ПРИМЕНЕНИЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ПОРОД ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА НАПОЛНИТЕЛЕЙ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

DESIGN OF CONSTRUCTION OF A SPORTS COMPLEX

УДК 67.03;67.06

Аносов Владислав Вячеславович, Студент магистратуры 2 курс, факультет «Специальное машиностроение», Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана, Россия, г. Москва

Ахылбек Санжар, Студент магистратуры 1 курс, факультет «Специальное машиностроение», Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана, Россия, г. Москва

Anosov Vladislav Vyacheslavovich, (vladislav.anosov@gmail.com)

Akhylbek Sanzhar, (sanzhar.akhylbek@mail.ru)

Аннотация: Интерес к использованию базальта в качестве наполнителя для композиционных материалов вырос за последнее десятилетие. Такой интерес связан с тем, что изделия из данного материала сочетают в себе физико-химические и механические свойства, а также хорошую технологичность и экономичность соответствующих технологий производства, благодаря которым могут конкурировать с распространенными изделиями из стекловолокна. Исследования показывают, что материалы на основе базальтового волокна могут быть полезны для ряда конструкционных применений в аэрокосмической, судостроительной и строительной сферах. Значительная сырьевая база указывает на перспективы использования базальта. Целью данной статьи является обзор прочностных исследований базальтовых волокон и

существующих месторождений сырьевой сегмента, анализ химического состава базальтового сырья.

Annotation: In recent decades, there has been a growing interest in the use of basalt as a filler for composite materials. Such interest is due to the fact that products made of this material combine physical, chemical and mechanical properties, as well as good manufacturability and cost-effectiveness of the corresponding production technologies, thanks to which they can compete with common fiberglass products. Research shows that basalt fiber based materials can be useful for a range of structural applications in the aerospace, shipbuilding and construction industries. A significant raw material base indicates the prospects for the use of basalt. The purpose of this article is to review the strength studies of basalt fibers, analyze the chemical composition of basalt raw materials and review existing deposits.

Ключевые слова: базальт, композитный материал, базальтовые волокна.

Keywords: basalt, composite material, basalt fibers.

Введение

Данная статья является обзорной, в ней приведены основные результаты большой работы специалистов по исследованию характеристик базальтовых волокон. В статье представлена информация о характеристиках и основных преимуществах непрерывных базальтовых волокон (НБВ). Базальтовое волокно сочетает ряд уникальных свойств и привлекательную цену производства, что делает его конкурентом не только для традиционных конструкционных материалов, но и для угле- и стекловолокон. Преимущества данного материала состоят в значительной сырьевой базе, а именно распространенности базальтовой магматической породы по всему миру. Данный материал имеет стойкость к высоким температурам, химическую стойкость, долговечность, гигроскопичность, полную экологичность и низкую цену в сравнении с ближайшими конкурентами. Стекловолокно имеет определенные ограничения по своим характеристикам относительно базальтового волокна, а именно: удельная прочность, температура применения, химическая стойкость (особенно

в щелочных средах). Также при производстве стекловолокна используются химически чистые компоненты и особо дефицитный компонент – окись бора.

Сравнение характеристик базальтовых волокон с угле- и стекловолокном

В таблице 1 представлены геометрические и механические характеристики, связанные экспериментальными данными базальтовых, стеклянных и углеродных волокон, подвергнутых испытаниям на растяжение, данные получены из ряда исследований [1], [2], [3], [4].

Таблица 1 -Характеристики волокон

Исследование	Тип волокна	d [μm]	L [mm]	Et [GPa]	fut [MPa]
[1]	Углерод	8.2±0.4	15.0	183.0±29.0	2136.0±531.0
		8.2±0.4	30.0	201.0±20.0	1526.0±643.0
		8.2±0.4	40.0	195.0±12.0	1545.0±620.0
	Стекло	10.4±0.6	15.0	71.0±11.0	1641.0±673.0
		10.4±0.6	30.0	69.0±14.0	1035.0±402.0
		10.4±0.6	40.0	69.0±6.0	1202.0±571.0
	Базальт	12.3±1.1	15.0	66.0±5.0	1826.0±617.0
		12.3±1.1	30.0	64.0±4.0	1586.0±433.0
		12.3±1.1	40.0	67.0±4.0	2044.0±244.0
		20.6±2.2	15.0	103.0±11.0	2277.0±392.0
		20.6±2.2	30.0	82.0±19.0	1297.0±667.0
		20.6±2.2	-	90.0±5.0	1295.0±510.0
[2]	Базальт	14.2±1.4	-	61.9±3.5	2016.0±434.0
		12.7±1.5	-	62.0±3.6	1608.0±350.0
		14.1±2.9	-	53.2±7.4	1811.0±331.0
	Стекло	16.8±1.6	-	57.0±3.0	1472.0±395.0
[3]	Базальт	10.1	-	91.9	2880.0
		10.5	-	87.5	1760.0
		9.5	-	86.1	3470.0
		12.2	-	66.8	731.8
		6.3	-	71.9	840.3
		14.8	-	34.6	656.3
	Углерод	6.9	-	218.8	3779.8
		6.9	-	227.6	3816.1
		6.7	-	227.0	3929.9
[4]	Базальт	10.6	20.0	76.0	992.4

d: диаметр; L: длина; Et: упругая жесткость при растяжении; f: растяжение сила.

Месторождения пород андезитобазальтового состава России и мира

Непрерывное базальтовое волокно производят (НБВ) из горных пород андезито-базальтового состава с модулем кислотности Мк=(SiO2 + Al2 O3)/(CaO + MgO) = 4 ÷ 6,5. Это первый грубый критерий для выбора конкретного месторождения. На территории России известны триста месторождений базальтовых парод [5,6], сорок два из них пригодных для производства НБВ. Пригодность для данных целей основывается на модуле кислотности и полноте сведений о химическом составе.

Месторождения в ближайших странах:

- Украина - 56 месторождений, 18 потенциально пригодны. (Берестовец считаются образцовыми для производства НБВ)
- Абхазия – 1 месторождение габбро-диабаза. В
- Азербайджан - 4 месторождения, 1 потенциально пригодно.
- Армения - 29 месторождений, 2 потенциально пригодны.
- Беларусь - 2 потенциально пригодны.
- Грузия – из 10 предварительно рекомендуется только 1
- Казахстан - 44 месторождения, 19 потенциально пригодны.
- Киргизстане - 22 месторождения, 7 потенциально пригодны.
- Молдова - 1 месторождение.
- Туркменистан - 10 месторождений, 1 рекомендуется.
- Узбекистан - 37 месторождений, 15 потенциально пригодны.

В мире есть породы для НБВ: Эфиопия, Северная Америка, Австралия, Исландия, Гренландия, Тасмания, Бразилия и Японии. Наиболее богата породами базальтового состава из зарубежных стран — Индия. Диабазы добывают в Аргентине, Колумбии и Венесуэле (два месторождения).

Несомненно, такая широкая распространенность природного сырья дает перспективы развития производственных мощностей для НБВ и развитие его применения.

Химический состав

С точки зрения минералогии базальт в основном состоит из трех силикатных минералов: плагиоклазы, пироксены и оливины. Его химический

состав зависит от природы магмы, из которой он происходит. В каждом случае диоксид кремния (SiO2) в процентном содержании является основным компонентом, за которым следуют Al2O3, FeO+Fe2O, CaO, MgO, Na2O, K2O, TiO2 и так далее. Процент химического состава базальта строго связан с географическим районом. Характерный состав базальтовой породы [8, 9]: 45-52% SiO, 9-19% от AlO3, 6-15% FeO + Fe2O3, 5-13% CaO, 6-12% MgO, 2-11% Na2O иK2O и 0,5-2% TiO2**.** Базальтовые породы, широко используемые во всем мире, классифицируются в соответствии с SiO2 содержание as: щелочной (SiO2 до 42%), слабокислый (от 43 до 46% SiO2) и кислых базальтов (более 46% SiO2). Базальты с определенной степенью кислотности пригодны для производства волокна, так как имеют высокое содержание SiO2, который позволяет получить хорошие уровни гибкости и химической стабильности базальтового волокна. Что касается других компонентов, то Al2O3 улучшает термическую стойкость базальтовых волокон, а также CaO, MgO и TiO2 улучшает водостойкость и коррозионную стойкость [9].

Так, для производства непрерывных базальтовых волокон используют базальтовые породы следующего диапазона химического состава, представленные в таблице 2 [6].

Таблица 2 – Состав базальтовых пород

Химический состав	SiO2	Al2O3	Fe2O3FeO	CaO	MgO	TiO2	Na2OK2O	Прочие примеси
Минимальный %	45	12	5	6	3	0,9	2,5	2
Максимальный %	60	19	15	12	7	2	6	3,5

Длительное воздействие на базальтовые волокна щелочей или кислотных компонентов могут влиять на их механические характеристики, что обычно приводит к потере массы и снижению прочности. В результате механические свойства композитных материалов, армированных базальтовыми волокнами, могут ухудшаться. Однако, во многих исследованиях рассматривается влияние окружающей среды на механические свойства армированного волокном материала в целом. Характеристика химических свойств волокон является

фундаментальной для КМ [11]. Влияние щелочи (NaOH) или кислоты (HCl) на механическим свойствам КМ рассматриваются в некоторых экспериментальных исследованиях [11]. Результаты исследования показали, что кислотное сопротивление волокон базальта лучше, чем щелочное.

К настоящему времени разработана методика выбора базальтового сырья, известен химический состав для подбора породы из которых производятся базальтовые волокна в течении многих лет. Базальтовые породы являются одними из самых прочных природных силикатных пород. Волокна из базальтовых пород обладают высокой природной исходной прочностью, стойкостью к воздействию агрессивных сред, долговечностью, электроизоляционными свойствами, являются природным, экологически чистым сырьем. Технологии производства базальтовых волокон при всем внешнем подобии отличаются от производства стеклянных волокон, что связано с рядом факторов: Химический состав базальтов существенно отличается от стекла, базальты содержат в большом количестве окиси железа FeO, Fe2O3 и не прозрачны для теплового излучения. Базальты – это уже готовые природные расплавы, как правило, гомогенизированные по химическому составу.

В процессе плавления базальтов нет операций присущих при варке стекла, осветления и остужения и др. Эти особенности базальтов определяют специфику технологии производства и соответственно технологического оборудования для производства НБВ.

Стоимость базальтового сырья сопоставима со стоимостью щебня для укладки дорог. Цена базальтового сырья в себестоимости производства базальтового волокна составляет от 3 до 5%. Основные энергозатраты по обогащению, гомогенизации уже прошли в природных условиях

Характеристики и экспериментальные данные БНВ

Относительно высокая удельная прочность волокон на разрыв. В таблице 3 представлены данные по удельной прочности базальтовых волокон на разрыв [7].

Таблица 3 – Удельная прочность базальтовых волокон на разрыв

Диаметр элементарных волокон, mkm	5	6	8	9	11
Удельная прочность элементарных волокон на разрыв, kg/mm2.	215	210	208	214	205

В таблице 4 представлены данные по разрывным нагрузкам ровингов марки RB 10 из базальтового непрерывного волокна[7].

Таблица 4 – Данные по нагрузкам на разрыв

Диаметр элементарных волокон, mkm	Количество ТЭКС	Разрывная нагрузка: (Н)
10	600	400
10	1200	700

Высокая коррозионная и химическая стойкость к воздействию агрессивных сред: растворов солей, кислот, щелочей.

В таблице 5 представлены данные по химической стойкости базальтовых волокон [7].

Таблица 5 – Химическая стойкость базальтовых волокон.

Тип образца НБВ	H2O	0.5 н Na OH	2 н Na OH	2 н HCl
№ 1	99.63	98.3	92.8	76.9
№ 2	99.7	98.9	90.7	49.9
№ 3	99.6	94.6	83.3	38.8

Из таблицы 5 можно сделать вывод, что базальтовые волокна обладают уникальной химической стойкостью в растворах щелочей. Это свойство базальтовых волокон открывает широкие перспективы их применения для армирования бетонных конструкций при строительстве мостов, тоннелей, плотин, конструкций перекрытий, армирования асфальтобетонных покрытий дорог, взлетно-посадочных полос и других ответственных строительных

конструкций, где воздействие влаги, растворов солей и щелочных бетонных сред приводит к коррозии металлической арматуры.

Базальтовое волокно совместимо с неорганическими связующими. Это позволяет производить новый класс негорючих композиционных материалов на неорганических связующих. Базальтовые волокна являются незаменимым материалом для изготовления фильтров для очистки промышленных стоков и очистных сооружений городов.

Базальтовые волокна обладают высокой температурной стойкостью. В таблице 6. представлены данные по температурной стойкости базальтовых волокон [7].

Таблица 6 – Температурная стойкость базальтовых волокон

Температура ºС	300	400	500	600	700
Исходная удельная прочность, 100%					
№ 1 234 кг/мм2	98.7	88.7	58,9	38,4	25
№ 2 240 кг/мм2	99.0	89.0	61.0	39.0	27.0
№ 3 254 кг/мм2	100	90	65	38,8	28,6

Из приведенных данных в таблице следует, что материалы из базальтовых волокон могут применяться при температурах до 600 ºС. Теплоизоляционные изделия из базальтовых волокон на основе неорганических связующих могут применяться при температурах до 7000 С. Кроме того, существует ряд составов на основе базальтовых пород, обладающих более высокой термостойкостью до 8000 ºС [7].

Базальтовые волокна имеют электроизоляционные характеристики, радиопрозрачность для электромагнитного излучения. НБВ используется для производства электроизоляционных материалов как высоковольтной (до 250 кВ), так и низковольтной (500 В) аппаратуры, при строительстве высоковольтных линий электропередач, для производства обтекателей и конструкций антенн, локаторов и другого радиотехнического оборудования

Базальтовые волокна сочетают в себе термо- и звукоизоляционные характеристики. Данные по теплопроводности материалов из тонкого базальтового волокна с диаметром элементарных волокон 9 – 11 мкм приведены в таблице 7 [7].

Таблица 7 – данные теплопроводности из тонкого волокна

Удельная плотность материала, кг/м3	40	60	80	100	120	140	160
Коэффициент теплопроводности			ккал/м ч град				
Перепад температуры, 500С	0.052	0.050	0.047	0.044	0.041	0.040	0.041

Данные по теплопроводности материалов из супертонкого базальтового волокна с диаметром элементарных волокон 1 - 3 мкм представлены в таблице 8 [7].

Таблица 8 – Данные теплопроводности материалов из супертонкого волокна

Удельная плотность материала, кг/м3	20	30	60	80	100	120	140
Коэффициент теплопроводности			ккал/м ч град				
Перепад температуры, 500С	0,0405	0,0375	0,0345	0,034	0,036	0,038	0,041

Выводы

Представлен обзор современного состояния базальтовых волокон и их использования в качестве армирующей фазы в композитных материалах. Исходя из существующих исследований следует, что базальтовые волокна выгодно отличаются в сочетании следующих характеристик: радиопрозрачность, расширяющая спектр применения материала; высокая прочность; работа в широком диапазоне температур; устойчивость к кислотам и щелочам превосходящая аналоги. Также базальтовое волокно характеризуется более экологичным и экономичным производством. Преимуществом для развития волокна на основе базальтового сырья является большая база месторождений магматической пароды как в России, так и в мире. Тем не менее, перспектива, с

точки зрения механических характеристик и экономической эффективности, между композитами на основе базальта и другими армирующими наполнителями (особенно в отношении материалов на основе стекловолокна), могут привести к эффективному использованию на практике только в том случае, если будут проведены дальнейшие исследования.

Литература

1. Dorigato A, Pegoretti A. Fatigue resistance of basalt fbers-reinforced laminates. J Compos Mater 2012;46(15):1773–1785.
2. De´ak T, Czig´any T. Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fbers: A comparison. Text Res J 2009;79(7):645– 651.
3. Gur'ev VV, Neproshin EI, Mostovoi GE. The e ect of basalt fber ↲ production technology on mechanical properties of fber. Glass Ceram 2001; 58:62–65.
4. J, Park C, Moon DY. Characteristics of basalt fber as a strengthening material for concrete structures. Compos Part B: Eng 2005.
5. Аблесимов Н. Е., Малова Ю. Г. Горные породы базальтового состава: происхождение, элементный и фазовый состав, месторождения. Часть I // Базальтовые технологии. Июль-декабрь 2013. С. 31-37.
6. Аблесимов Н. Е., Малова Ю. Г. Горные породы базальтового состава: происхождение, элементный и фазовый состав, месторождения. Часть II // Базальтовые технологии. Январь–декабрь 2014. С. 26-34.
7. Оснос С.П. "Basalt Fiber & Composite Materials Technology Development Co., Ltd". О характеристиках базальтовых волокон и областях их применения. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://basaltfm.com/ru/articles/article01.html. Заглавие с экрана. – (Дата обращения 04.05.2021).
8. Dhand V, Mittal G, Rhee KY, Park SJ, Hui D. A short review on basalt fber reinforced polymer composites. Compos Part B Eng 2015; 73:166– 180.
9. Singha K. A short review on basalt fber. Int J Text Sci 2012;1(4):19– 28.
10. Rao J, Bao L, Wang B, Fan M, Feo L. Plasma surface modification and bonding enhancement for bamboo composites. Compos Part B: Eng 2018; 138:157–167.

11. Wei B, Cao H, Song S. Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibers. Mat Sci Eng: A-Struct 2010;527(18- 19):4708–4715.

Literature

1. Dorigato A, Pegoretti A. Fatigue resistance of basalt fbers-reinforced laminates. J Compos Mater 2012; 46 (15): 1773-1785.
2. De'ak T, Czig'any T. Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fbers: A comparison. Text Res J 2009; 79 (7): 645–651.
3. Gur'ev VV, Neproshin EI, Mostovoi GE. The e ect of basalt fber ↲ production technology on mechanical properties of fber. Glass Ceram 2001; 58: 62-65.
4. J, Park C, Moon DY. Characteristics of basalt fber as a strengthening material for concrete structures. Compos Part B: Eng 2005.
5. Ablesimov NE, Malova Yu. G. Rocks of basalt composition: origin, elemental and phase composition, deposits. Part I // Basalt technologies. July-December 2013.S. 31-37.
6. Ablesimov NE, Malova Yu. G. Rocks of basalt composition: origin, elemental and phase composition, deposits. Part II // Basalt technologies. January – December 2014. pp. 26-34.
7. Osnos S.P. “Basalt Fiber & Composite Materials Technology Development Co., Ltd”. On the characteristics of basalt fibers and their fields of application. [Electronic resource]. Access mode: http://basaltfm.com/ru/articles/article01.html. Screen title. - (Date of treatment 05/04/2021).
8. Dhand V, Mittal G, Rhee KY, Park SJ, Hui D. A short review on basalt fber reinforced polymer composites. Compos Part B Eng 2015; 73: 166-180.
9. Singha K. A short review on basalt fber. Int J Text Sci 2012; 1 (4): 19-28.
10. Rao J, Bao L, Wang B, Fan M, Feo L. Plasma surface modification and bonding enhancement for bamboo composites. Compos Part B: Eng 2018; 138: 157-167.
11. Wei B, Cao H, Song S. Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibers. Mat Sci Eng: A-Struct 2010; 527 (18-19): 4708-4715.