

### Заключение

Таким образом, показана высокая эффективность применения покрытий из морозо-, агрессивостойкого СВМПЭ на поверхности резиновых изделий из-за значительного повышения их стойкости при воздействии углеводородных сред. Для получения таких пленок на поверхности резин из полярного бутадиен-нитрильного каучука БНКС-18 модифицирующую добавку СВМПЭ можно вводить только в объем резиновой смеси. Пленка толщиной 70–80 мкм в данном случае будет формироваться за счет миграции СВМПЭ к поверхности образца в процессе вулканизации. Этот способ технологически более простой по сравнению с другим способом, использованным в данном исследовании, благодаря которому на поверхности резиновых изделий удалось получить пленку из СВМПЭ толщиной до 2 мм. При этом для обеспечения повышенной прочности связи между слоями СВМПЭ и эластомерной матрицей в последнюю вводили небольшое количество порошка СВМПЭ. Однако, несмотря на усложнение технологии, этот способ показал также высокую эффективность за счет возможности применения в качестве эластической составляющей уплотнений резин на основе неполярных изопреновых и бутадиеновых каучуков, обладающих более высокой морозо-

стойкостью по сравнению с резинами на основе бутадиен-нитрильного каучука БНКС-18.

### Литература

1. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / Под ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. – М.: Машиностроение, 1986. – 464 с.
2. Махлис Ф.А., Федюкин Д.Л. Терминологический справочник по резине: Справ. изд. – М.: Химия, 1989. – 400 с.
3. Корнев А.Е., Буканов А.М., Шевердяев О.Н. Технология эластомерных материалов. – М.: НППА «ИстеК», 2009. – 504 с.
4. Kurtz Steven M. UHMWPE Biomaterials Handbook. Elsevier Science, 2009. – 543 p.
5. Андреева И.Н., Веселовская Е.В., Наливайко Е.И. и др. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности. – Л.: Химия, 1982. – 80 с.
6. Sokolova M.D., Davydova M.L., Shadrinov N.V. Processing to increase the structural activity of zeolite in polymer-elastomer composites // International Polymer Science and Technology. – 2011. – V. 38, №5. – P. 25–29.
7. Shadrinov N.V., Sokolova M.D., Okhlopkova A.A. et al. Enhancement of compatibility between ultrahigh-molecular-weight polyethylene particles and butadiene-nitrile rubber matrix with nanoscale ceramic particles and characterization of evolving layer // Bulletin of the Korean Chemical Society. – 2013. – Vol. 34, № 12. – P. 3762–3766.

Поступила в редакцию 17.09.2015

УДК 678.026.3

## Разработка и исследование комбинированных базальтопластиковых стержней

А.А. Кычкин, А.К. Кычкин, А.Г. Туисов

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

*Физико-механические характеристики конструкционных пластиков на основе непрерывных базальтовых волокон делают их перспективным материалом для различных отраслей промышленности. Обладая малым весом и высокой коррозионной стойкостью, они обеспечивают прочность на разрыв вдоль направления оси армирования выше, чем большинство конструкционных сталей, уступая им, однако, по величине модуля упругости. Поэтому основной задачей в настоящее время является повышение данного показателя. Объектом исследования выбраны экспериментальные образцы комбинированных базальтопластиковых стержней различных типов диаметром Ø8 мм, полученные методом протяжки базальтового волокна, армированного металлической проволокой диаметром 4 мм марки ВР-1 (ГОСТ 6727-80), методом протяжки базальтового волокна, армированного углеродным волокном Rapex 35, и методом скручивания в винтовую форму отдельных однонаправленных базальтовых ровингов. В качестве матрицы при получении экспериментальных образцов комбинированных базальтопластиковых стержней было использовано хорошо зарекомендовавшее трехкомпонентное эпоксидно-гидридное связующее. Проведенные экспериментальные физико-механические исследования показали,*

КЫЧКИН Айсен Анатольевич – аспирант, icen.kuchkin@mail.ru; КЫЧКИН Анатолий Константинович – к.т.н., в.н.с., kuchkinplasma@mail.ru; ТУИСОВ Алексей Геннадьевич – к.т.н., с.н.с., tagg@rambler.ru.

что объемное содержание углеродного волокна 25% приводит к возрастанию предела прочности при растяжении на 29 %, а модуля упругости при растяжении на 90%. Предел прочности при статическом изгибе при этом возрастает на 50%. Выявлено, что разрушение однонаправленных базальтопластиковых стержней носит хрупкий характер с расслоением.

Ключевые слова: базальтопластик, углеродное волокно, испытания на разрыв, модуль упругости, предел прочности, скрученно-винтовая композиционная арматура, хрупкое разрушение.

## Research and Development of Combined Basalt Rods

A.A. Kychkin, A.K. Kychkin, A.G. Tuisov

*Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk*

*Physical and mechanical characteristics of engineering continuous basalt fiber plastics make them a promising material for various industries. Due to low weight and high corrosion resistance, these plastics provide the axis tensile strength along higher than most structural steels. However, the magnitude of the modulus of elasticity is still significantly lower. Therefore, the main research task now is an increasing the Young's modulus of basalt fibers plastics. The objects of the study were selected experimental samples of combined basalt rods of various types with the diameter  $\varnothing 8$  mm, which were produced by the longitudinal and transverse winding of basalt fiber to a metal wire, combined with carbon portage and twisted in a spiral shape of individual unidirectional basalt rovings, impregnated and cured with 3-component epoxy-anhydride binder. A metal rod with a diameter of 4 mm brand BP-1 was used as the reinforcement material for basalt rod  $\varnothing 8$  mm, obtained by longitudinal-transverse winding. In the samples with a carbon fiber of reinforcing material was used Zoltek Carbon fiber with volume content of 25% in the composite. Experimental studies of physical-mechanical properties have shown that the 25% volume content of carbon fiber leads to the 29% increase of the limit of the tensile strength, and 90% growth of tension elasticity modulus. The ultimate strength in static bending is increased by 50%. It is revealed also that the destruction of the unidirectional composite rods is fragile with the bundle.*

*Key words: basalt, carbon fiber, metal wire, spun-helical composite frame, corrosion resistance, tensile strength, modulus of elasticity.*

### Введение

Конструкционные пластики на основе непрерывных базальтовых волокон обладают высоким уровнем физико-механических характеристик вдоль направления оси армирования (превышающим прочность большинства конструкционных сталей), низким коэффициентом теплопроводности, относительно высокой диэлектрической проницаемостью, очень малым (по сравнению со сталями и высокопрочными материалами) удельным весом. Но, несмотря на все, промышленности требуются конструкционные пластики все с более высокими физико-механическими характеристиками. Основные преимущества композитных материалов – это их малый вес и коррозионостойкость. Но стоит отметить, что применение базальтопластиков в качестве материалов конструкционного назначения, армирование в бетонных конструкциях ограничено вследствие низких значений модуля упругости при растяжении.

Ухудшение железобетонных структур из-за коррозии стального армирования – известный

зарегистрированный факт. Главные компоненты бетона – цементный, (например, песок) и грубые в виде гравия или сокрушенного камня. Когда они смешаны с водой, цемент реагирует химически с водой, названной гидратацией, и формирует твердое конкретное соединение. Рецепты различных бетонных марок варьируются, но у большинства есть составы (в объемном условии) в диапазоне приблизительно: цементный порошок на 7–15%, вода на 15–20%, воздух на 0,5–8%, мелкие заполнители на 25–30% и грубые совокупности на 30–50%. Всегда было известно, что бетон – пористый материал, свойства которого зависят от его порового пространства. Есть много различных видов пор в бетоне, которые привлекаются при процессе смешивания. У простого бетона есть два главных недостатка: низкий уровень силы растяжения и низкое напряжение в переломе. Предел прочности у бетона имеет очень низкие показатели, обуславливающиеся содержанием многочисленных микротрещин. Быстрое распространение этих микротрещин под

прикладываемым напряжением отвечает за низкий предел прочности материала. Эти недостатки привели к значительным исследованиям, нацеленным на развитие новых подходов для изменения хрупких свойств бетона [1].

Различными исследователями ведутся работы по разработке комбинированных стержней из базальта для использования основного преимущества композитных материалов – их коррозионостойкость. Китайскими и японскими исследователями велись работы по разработке базальтовых стержней с металлическим сердечником [2].

В данной статье представлены результаты исследований физико-механических свойств различных типов комбинированных базальтопластиковых стержней.

**Материалы и методы исследования**

Для изготовления опытных образцов базальтопластиковых стержней применяли эпоксидное связующее по рецептуре, согласно РТП-СП2-20994511-1999Т, основу которого составляет эпоксидиановая смола ЭД-22, отверждаемая изометилтетрагидрофталевым ангидридом (изо-МТГФА) в присутствии ускорителя 2,4,6-трис (диметиламинометил) фенола (УП-606/2). Основной армирующий наполнитель – базальтовый ровинг РБН 13-2400-4С производства ООО «ТБМ» (г. Якутск). Физико-механические показатели данного ровинга отображены в табл. 1.

В качестве дополнительно армирующих наполнителей использовали высокопрочную металлическую проволоку ВР-1 диаметром 4 мм (ГОСТ 6727-80) и углеродный ровинг Panex 35 производства Zoltek (США). Физико-механические свойства данного ровинга показаны в табл. 2.

Определения физико-механических свойств полученных образцов базальто- и стеклопластика проводили методом растяжения на испытательной машине «Zwick Roel Z600», тип ВРС-F0600ТN.R09, серийный номер 160088-2008

Т а б л и ц а 1

**Физико-химические свойства базальтового ровинга**

Показатели	РБН 13-2400-4С
Номинальная линейная плотность ровинга с допускаемым отклонением по линейной плотности от номинальной, текс	2400±60
Диаметр элементарного волокна, мк	13
Разрывная нагрузка, мН/текс, не менее	320
Массовая доля веществ, удаляемых при прокаливании, %, не менее	0,3
Массовая доля влаги, %, не более	1,0

**Физико-химические свойства углеродного ровинга**

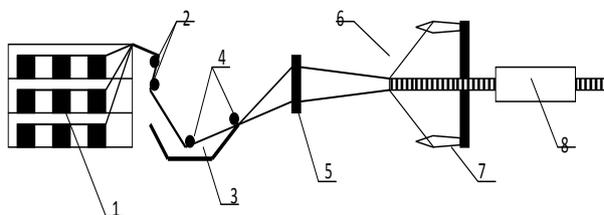
Показатели	Panex 35
Номинальная линейная плотность ровинга с допускаемым отклонением по линейной плотности от номинальной, текс	3600±120
Диаметр элементарного волокна, мк	7,2
Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	4,137
Модуль упругости при растяжении, ГПа, не менее	242
Концентрация Carbon, %	95

(ГОСТ 12004-81) на базе ЦКП ИФТПС СО РАН в соответствии с ГОСТ 32656-2014 «Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение» (ISO 527-4:1997,MOD), (ISO 527-5:2009, MOD).

**Экспериментальная часть**

Опытные образцы базальтопластиковых стержней были изготовлены на технологической линии «Струна А». Формование и отверждение базальтопластиковых стержней периодической формы номинальным диаметром 8 мм осуществлялось протяжкой со скоростью 2–160°С, температура выдержки до полного отверждения составляла 160±2°С в течение 4 ч (согласно рис. 1). Для качественной оценки результатов были также изготовлены базальтопластиковые стержни диаметром 8 мм без добавления дополнительно армирующих компонентов (проволока ВР-1, углеродный ровинг Panex 35). Содержание эпоксидного связующего во всех отвержденных базальтопластиковых образцах составило 18±0,5% от массы стержня.

Экспериментальные образцы скрученно-винтовой композитной арматуры были получены так же, как формование и отверждение со скоростью 2–160°С, с последующей выдержкой до полного отверждения при температуре 160±2°С в течение 4 ч (согласно рис.2).



**Рис. 1. Технологическая схема линии по формованию базальтопластиковых стержней:**

1 – шпулярник; 2 – подогреваемые металлические стержни; 3 – ванна пропитки; 4 – отжимные валики; 5 – раскладочное кольцо; 6 – формирующая фильера; 7 – вертлюг-укладчик кольцевых нитей; 8 – печь полимеризации

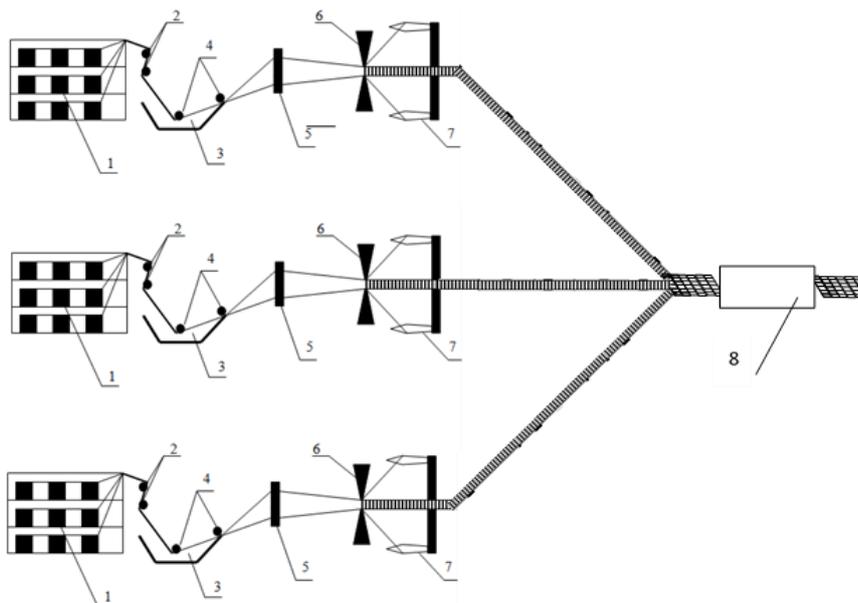


Рис. 2. Технологическая схема линии по формированию базальтопластиковых стержней методом скручивания в винтовую форму.

Усл. обозначения те же, что на рис. 1



Рис.4. Нагружение образцов на растяжение

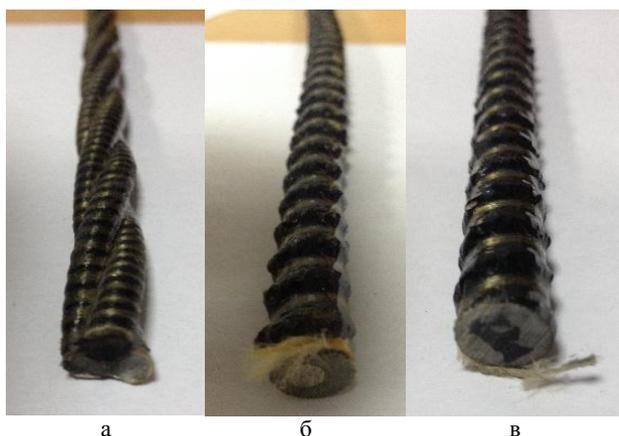


Рис. 3. Образцы арматур: а – скрученная в винтовую форму; б – со стальным сердечником; в – с сердечником из углеродного волокна

На рис.3. представлены образцы испытываемых стержней.

На рис. 4 представлен общий вид нагружения образцов на растяжение, на рис.5–8 – основные результаты испытаний. Данные на рис.5, 8 свидетельствуют о снижении значения предела прочности и модуля упругости при растяжении образцов базальтопластикового стержня нового типа – скрученно-винтовой формы – от 995 до 685 МПа и от 50 до 45 ГПа соответственно.

Из рис. 5–7 видно, что образцы, армированные углеродным волокном, имеют более высокие значения предела прочности и модуля упругости при растяжении, а именно, установлено увеличение предела прочности с 995 до 1290 МПа, модуля

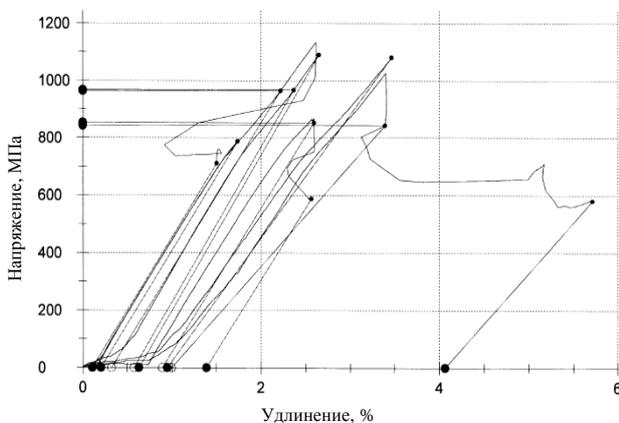


Рис.5. Зависимость напряжения от удлинения при растяжении образцов базальтопластикового стержня периодического профиля без добавления углеродного волокна

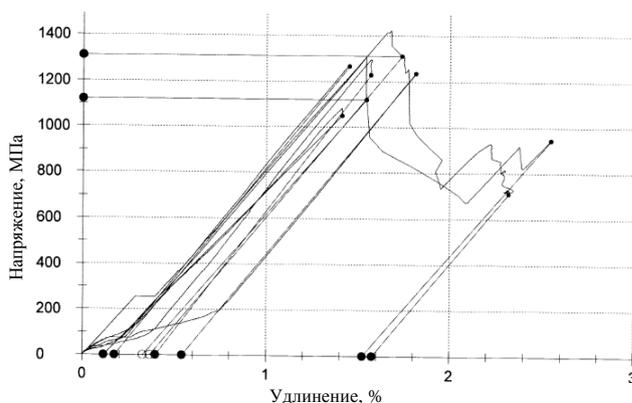


Рис.6. Зависимость напряжения от удлинения при растяжении образцов базальтопластикового стержня периодического профиля с добавлением углеродного волокна в количестве 25 % по объемному содержанию

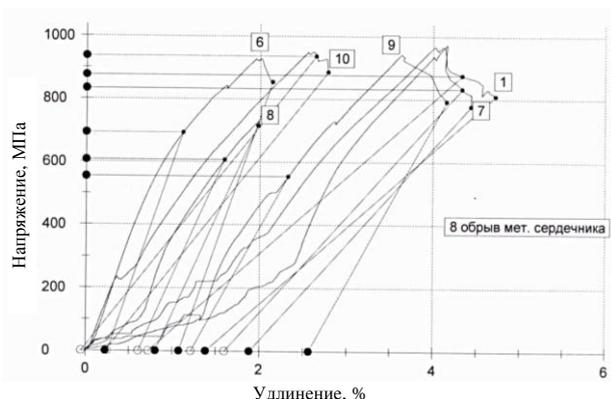


Рис.7. Зависимость напряжения от удлинения при растяжении образцов базальтопластикового стержня периодического профиля с добавлением металлической проволоки 4 ВР-1 (ГОСТ 6727-80)

упругости с 50 до 95 ГПа для образцов базальтопластика, состоящих на 25% (по объему) из углеродного волокна, образцы, армированные металлической проволокой 4 ВР-1 – более низкие значения предела прочности и модуля упругости при растяжении, а именно, установлено снижение предела прочности с 995 до 915 МПа, модуля упругости с 50 до 40 ГПа для образцов базальтопластика.

Разрушение однонаправленных базальтопластиковых стержней носит ярко выраженный хрупкий характер. Оно наступает внезапно и характеризуется чередующимся разрывом волокон в разных, наиболее слабых сечениях и расслоением материала, о чем свидетельствует рис.9. Причиной расслоения являются касательные напряжения, возникающие в местах разрыва волокон.

### Заключение

На основании полученных экспериментальных прочностных исследований следует, что армирование базальтопластиковых стержней периодического профиля приводит к существенному увеличению прочностных показателей базальтопластика.

Проведенные экспериментальные физико-механические исследования показали, что содержание углеродного волокна (25% по объемному содержанию) приводит к возрастанию предела прочности при растяжении на 29% (с 995 до 1290 МПа), модуля упругости при растяжении на 90% (с 50 до 95 ГПа).

Установлено снижение значения предела прочности и модуля упругости при растяжении образцов базальтопластикового стержня нового типа – скрученно-винтовой формы – от 995 до 685 МПа и от 50 до 45 ГПа, соответственно.

Разрушение однонаправленных базальтопластиковых стержней носит ярко выраженный

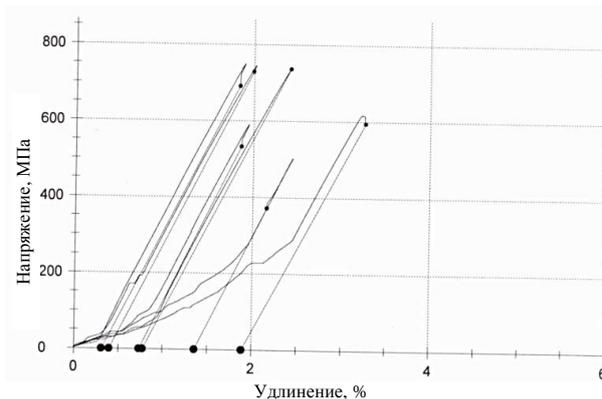


Рис.8. Зависимость напряжения от удлинения при растяжении образцов базальтопластикового стержня нового типа – скрученно-винтовой формы

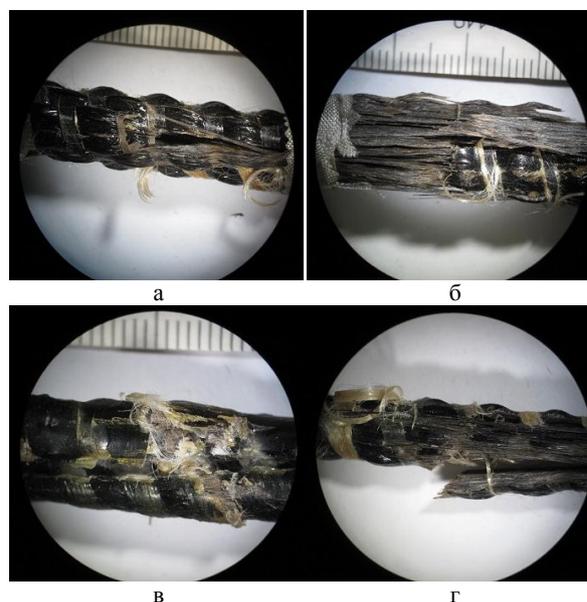


Рис.9. Виды разрушений опытных образцов базальтопластикового стержня: а – стержень с углеволокном; б – стержень с металлическим сердечником; в – стержень скрученно-винтовой формы; г – базальтопластиковый стержень

хрупкий характер. Оно наступает внезапно и характеризуется чередующимся разрывом волокон в разных, наиболее слабых сечениях и расслоением материала. Причиной расслоения являются касательные напряжения, возникающие в местах разрыва волокон.

### Литература

1. Перкинс Ф. Железобетонные сооружения. Ремонт, гидроизоляция и защита» / Пер. с англ. А.В. Швецов; под ред. М.Ф. Цитрона, <http://www.bibliotekar.ru/>.
2. Wu Z., Wang X., Wu G. Basalt FRP composite as reinforcements in infrastructure // Ibaraki University, Hitachi, 316–8511, Japan.

Поступила в редакцию 01.10.2015