

УДК 678.8

К.И. Донецкий<sup>1</sup>, Р.Ю. Караваев<sup>1</sup>, А.И. Цыбин<sup>1</sup>,  
Е.А. Вешкин<sup>1</sup>, Е.С. Михалдыкин<sup>2</sup>

## КОНСТРУКЦИОННЫЙ СТЕКЛОПЛАСТИК ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ШПУНТОВЫХ ОГРАЖДЕНИЙ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-56-64

Рассмотрена возможность применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе плетеных преформ для элементов конструкций шпунтовых ограждений – в первую очередь шпунтовых свай круглого сечения и «корытного» типа. Рассмотрены преимущества ПКМ в сравнении с традиционно применяемыми материалами. Разработано эпоксивинилэфирное связующее, стеклопластик для конструкций шпунтовых ограждений и исследованы их свойства. Разработана технология изготовления методом вакуумной инфузии двух типов конструкций шпунтовых ограждений – круглого сечения на основе плетеного рукава и «корытного» типа на основе равнопрочной стеклоткани. Проведены комплекс физико-механических испытаний и оценка напряженно-деформированного состояния образцов элементов шпунтовых ограждений при различных значениях нагрузок и режимах нагружения. Методом вакуумной инфузии – с использованием равнопрочной стеклоткани и эпоксивинилэфирного связующего – изготовлена партия элементов шпунтовых ограждений «корытного» типа (шпунт Ларсена). С их использованием установлена подземная защитная стенка, исключая подвижки грунта и обеспечивающая противодиффузионную завесу.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы (ПКМ), стеклопластик, связующее, плетеные преформы, стеклоткани, безавтоклавное формование, композитные шпунты.

The possibility of using polymer composite materials (PCM) on the basis of braided preforms for constructional elements of enclosing sheeting, first of all sheet piles of circular section and «trough-shaped» type are considered. Advantages of polymer composite materials in comparison with traditionally applied materials are considered. Epoxy vinyl ester binding, fiberglass plastic for designs of enclosing sheeting are developed and their properties are studied. The manufacturing technology by the method of vacuum infusion of two types of enclosing sheeting designs, namely, circular section on the basis of braided sleeve and «trough-shaped» type on the basis of full-strength glass-fiber fabric are developed. The complex of physico-mechanical tests and assessment of stress-strain behavior of samples of enclosing sheeting elements at different values of loads and loading conditions is carried out. A batch of enclosing sheeting elements of «trough-shaped» type (Larsen sheet piles) has been produced by the method of vacuum infusion using full-strength glass-fiber fabric. With their use, the underground protective wall is established, excluding soil motions and providing grout cutoff curtain.

**Keywords:** polymer composite materials, fiberglass, binder, braided preforms, glass-fiber fabrics, autoclave-free molding, composite enclosing sheeting.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

<sup>2</sup>Акционерное общество «НИИГрафит» [Stock Company «NIIGrafit»]; e-mail: niigrafit@niigrafit.org

### Введение

В последнее время наблюдается устойчивый рост использования полимерных композиционных материалов (ПКМ) в строительной индустрии для защиты и усиления несущих конструкций, изготовления несущих и вспомогательных конструкций и изделий, композитной арматуры, выполнения работ нулевого цикла, в том числе устройства композитного шпунтового ограждения [1–6]. Полимерные композиционные материалы по сравнению с используемыми традиционными строительными материалами, несмотря на их более высокую стоимость, обладают рядом преимуществ, таких как:

- высокая удельная прочность (отношение прочности к массе);
- химическая стойкость и отсутствие коррозии;
- долговечность.

Области использования шпунтов распространяются на все сферы строительства – начиная от традиционного строительства гидротехнических и подземных сооружений, инженерных сооружений и путей сообщения и заканчивая охраной окружающей среды.

Шпунтовые конструкции нашли широкое применение в укреплении береговой линии водоемов, создании препятствий для оползней, формировании защитных дамб от наводнения и в других

гидротехнических сооружениях. Шпунты используют в промышленном и гражданском строительстве – при возведении мостов, дорог, причалов, зданий, газо- и нефтепроводов. Соединяя шпунты в секции, можно создавать противоточные завесы. Шпунтовые сваи необходимы там, где надо оградить часть котлована от воды, укрепить стены, предотвратить фильтрацию грунтовых вод. В грунт шпунты погружают сваебойными молотами или вибропогружателями.

### Материалы и методы

Выбор исходного материала для изготовления шпунта зависит от ряда факторов, включая прочность и экологические требования. Конструктор должен рассмотреть возможность снижения экономических затрат и их влияние на эксплуатационные характеристики создаваемых изделий. Первым материалом для создания шпунтов была древесина, а в настоящее время большинство из постоянных функционирующих шпунтовых сооружений изготовлены из стали или бетона.

Бетон способен обеспечить длительный срок службы конструкций в нормальных условиях, но их устройство трудоемко по сравнению со стальными шпунтовыми ограждениями и имеют малую оборачиваемость. Применяются они преимущественно для сооружений с длительным сроком эксплуатации.

Железобетонные шпунты обладают низкой устойчивостью к влаге и знакопеременным изменениям температуры, пониженной устойчивостью к действию агрессивной морской среды и образованию сколов.

Стальные шпунты, кроме того что подвержены коррозии, из-за своей массы требуют дополнительного оборудования и людских ресурсов для их установки, таким образом увеличивая их общую стоимость. При этом каждый год стальной шпунт в воде теряет несколько миллиметров своей толщины [7].

Таким образом, эксплуатация шпунтовых изделий из традиционных материалов требует значительных расходов на их поддержание и в будущем – мероприятий по их демонтажу, утилизации и замене [8].

Неармированный пластик, отличающийся малой массой и высокой химической стойкостью, не может обеспечить необходимой прочности, в сравнении с другими материалами, и, таким образом, как правило, имеет ограниченную область применения.

За рубежом (США, Германия, Канада, Япония, Китай и другие страны) уже достаточно давно используются шпунтовые защитные сооружения, выполненные из ПКМ.

Освоение подземного пространства, откопка котлованов большой глубины в стесненных условиях, системы защиты от чрезвычайных стихийных бедствий, укрепление береговой линии – основные направления применения композитного шпунтового ограждения.

Первые сооружения из композитных шпунтов возведены в США более 25 лет назад и за период эксплуатации зарекомендовали себя с наилучшей стороны. Известным мировым производителем шпунтовых изделий торговой марки SuperLoc™, предназначенных для причальных сооружений в морской среде, является американская фирма Lee Composites™ [9]. Впервые в 1993 г. дамба из стекловолоконного пластика на основе винилэфирной смолы построена на американском острове Галвестон (штат Техас). Эта стеклопластиковая конструкция до сих пор функционирует, а ежегодный мониторинг ее состояния дает уверенность в надежности и дальнейшей длительной эксплуатации. Даже после известного мощного урагана «Айк» (пятый ураган сезона 2008 г.), которому присвоена четвертая категория по пятибалльной шкале степени опасности Саффира–Симпсона, не обнаружены повреждения этих стеклопластиковых конструкций [10, 11].

За прошедшие годы в мире установлены многие километры композитных шпунтов, и общий объем их применения растет из года в год. Если некоторое время назад нежелание применять новые технологии объяснялось относительно высокой стоимостью композитных шпунтовых свай, то в настоящее время это не является препятствием для их использования, поскольку шпунтовые сваи по своим показателям превосходят металлические аналоги, обладая при этом вполне конкурентоспособной ценой.

Шпунт, выполненный из ПКМ, обладает высокой механической стойкостью к истиранию, ползучести, растрескиванию, появлению царапин, УФ деградации и атмосферным воздействиям. Он не подвержен коррозии, гниению и воздействию агрессивных сред; не требует технического обслуживания; устойчив к сезонному перепаду температур; его способность противостоять агрессивной среде значительно выше, чем у стали и бетона; его легче установить в более плотных грунтах, чем шпунтовые пластиковые изделия. Зарубежный опыт свидетельствует о долговечности шпунта и свай из ПКМ: гарантированный срок эксплуатации таких изделий – не менее 50 лет. Известны многочисленные достоинства технологии берегового укрепления с помощью композитных шпунтовых свай. Во-первых, это малый срок строительства в связи с применением готовых к монтажу элементов шпунтовых стен. Небольшая масса изделий обеспечивает простоту и легкость при транспортировке и монтаже. Во-вторых, работы можно проводить в труднодоступных местах и в любых погодных условиях. В-третьих, нет необходимости в привлечении тяжелой крупногабаритной техники [12], и, наконец, еще один немаловажный довод в пользу данной технологии: композитный шпунт позволяет создать имеющее эстетичный внешний вид ограждение.

Среди различных классов ПКМ, отличающихся составом и свойствами полимерных матриц и

наполнителей, особого внимания заслуживает класс непрерывно армированных композитов. Такие материалы способны обеспечить максимальную реализацию прочностных характеристик при создании уникальных изделий и конструкций применительно к ответственным сооружениям и сложным техническим системам. Общемировые тенденции применения экономически эффективных и экологически безопасных технологий способствовали развитию безавтоклавных методов изготовления ПКМ, таких как RTM, RFI, вакуумная инфузия [13, 14]. Наиболее эффективно применение данных методов при использовании объемно-армирующих преформ из непрерывного армирующего наполнителя.

Одним из способов изготовления объемно-армирующих преформ является процесс плетения. Процесс изготовления ПКМ на основе плетеных преформ является конкурентоспособной альтернативой таким технологическим процессам, как намотка, автоматическая и ручная выкладка [15–18]. Возможность вплетать закладные элементы и оплести отверстия, оплести оправки сложной геометрической формы, применять при изготовлении изделий современные экономически эффективные технологии RTM и VARTM, а также высокая скорость и экономичность процесса плетения позволяют применять его при изготовлении изделий из ПКМ в различных отраслях промышленности (рис. 1). Основными отраслями применения плетеных преформ, помимо аэрокосмической, являются машиностроение, строительство, производство товаров для спор-

та и отдыха и изделий медицинского назначения.

Применение плетеных преформ для изготовления ПКМ позволяет реализовать ряд преимуществ, среди которых:

- экономически эффективные технологии изготовления изделий (RTM, VARTM);
- высокопроизводительный процесс изготовления преформ (скорость изготовления в разы выше скорости изготовления объемно-армирующей преформы 3D-ткачеством);
- снижение материалоемкости;
- высокая способность к поглощению энергии удара;
- высокая стойкость к повреждениям;
- высокое сопротивление кручению;
- возможность вплетения закладных элементов и оплетения отверстий.

Использование «стандартных» материалов, в данном случае стеклотканей, является экономически эффективным решением при изготовлении элементов шпунтовых ограждений – в первую очередь из-за широкого спектра предлагаемых на рынке тканей и, соответственно, их невысоких цен. В данном случае возможно упомянуть об изготовлении из этого материала шпунтов «корытного» типа (аналогов шпунта Ларсена) (рис. 2).

Полимерные композиционные материалы для шпунтовых ограждений изготавливают из армирующих волокнистых материалов и термореактивных полимерных связующих различной химической природы. Наиболее оптимально для строительных технологий при изготовлении шпунтовых

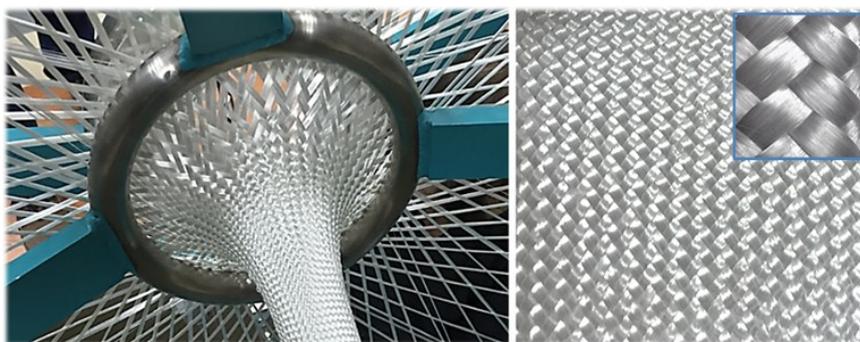


Рис. 1. Изготовление плетеной преформы из стеклоровинга



Рис. 2. Шпунт «корытного» типа, изготовленный на основе равнопрочной стеклоткани (ФГУП «ВИАМ»)

изделий использовать полимерные связующие холодного отверждения, способные к формообразованию в интервале температур 15–60°C, что позволяет при их переработке, прежде всего, отказаться от использования дорогостоящего и энергозатратного автоклавного оборудования, а также дает возможность разработать упрощенные энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии, например, такую как технология вакуумной инфузии.

Технология вакуумной инфузии обладает неоспоримым преимуществом при изготовлении крупногабаритных и длинномерных единичных деталей при мелкосерийном производстве. При изготовлении ПКМ она позволяет отказаться от дорогостоящих препрегов в пользу пакетов с сухими наполнителями, состоящими из выложенных слоев ткани, или преформ, полученных методами ткачества и плетения. К преимуществам данной технологии относят:

- отсутствие необходимости использования дорогостоящего оборудования наряду с применением дешевой оснастки обуславливает значительное уменьшение затрат при изготовлении ПКМ;
- возможность исключения непосредственного контакта человека с компонентами связующего и др.

Однако наряду с преимуществами у данной технологии существует ряд недостатков:

- отсутствие возможности точного контроля распределения связующего по всей площади изготавливаемого изделия;
- невозможность получения высокого качества поверхности со стороны подачи связующего из-за наличия отпечатка распределительной сетки на поверхности и отсутствие возможности использования второй цулаги;
- высокие требования к герметичности вакуумных пакетов.

Несмотря на недостатки, метод вакуумной инфузии широко применяется во многих отраслях промышленности при изготовлении деталей слабо- и средненагруженных конструкций из ПКМ [19].

Характеристики ПКМ напрямую зависят от используемого полимерного связующего, поскольку при изготовлении деталей в результате физических и химических процессов оно превращается в трехмерную матрицу, обеспечивающую монолитность конструкционного материала. Из критически важных характеристик ПКМ, зависящих от матрицы отвержденного связующего, необходимо отметить следующие:

- физико-механические свойства и деформационная устойчивость;
- тепло-, термо-, влаго- и атмосферостойкость.

Кроме того, не менее важны и технологические характеристики используемых связующих, например: время гелеобразования, величина тепловыделения при прохождении реакции отверждения, исходные реологические характеристики

и динамика их изменения в процессе переработки. Указанные характеристики являются ключевыми при выборе оптимальной технологии переработки связующего в композиционные материалы в соответствии с конструктивными и геометрическими особенностями изготавливаемой детали или изделия [20–22].

Наиболее широко используемыми при производстве строительных ПКМ являются композиции на основе полиэфирных, винилэфирных, эпоксивинилэфирных, эпоксидных смол или смешанные композиции (гибриды). Для выполнения данной работы авторами выбрано эпоксивинилэфирное связующее, сочетающее преимущества как эпоксидных, так и полиэфирных смол. Так, физико-механические свойства отвержденных эпоксивинилэфирных связующих сопоставимы со свойствами отвержденных эпоксидных связующих. При этом главной особенностью данного класса смол являются их выдающиеся коррозионная и химическая устойчивости к действию агрессивных сред различной природы и низкие показатели влагопоглощения, что нехарактерно для полиэфиров, отвержающихся по аналогичному радикальному механизму [23, 24].

Активное использование эпоксивинилэфирных смол в промышленности началось с середины 60-х годов прошлого века. В настоящее время они используются для получения ПКМ, эксплуатация которых подразумевает постоянный контакт с химически агрессивными средами. Например, основными направлениями использования эпоксивинилэфирных смол являются химическое машиностроение (скрубберы, газгольдеры, емкости для хранения горюче-смазочных материалов), транспорт (пластики для автомобилей, ламинат, покрытия) и строительство (арматура для железобетонных конструкций) [25].

Таким образом, к основным преимуществам шпунтов из композитного материала можно отнести следующие:

- низкие затраты на эксплуатацию;
- легкость изделия по сравнению со стальными аналогами;
- высокая долговечность;
- высокие механические характеристики и прочность.

Кроме того, композитные шпунты характеризуются высокой устойчивостью к биологической коррозии, ржавчине, истиранию, морской воде и ультрафиолетовому излучению.

Использование конструкционных функциональных композиционных материалов нового поколения и конструктивных решений для шпунтовых ограждений позволит:

- существенно снизить затраты на транспортировку конструктивных элементов шпунтовых ограждений (шпунтовой элемент может изготавливаться в непосредственной близости от строительной площадки);

– сократить сроки возведения шпунтовых ограждений и количество применяемой тяжелой строительной техники;  
 – увеличить срок безремонтной эксплуатации и срок службы шпунтового ограждения.

**Результаты и обсуждение**

Ввиду того, что характеристики ПКМ напрямую зависят от используемого полимерного связующего, что является критическим для применения материалов в условиях повышенной агрессивности среды, например – морской воды. Данная работа была начата с разработки необходимого связующего.

В ВИАМ разработано высокоэффективное эпоксивинилэфирное связующее, обладающее комплексом свойств, соответствующих его применению при изготовлении элементов шпунтовых ограждений, – в табл. 1 приводятся его основные свойства.

Данное двухкомпонентное эпоксивинилэфирное связующее возможно использовать для изготовления изделий с высокой коррозионной устойчивостью методами вакуумной инфузии, контактного формования или намотки.

Для изготовления элементов шпунтовых ограждений выбран способ вакуумной инфузии – как наиболее простой и позволяющий изготавливать материалы с наименьшими затратами. Отработаны способы изготовления двух основных типов элементов шпунтовых ограждений:

- шпунт круглого сечения, изготавливаемый на основе плетеного рукава;
- шпунт «корытного» типа, изготавливаемый на основе равнопрочной стеклоткани.

На рис. 3 представлены фотографии процесса изготовления образцов шпунтовых ограждений круглого сечения с использованием плетеной преформы – от фиксации преформы на круглой оснастке (а), ее пропитки в вакуумном пакете (б, в) до готового изделия (г).

Данная схема с использованием надувной многоразовой оснастки позволяет изготавливать элементы шпунтовых ограждений круглого сечения больших диаметров, что в настоящее время затруднено при использовании, например, способа пултрузии, ввиду высокой стоимости применяемого пултрузионного оборудования и востребованности таких изделий в большом количестве – для обеспечения экономической эффективности их изготовления.

Таблица 1

**Основные свойства эпоксивинилэфирного связующего, используемого для изготовления элементов шпунтовых ограждений**

Свойства	Значения свойств
Внешний вид, цвет	Низковязкая прозрачная смола бледно-желтого цвета
Время гелеобразования при температуре 40±2°С, мин	20–40
Кажущаяся вязкость по Брукфильду при температуре 25±1°С, Па·с	0,2–0,4
Температура стеклования отвержденного связующего, °С (не менее)	80
Прочность при статическом изгибе, МПа	115
Модуль упругости при статическом изгибе, ГПа	3,2

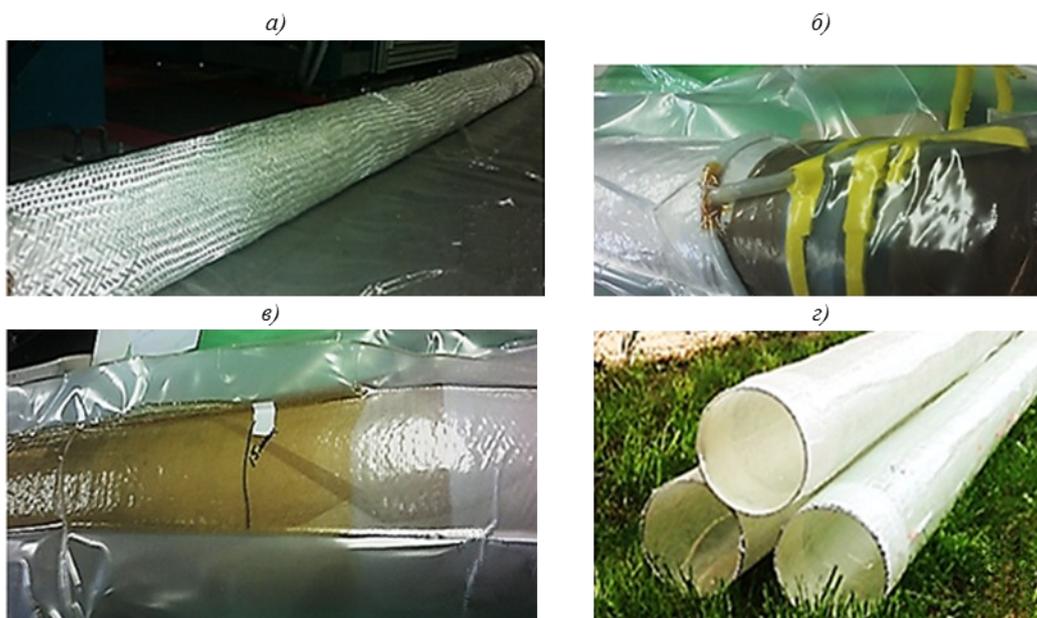


Рис. 3. Процесс изготовления образцов шпунтовых ограждений круглого сечения

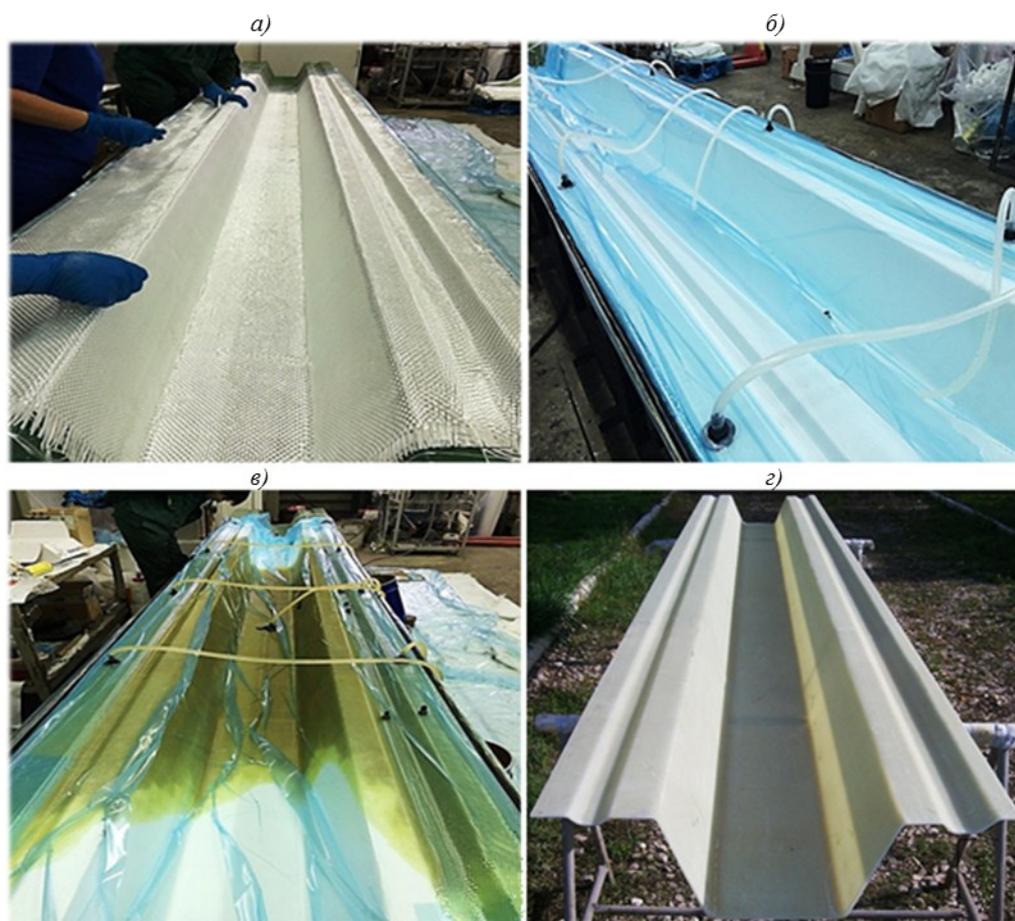


Рис. 4. Процесс изготовления образцов шпунтовых ограждений «корытного» типа

Таблица 2

**Основные физико-химические свойства стеклопластика, выполненного на основе эпоксивинилэфирного связующего, для использования в шпунтовых ограждениях**

Свойства	Значения свойств
Водопоглощение, %	0,37
Влагопоглощение, %	0,19
Сохранение механических свойств, %:	
при тепловом старении	93
при термовлажностном старении	90
по светостойкости	88
после термоциклирования	85
после воздействия УФ излучения	91

По схожей схеме на жесткой «корыто-подобной» оснастке с использованием равнопрочной стеклоткани и эпоксивинилэфирного связующего изготовлены образцы элементов шпунтовых ограждений «корытного» типа (шпунт Ларсена) (рис. 4).

Данный процесс схож с процессом изготовления шпунтов круглого сечения – от фиксации равнопрочной стеклоткани на жесткой оснастке (а), ее пропитки в вакуумном пакете (б, в) до готового изделия (г).

Как замечено ранее, применение материалов в

условиях повышенной агрессивности среды, например – морской воды, является обычным для шпунтовых стенок берегового укрепления. Показано, что при сочетании стекловолоконного наполнителя с эпоксивинилэфирным связующим получают высококоррозионностойкий материал, позволяющий использовать изделия из такого материала в широком спектре агрессивных сред.

В табл. 2 приведены основные физико-химические свойства стеклопластика, выполненного на основе эпоксивинилэфирного связующего, для использования в шпунтовых ограждениях.

Таблица 3

## Основные физико-механические свойства стеклопластика на основе плетеных преформ

Свойства	Значения свойств при температуре испытания, °С		
	-50	20	50
Предел прочности, МПа:			
при растяжении	360	370	360
при сжатии	360	340	260
при межслойном сдвиге	80	45	41
при изгибе	365	370	300

Таблица 4

## Основные физико-механические свойства стеклопластика из равнопрочной стеклоткани при направлении приложения нагрузки [0°]

Свойства	Значения свойств при температуре испытания, °С		
	-50	20	50
Предел прочности, МПа:			
при растяжении	495	420	375
при изгибе	565	510	470
при межслойном сдвиге	38	40	35
при сжатии	330	320	270

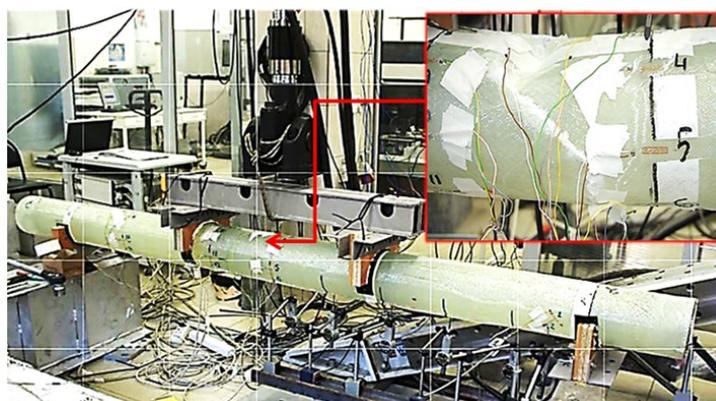


Рис. 5. Проведение испытаний напряженно-деформированного состояния образцов элементов шпунтовых ограждений (испытания проведены на оборудовании НИУ МГСУ)

Как видно из данных приведенных в табл. 2, полученный стеклопластик обладает высокими характеристиками по влаго- и водостойкости, светостойкости, хорошим сохранением свойств после воздействия УФ излучения. После испытаний также подтверждено сохранение высокой грибоустойчивости пластика во влажной среде при экспозиции в течение 3 мес, при температурах 50 и 70°С – сохранение свойств 91 и 98% соответственно. Пластик стоек к маслам и органическим растворителям.

Кроме того, проведены физико-механические испытания стеклопластика, изготовленного с использованием эпоксивинилэфирного связующего и двух типов наполнителя (плетеных преформ и равнопрочной стеклоткани), выполненных из одинакового стекловолокна. Результаты приведены в табл. 3 и 4.

Из приведенных в табл. 3 и 4 данных видно, что свойства образцов стеклопластиков, выполненных на основе плетеных преформ и равнопрочной стеклоткани с использованием одного и

того же связующего, разнятся – в первую очередь при испытании на растяжение и сжатие. Вероятнее всего, это связано с тем, что угол армирования плетеной преформы  $[\pm 45^\circ]$ , а угол армирования равнопрочной ткани –  $[0^\circ/90^\circ]$ , что и приводит к таким заметным отличиям в результатах физико-механических испытаний образцов.

Проведены комплекс физико-механических испытаний и оценка напряженно-деформированного состояния образцов элементов шпунтовых ограждений при различных значениях нагрузок и режимах нагружения (рис. 5). Изготовлены и испытаны цилиндрические оболочки из стеклопластика на основе плетеных преформ. Значения разрушающей нагрузки, полученные в ходе испытаний, дали объективную и четкую картину поведения конструкции, а также позволили подвести под них теоретическую основу для возможного прогнозирования прочности шпунтовых заготовок с другими геометрическими характеристиками. Обычно разрушение при изгибе происходило в

Таблица 5

## Результаты испытаний конструктивно-подобных элементов

Условный номер образца	Среднее значение внешнего диаметра, мм	Средняя толщина стенки, мм	Расчетный пролет, м	Разрушающая нагрузка, кН
1	196,0	2,50	2,4	16,16
2	192,5	2,20	2,4	13,02
3	197,0	2,51	2,4	20,66
4	196,2	2,60	2,4	27,96
5	198,0	2,50	2,4	20,36
6	192,0	2,50	2,4	19,27
7	199,0	2,60	2,4	27,68



Рис. 6. Укрепление береговой линии водоема с помощью стеклопластиковых шпунтов «корытного» типа производства ФГУП «ВИАМ» в поселке городского типа Языково Корсунского района Ульяновской области

области верхних волокон (в зоне чистого изгиба) с образованием складки наружной оболочки. Подобное явление, вероятнее всего, объясняется слабой сдвиговой прочностью композиционного материала при возникновении касательных нагрузок при четырехточечном изгибе. Для испытаний изготовлены образцы с 10 слоями стеклоткани (плетеного рукава), результаты испытаний приведены в табл. 5.

По разработанной технологии (методом вакуумной инфузии) с использованием жесткой «корытоподобной» оснастки, равнопрочной стеклоткани и эпоксивинилэфирного связующего изготовлена партия элементов шпунтовых ограждений «корытного» типа (шпунт Ларсена). С целью укрепления береговой линии водоема установлена подземная защитная стенка с использованием изготовленных шпунтов (рис. 6). Видно, что ввиду небольшой массы изделий нет необходимости в привлечении специализированной строительной техники для установки элементов шпунтовых ограждений на подготовленное место. Шпунтовые ограждения возможно устанавливать как вручную, так и с использованием малогабаритных вибропогрузателей или ручных пневмопробойников в полевых условиях.

Установленная на берегу подземная защитная стенка обеспечивает исключение подвижки грунта и организацию противодиффузионной завесы.

### Заключения

Таким образом, в результате проведенной работы разработан стеклопластик, изготавливаемый

с использованием плетеных преформ и равнопрочной стеклоткани.

Показаны высокие характеристики материала по влаго- и водостойкости, светостойкости, с хорошим сохранением свойств после воздействия УФ излучения. Физико-механические свойства материала находятся на уровне существующих стеклопластиков. Изготовлены элементы шпунтовых ограждений двух типов – круглого сечения и «корытного» типа, проведены испытания конструктивно-подобных элементов. Полученные результаты позволили заложить теоретическую основу для возможного прогнозирования прочности шпунтовых заготовок с другими геометрическими характеристиками.

С использованием изготовленной партии элементов шпунтовых ограждений установлена подземная защитная стенка, исключающая подвижки грунта и обеспечивающая организацию противодиффузионной завесы.

Таким образом, использование композитных шпунтов является весьма перспективным направлением применения ПКМ в гражданских областях промышленности, которое позволяет решать значительное количество вопросов – по снижению затрат на транспортировку, по сокращению сроков возведения шпунтовых ограждений и количеству применяемой тяжелой строительной техники, а также по увеличению сроков безремонтной эксплуатации и сроков службы шпунтового ограждения.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [26].

### Благодарности

Авторы выражают благодарность за помощь при проведении работы сотрудникам ФГУП «ВИАМ» и УНТЦ «ВИАМ» М.И. Душину, И.А. Короткову, А.В. Борщеву, Н.Н. Паниной, А.А. Баранникову.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
2. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
3. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: НОТ, 2008. С. 820–830.
4. Афанасьев Д.В., Ощепков М.Ю. Безавтоклавные технологии // Композитный мир. 2010. №5. С. 28–37.
5. Тимошук П.Н., Коган Д.И. Современные технологии производства полимерных композиционных материалов нового поколения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №4. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.11.2016).
6. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д., Старцев О.В., Вапиров Ю.М. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ // Авиационная промышленность. 2009. №4. С. 36–46.
7. Промышленные материалы: онлайн версия журнала. URL: <http://promresursy.com/materialy/polimery/kompozitnyematerialy/#ixzz4GIIgCE42> (дата обращения: 03.08.2016).
8. Pile Buck Magazine: интернет-версия журнала. URL: <http://www.pilebuck.com> (дата обращения: 06.08.2016).
9. Lee Composites: офиц. сайт. URL: <http://www.leecomposites.com> (дата обращения: 04.08.2016).
10. Superloc Fiberglass Reinforced Polymer (FRP) Sheet. Piling and Accessories: Product Brochure. URL: <http://www.creativepultrusions.com> (дата обращения: 04.08.2016).
11. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 3. Опыт применения полимерных композитных материалов в мостостроении // Науковедение: интернет-журнал. 2015. Т. 7. №5. С. 1–39. URL: <http://naukovedenie.ru> (дата обращения: 04.08.2016).
12. Власенко Ф.С., Раскутин А.Е., Донецкий К.И. Применение плетеных преформ для полимерных композиционных материалов в гражданских отраслях промышленности (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №1. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.11.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-5-5.
13. Чурсова Л.В., Раскутин А.Е., Гуревич Я.М., Панина Н.Н. Связующее холодного отверждения для строительной индустрии // Клеи. Герметики. Технологии. 2012. №5. С. 40–44.
14. Постнова М.В., Постнов В.И. Опыт развития безавтоклавных методов формования ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №4. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.11.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-4-6-6.
15. Донецкий К.И., Хрульков А.В., Коган Д.И., Белинис П.Г., Лукьяненко Ю.В. Применение объемно-армирующих преформ при изготовлении изделий из ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 35–39.
16. Донецкий К.И., Коган Д.И., Хрульков А.В. Использование технологий плетения при производстве элементов конструкций из ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №10. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.11.2016).
17. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. СПб.: НОТ, 2009. 380 с.
18. Душин М.И., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю. Установление причин образования пористости при изготовлении ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №6 (42). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.11.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-8-8.
19. Берлин А.А. Полимерные композиционные материалы. СПб.: Профессия, 2008. 557 с.
20. Хрульков А.В., Душин М.И., Попов Ю.О., Коган Д.И. Исследования и разработка автоклавных и безавтоклавных технологий формований ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 292–301.
21. Алентьев А.Ю., Яблокова М.Ю. Связующие для полимерных композиционных материалов: учеб. пособ. М.: МГУ. 2010. С. 69–75.
22. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Ким М.А., Бабин А.Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 260–265.
23. Yeh H.Y., Yang S.C. Building a composite transmission tower // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 1997. Vol. 16 (5). P. 414–424.
24. Sonti S.S., Barbero E.J. Material characterization on pultruded laminates and shapes // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 1996. Vol. 15 (7). P. 701–717.
25. Brown J.R., Mathys Z. Reinforcement and matrix effects on the combustion properties of glass reinforced polymer composites // Composites. 1997. Vol. 28 (7). P. 675–681.
26. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.