ-3	1,70	—	250	2,5–3,0	1,1
ЛУ-4	1,70	—	250	3,0–3,5	1,3
Урал-15	1,5–1,6	—	70–80	1,5–1,7	2,1
Урал-24	1,7–1,8	—	150–200	1,7–2,0	1,1
Эвур	1,6	—	150	2,0	1,3
США					
Торнел-300	1,77	7,0	238	3,15	1,3
Торнел-500	1,80	7,0	245	3,78	1,5
Торнел-600	1,80	7,0	245	4,20	1,7
Торнел-700	1,80	7,0	260	4,62	1,8
Торнел-800	1,80	6,0	273	5,46	2,0
Торнел-40	1,80	6,0	280	5,74	2,0

Таблица 2

Страна, Тип волокна	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг·м ⁻³	Диаметр d_f , мкм	Модуль упругости E , ГПа	Средняя прочность на базе 10 мм σ^* , ГПа	Предельное удлинение ϵ^* , %
США					
<u>Ayco</u> (B/W)	2,58	101	400	2,52	0,6
	2,50	143	390–400	3,47	0,9
	2,50	98	390–400	3,89	0,85
United Aircraft Corp. (B/W)	2,50	203	390–400	2,90	0,74
	—	144	—	3,06	—
Hamilton Ltd. division (B/W + SiC)	2,76	107	394–403	3,80	0,95
	2,76	147	400	3,30	0,80
Япония					
<u>Toshiba</u> (B/W)	2,5	97,2	363–386	3,74	1,0
	2,5	96,8	378–388	3,58	0,93
	2,5	99	374–393	3,23	0,84
Франция					
SMPE (B/W)	2,5	100±5	408	3,57	0,88
ФРГ					
Wacker-Chemie (B/W)	2,5	100±5	420	3,10	0,74
Россия					
B/W	2,5	95±3	394	2,95–3,5	0,75–0,9

Закключение

Углеродные и борные волокна являются высокоэффективными армирующими материалами для современных композиционных материалов. Их уникальные механические, термические и физико-химические свойства позволяют создавать легкие и прочные конструкции, способные работать в широком диапазоне температур и в агрессивных средах. Совершенствование методов получения, обработки поверхности и структуры волокон обеспечивает повышение прочности и долговечности композитов.

Список литературы

- Малкин Б.Н. Материаловедение композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 2018.
- Перхин В.В., Смирнов Л.К. Стеклопластики и их применение. – СПб.: Профессия, 2019.
- Jones R.M. *Mechanics of Composite Materials*. Taylor Francis, 2017.
- Hull D., Clyne T.W. *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge University Press, 2019.
- Плеханов И.М. Стекланные волокна: свойства, получение и переработка. – Новосибирск: Наука, 2020.
- The zone of damage for high-modulus materials in explosion-loaded granite AM Leksovskij, VA Borovikov, NS Bozorov, AA Abdumanonov, AB Sinani, ... *Technical Physics Letters* 28 (8), 705–706
- Зона поврежденности высокомодульных материалов при взрывном нагружении гранита AM Лексовский, ВА Боровиков, НС Бозоров, АА Абдуманонов, ... *Письма в ЖТФ* 28 (16)
- Obnaruzhenie mikrotreshhin v obrazcah gornyh porod s pomoshh'ju ljuminescentnoj mikroskopii AM Leksovskij, VA Borovikov, NS Bozorov, AA Abdumanov Pis' ma v Zhurnal tehnikeskoj fiziki–JETP Letters 22 (3), 6–10
- Обнаружение микротрещин в образцах горных пород с помощью люминесцентной микроскопии AM Лексовский, ВА Боровиков, НС Бозоров, АА Абдуманонов *Письма в ЖТФ* 22 (3), 6–9
- Observation of microcracks in rocks by means of luminescence microscopy AM Leksovskij, VA Borovikov, NS Bozorov, A Abdumanonov *Technical Physics Letters* 22 (2), 93–94
- The influence of external factors on the mechanical Properties of the material Bozorov N. S, Umurkulov K. P. *Central asian journal of mathematical theory and computer sciences* <https://Cajmtcs.Centralasianstudies.Org>, 123–127
- Boundary separation and binding energy of atoms in the real surface of a solid Bozorov N.S. Umurkulov K.P. Alisherov O. A. *Galaxy international interdisciplinary research journal (giirj) issn (e): 2347–6915 vol. 10, issue 12, dec. (2022) 65–67*
- Formation of ideas about micromechanics destruction in the process of teaching a physics course Bozorov N.S. Umurkulov K.P. Alisherov O. A. *Galaxy international interdisciplinary research journal (giirj) issn (e): 2347–6915 vol. 10, issue 12, dec. (2022) 60–64*
- Some aspects of surface processes on a solid body Bozorov N.S. Umurkulov K.P. Alisherov O. A. *Galaxy international interdisciplinary research journal (giirj) issn (e): 2347–6915 vol. 10, issue 12, dec. (2022) 78–80*
- Кинетика поверхностных процессов на твердом теле Bozorov N.S. Umurkulov K.P. Alisherov O. A *Ta'lim jarayoniga raqamli texnologiyalar va zamonaviy usullarni joriy etishda ta'lim sifatini boshqarish muammolari*.