

УДК 621.763

МОСТОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИТОВ

А.Е.Ушаков, Ю.Г.Кленин, Т.Г.Сорина, А.Х.Хайретдинов, А.А.Сафонов

НПП «АпАТЭК-Дубна»

Рассматриваются постановка и реализация работ, направленных на создание пешеходных мостов с использованием полимерных композитов. Представлены реализованные конструкторские решения различных вариантов композитных мостов, дана расчётная оценка эффективности применения углепластиков в мостостроении и приведены результаты исследований, приведших к повышению стойкости к горению композита за счёт модификации полимерной матрицы наночастицами меди.

Ключевые слова: полимерные композиты, углепластики, композитные мосты, наночастицы меди.

BRIDGE STRUCTURES MADE OF COMPOSITES

A.E. Ushakov, U.G. Klenin, T.G. Sorina, A.H. Khairtdinov, A.A. Safonov

STTC «ApATeCh-Dubna»

Realization of the development aimed at designing of pedestrian bridges using fibre reinforced polymers is described. In the present article, design concepts for various composite bridges and an estimation of the efficiency of carbon fiber application in bridge engineering are shown. Also results of the research of the fire resistance increase of the composites by the modification of polymer matrix with copper nano-particles.

Keywords: polymer composites, carbon fibers, composite bridges, copper nano-particles.

Введение

В настоящее время в США и Европе проводятся экспериментальные расчётно-конструкторские и технологические работы, направленные на создание пешеходных мостов с преимущественным применением композитных стеклопластиковых и углепластиковых пултрузионных профилей [1, 2]. Высокие физико-механические характеристики стеклопластика, реализуемые в профилях, получаемых пултрузионным методом, позволили использовать эти изделия в качестве элементов мостовых конструкций, выделить эту область применения в индивидуальное направление [3, 4]. К основным преимуществам мостов из композитных пултрузионных профилей, по сравнению со стальными мостовыми конструкциями, следует отнести:

- высокую коррозионную и химическую стойкость стеклопластика, возможность использования в условиях повышенной влажности, сезонных и суточных температурных перепадов, отсутствие коррозии стальных соединительных элементов, находящихся в контакте со стеклопластиком;
- сопротивляемость ветровым нагрузкам;
- акустическую прочность и устойчивость к землетрясениям;
- возможность поставки в виде отдельно собранных, легко транспортируемых, заменяемых и наращиваемых модульных конструкций;

■ легковесность и возможность использования ручной сборки в труднодоступных для техники местах;

■ интегральное снижение монтажных расходов, массы опорных конструкций, снижение эксплуатационных расходов.

Кроме того, пространственно-ферменная конструкция пешеходного моста позволяет достаточно быстро и без существенных затрат установить крышу, защищающую пешеходов и саму конструкцию от воздействия атмосферных осадков.

Многолетний (в течение 40 лет) отечественный и зарубежный опыт разработки и эксплуатации композитов в составе силовых конструкций, в сочетании с новейшими высокопроизводительными (непрерывными) технологиями переработки материала в изделия (метод пултрusion и намотки), подтверждает правомочность постановки и решения задачи, направленной на проектирование и изготовление цельнокомпозитного пешеходного моста. Технологичность в переработке и относительно невысокая стоимость – основные критерии выбора.

Пултрузионная технология изготовления профилей для мостовых и строительных конструкций

Огромным потенциалом для поддержки и широкого внедрения предлагаемого направления обладает высокая, компьютерно-управляемая пултрузионная технология [5, 6] изготовления разнообразных силовых, в том числе мостовых длинномерных, профилей из одно- и двухосноармированных и изотропно-армированных стеклопластиков. Схема установки показана на рис. 1.

Суть пултрузионного процесса заключается в том, что непрерывный стеклоровинг 1 или нетканая, нитепрошивная лента 2 с заранее рассчитанным расположением (согласно спектру прикладываемых и воспринимаемых нагрузок) стеклонитей в плоскости ленты протягивается через ванну 3 с термореактивным полимерным связующим, затем поступает через фолдеры 4 в обогреваемую формирующую фильеру 5, отображающую геометрическую форму поперечного сечения изделия, в которой связующее за короткий промежуток времени отверждается не столько за счёт тепла извне, сколько за счёт тепла, выделяющегося в процессе реакции отверждения связующего, обеспечивающего равномерный прогрев пакета-заготовки в объёме. Последнее обстоятельство является определяющим при изготовлении толстостенных, более 5000 мм², профилей из стеклопластика, обладающего низким значением теплопроводности. Не менее важны, как показывает опыт, текстильная форма и поверхностная обработка стеклонаполнителя. В целях обеспечения расчётных физико-механических характеристик при изготовлении пултрузионных изделий применяются ровинги различных номиналов на основе стекла *E*, преимущественно высокого текса 4800–9600.

Использование прямых (активных) замасливателей для стеклонаполнителей диктуется требованиями обеспечения высокого качества конструкционного стеклопластика с хорошо организованной границей

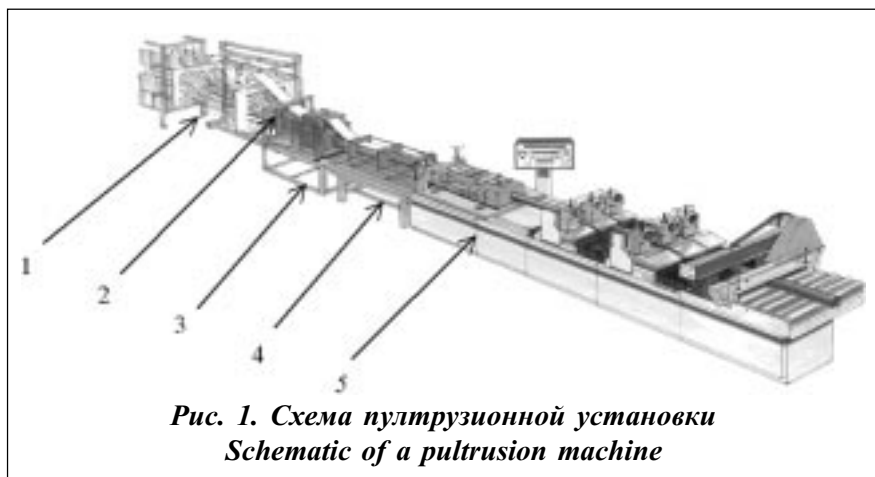


Рис. 1. Схема пултрузионной установки
Schematic of a pultrusion machine

Таблица 1

Свойства пултрузионных стеклопластиковых
профилей производства НПП «АпАТЭК-Дубна»

Показатель	Материал	
	на основе ровинга РБН	сочетание ровинга РБН и ленты НПЛ
Плотность, кг/м ³	1910–2000	1910
Разрушающее напряжение при статическом изгибе поперёк волокон, МПа	500	360
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	800	500
Модуль упругости при растяжении, МПа	3600	2400
Разрушающее напряжение при сжатии вдоль оси, МПа	280	280
Ударная вязкость поперёк волокон, кДж/м ²	500	450
Стойкость к горению	Г-2	

раздела «волокно – матрица», недоступной для проникновения влаги и других агрессивных сред.

Обязательными требованиями к материалу мостовых конструкций являются негорючесть и «вандалоустойчивость». Выполнение требований по стойкости к горению обеспечивается путём использования нанопорошков металлов с переменной валентностью и гидроксилсодержащих соединений. Особенно эффективно применение нанопорошков там, где необходимо достигнуть желаемого результата без изменения реологических характеристик связующего. Введение нанодобавки меди менее 1% приводит к повышению стойкости к горению.

Физико-механические характеристики и стойкость к воздействию пламени пултрузионных профилей из стеклопластика на основе стеклонанополнителей, пропитанных винилэфирной смолой, приведены в табл. 1.

Специалистами НПП «АпАТЭК» спроектировано и изготовлено более 25 мостовых конструкций с применением стеклопластика, среди них:

⇨ Пешеходный мост в районе платформы Чертаново. Дата сдачи в эксплуатацию – октябрь 2004 г. Длина пролёта 41,4 м. Мост расположен в Москве на ул. Промышленная, около о.п. Чертаново (рис. 2,а).

⇨ Пешеходный мост через платформу Косино. Дата сдачи в эксплуатацию – июль 2005 г. Длина пролёта 47 м. Мост расположен в Москве на ул. Каскадная, около о.п. Косино (рис. 2,б). Пешеходный переход над платформой Косино, разработанный и установленный в рамках реконструкции казанского направления Московской железной дороги, является первым в России мостом со сходами, все элементы которого изготовлены из композиционного материала. Затруднённые условия монтажа, связанные с реконструкцией инфраструктуры дороги и прилегающей территории, существенно ограничили в данном случае объём использования специальной техники. Решением этой проблемы стало применение мостовой конструкции из композиционного материала, в результате чего мост был установлен за несколько часов в стеснённых условиях без привлечения дополнительных технических и монтажных ресурсов.

⇨ Платформа Тестовская. Длина пролёта 48 м. Мост расположен в Москве на пересечении Шмитовского проезда и Третьего транспортного кольца. Время создания моста от начала проектирования до установки на место составило 2 мес (рис. 2,в).

⇨ Мобильный сборно-разборный пешеходный мост. Длина пролёта 50 м. Мост устанавливался с 27 декабря 2006 г. по 15 апреля 2007 г. в Москве на Смоленской площади (рис. 2,г).

Мостовые строения проектировались в соответствии со Стандартом организации СТО 11567537.01–2008, который разработан специалистами НПП «АпАТЭК» и согласован с ОАО ЦНИИС НИЦ «Мосты», ГУП «Гормост», ОАО «Союздорпроект».

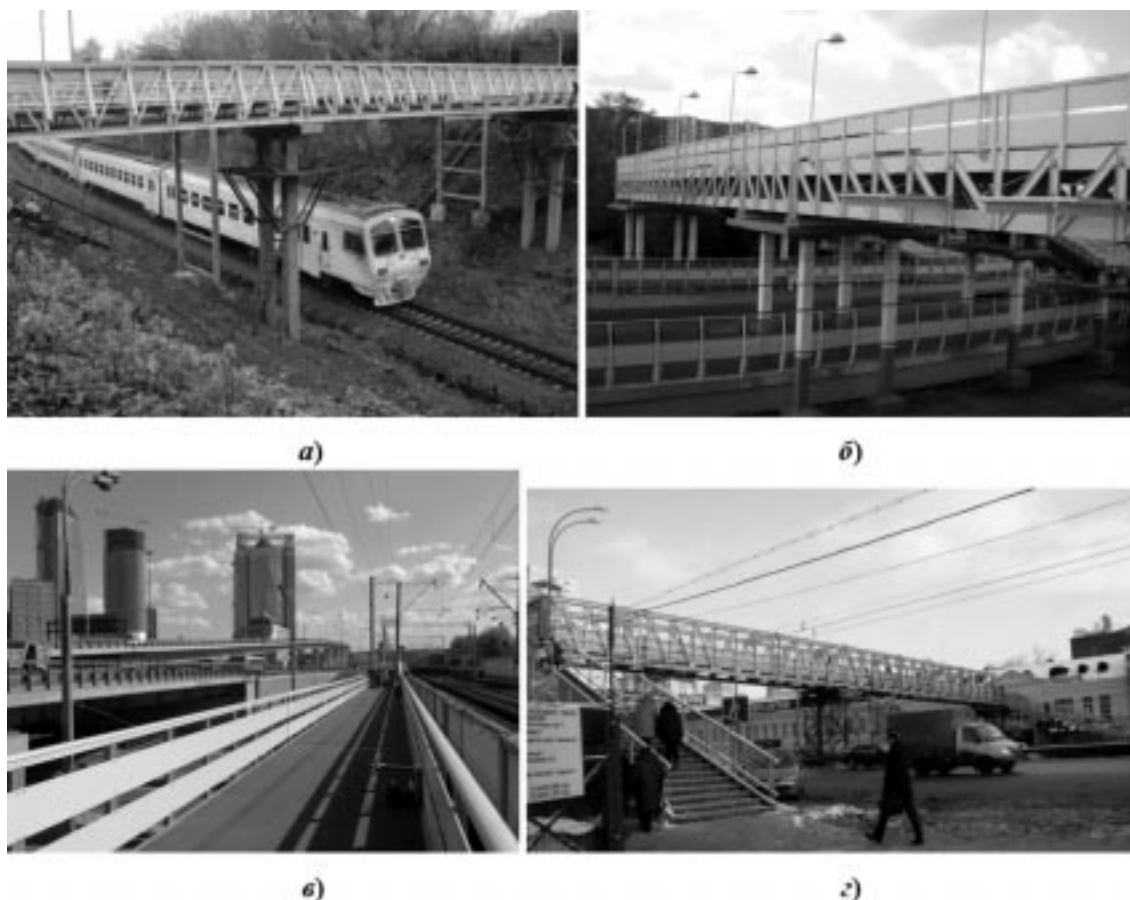


Рис. 2. Мостовые конструкции из стеклопластика
Bridge structures made of GFRP

В табл. 2 приведены сравнительные данные по структуре цен на создание типового верхнепешеходного моста с пролётом 27 м и шириной 3 м. Расчёты проведены с учётом существующих цен на материалы и нормативов некалькулируемых статей затрат, действующих в конкретном производстве.

Приведённые в табл. 2 данные показывают, что стоимость стеклопластикового моста с применением пултрузионных профилей оказывается на 9,56% дороже стального моста. Однако стоимость эксплуатационных расходов за рассматриваемый период в течение 50 лет на поддержание металлической конструкции составит около 160 000 долл., а для конструкции из стеклопластика – 20 000 долл.

Исходя из первоначальной стоимости создания мостов и учитывая превышение эксплуатационных затрат по обслуживанию стального моста, общая сумма затрат по стальному мосту составит 411 000 долл., а по композитному – 295 000 долл., что явно показывает преимущество композитных пултрузионных конструкций.

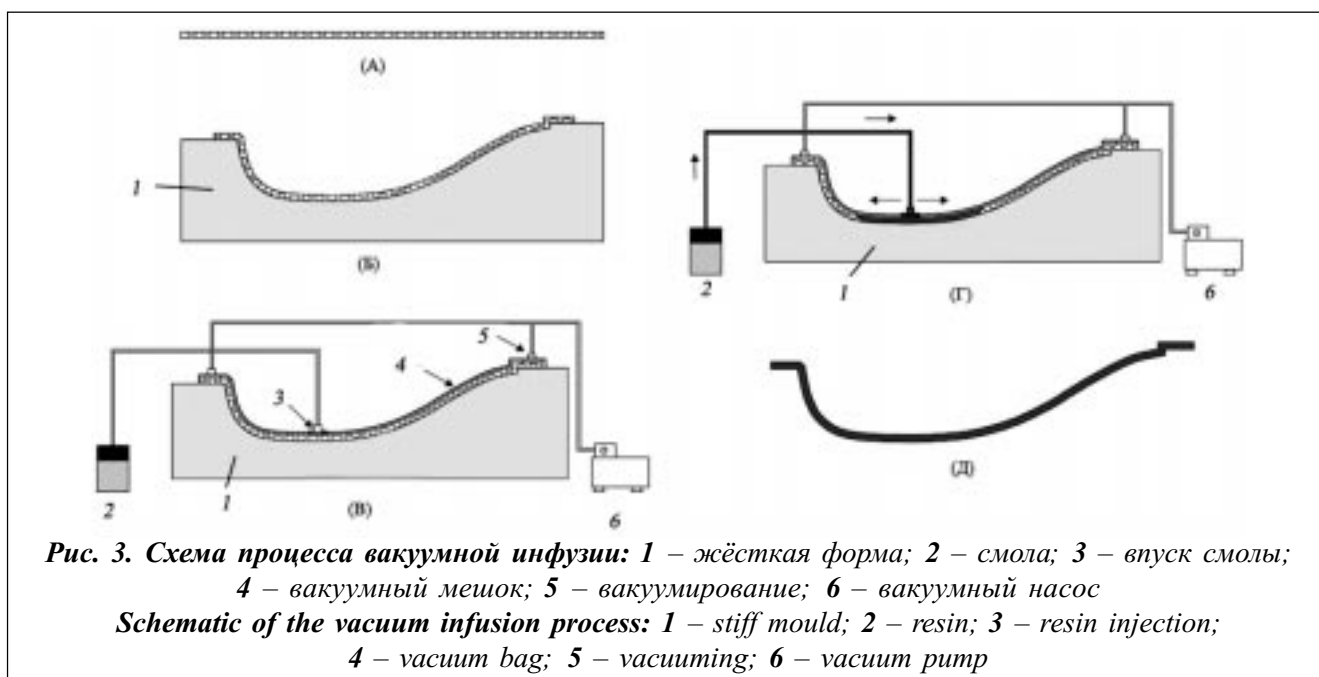
Инфузионная технология изготовления крупногабаритных конструкций

Вторым инновационным методом изготовления арочных мостовых конструкций из композитов является вакуумная инфузия. Вакуумная инфузия – это технологический процесс изготовления композитных изделий, при котором материал формируется путём пропитки армирующего наполнителя низковязкой смолой за счёт действия вакуума [5, 7]. Цикл изготовления изделия методом вакуумной

Таблица 2

Затраты на создание и монтаж моста из металлических и композитных конструкций

Статья затрат	Стеклопластик	Сталь
	тыс. долл. США	
Проектирование	60	30
Фундамент	45	55
Материалы	62	10
Подборки	72	90
Монтаж на месте	21	42
Обработка поверхности	7	22
Технологическое оснащение	8	2
Всего:	275	251



инфузии (рис. 3) состоит из пяти стадий: подготовка армирующего наполнителя (рис. 3,а), укладка армирующего наполнителя в жёсткую форму (рис. 3,б), установка мешка для вакуумирования и системы пропитки (рис. 3,в), пропитка армирующего наполнителя смолой за счёт пониженного давления (рис. 3,г), полимеризация и съём готового изделия (рис. 3,д).

С использованием технологии вакуумной инфузии возможно изготавливать крупногабаритные композитные конструкции. Примерами таких изделий являются корпуса кораблей [8], лопасти ветряных установок [9], мостовые конструкции [10] и др. На рис. 4 показан первый в России арочный мост из полимерного композиционного материала [11]. Мост изготовлен в НПП «АпАТЭК» методом вакуумной инфузии. Длина пролёта 23 м. Мост был установлен 18 июня 2008 г. в Москве в Парке 50-летия Октября (станция метро «Проспект Вернадского»). В результате выполнения данного проекта была разработана продуктовая линейка необслуживаемых модульных композитных арочных мостов для зон отдыха, парков и малых рек с длиной пролёта от 15 до 30 м и со сроком службы до 100 лет. Внедрение новой технологии вакуумной инфузии в серийное производство позволило обеспечить изготовление мостовой конструкции за один технологический переход, тем самым минимизировав работы по сборке и существенно снизив себестоимость. Применение данного технологического процесса для производства мостов и других строительных конструкций снимает ограничения в области



Рис. 4. Арочный мост из полимерного композиционного материала
Arched bridge made of polymer composite material

дизайна, неизбежно возникающие при проектировании из элементов типовой номенклатуры, и позволяет создавать новые, необычные, радующие глаз архитектурные формы.

Эффективность использования композитов на основе углеродных волокон в мостостроении

Новые задачи, связанные с необходимостью увеличения длины пролётных строений, требуют создания и применения композитов с более высоким модулем упругости, который может быть достигнут за счёт использования в составе композита углеродных волокон [11]. Требования по прочности и модулю упругости к углеродным волокнам, предназначенным для использования в

мостостроении, не столь высоки по сравнению с таковыми, предъявляемыми к волокнам, применяемым в авиации и космосе. Для мостовых конструкций удельные характеристики не столь существенны. Превалирующим фактором является соотношение упругопрочностных характеристик и цены.

Цель настоящих исследований состояла в том, чтобы выбрать углеродные волокна с физико-механическими характеристиками, которые бы при введении в состав профилей из стеклопластика обеспечивали повышение жёсткости без значительного удорожания мостовых конструкций.

Для решения этой задачи проведён комплекс расчётных, технологических и экспериментальных исследований и сформулированы технические требования к углеродным волокнам исходя из критерия стоимости базовых материалов, а также определено объёмное содержание углеродного волокна в сечении профилей и отработана технология изготовления профилей из углепластика.

Для изготовления пултрузионных профилей, используемых в строительстве и мостостроении, были выбраны углеродные жгуты индустриального применения, изготовленные на основе волокон полиакрилонитрила (ПАН) – волокон высокого метрического номера 10–30 ктекс (100–300 К) (К = 1000 филаментов) [12]. Поверхность углеродного жгута активирована и обработана универсальным аппретирующим составом, пригодным для совмещения с винилэфирными, эпоксидными, полиуретановыми и фенольными связующими.

Характеристики углеродных волокон в сравнении со стеклянными приведены в табл. 3.

Физико-механические характеристики пултрузионных однонаправленных композитов на основе гибридного эпоксивинилэфирного связующего приведены в табл. 4.

Как следует из табл. 4, при равном содержании волокон модули упругости при растяжении и сжатии различаются в ~ 2 раза.

Многокритериальный подход позволил найти области для параметров, ответственных за повышение жёсткости и конкурентоспособности элементов мостовой конструкции из углепластика по сравнению с элементами мостовых конструкций из чистого стеклопластика, определив свойства волокон, их объёмное содержание, характер распределения в сечении, геометрию профиля и цену.

Было показано, что для увеличения жёсткости швеллера наиболее эффективно вводить вставки из углеродных волокон в его полки.

Таблица 3

Характеристики углеродных и стеклянных волокон

Волокно	Разрывная прочность, МПа	Модуль упругости, ГПа	Диаметр волокна, мкм	Содержание аппрета, % масс.	Плотность, кг/м ³
Углеродное волокно, УК-П	2500–2800	160–200	7,5–8,5	0,5–1,0	1730–1750
Стекловолокно «Е»	2500–2800	72–80	17	0,5	2560

Таблица 4

Физико-механические характеристики пултрузионных композитов

Материал	Содержание волокна, % об.	Плотность, кг/м ³	Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	Модуль упругости при растяжении, ГПа, не менее	Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	Модуль упругости при сжатии, ГПа, не менее	Предел прочности при сдвиге, МПа, не менее
Углепластик	60	1560	1200	105	700	95	60
Стеклопластик	60	2050	1200	48	500	45	60

Рассмотрим произвольный швеллер (рис. 5), который характеризуется следующими параметрами: высота стенки H , ширина полки B , толщина полки T_1 , толщина стенки T_2 .

Основными характеристиками профиля являются следующие величины:

- A – площадь сечения;
- g – погонный вес профиля;
- I_{xx} – момент инерции сечения относительно оси OX ;
- EI_{xx} – жёсткость сечения относительно оси OX ;
- k_{xx} – увеличение жёсткости сечения относительно оси OX при введении углеродных вставок;
- p – увеличение себестоимости профиля при введении углеродных вставок.

Представляло интерес оценить расчётным путём изменение жёсткости профиля в зависимости от объёмного содержания углеродных волокон с различным модулем упругости (рис. 6). Цифрами 1, 2, 3 обозначены зависимости, показывающие относительное изменение расчётной жёсткости от объёмного содержания v углеродных волокон с различными модулями упругости $E = 350, 270$ и 190 ГПа соответственно.

Как следует из рис. 6, использование высоко-модульных волокон ($E = 300–350$ ГПа) позволяет в 4 раза повысить жёсткость профиля.

Однако углеродное волокно стоит намного дороже, чем стеклянное волокно. Поэтому стоимость швеллера с углеродными волокнами может превышать выгоды, полученные за счёт увеличения его жёсткости. Для оценки эффективности использования новых материалов введём величину, которую назовём эффективностью использования $K_{\text{и}}$. Эта величина рассчитывается по формуле

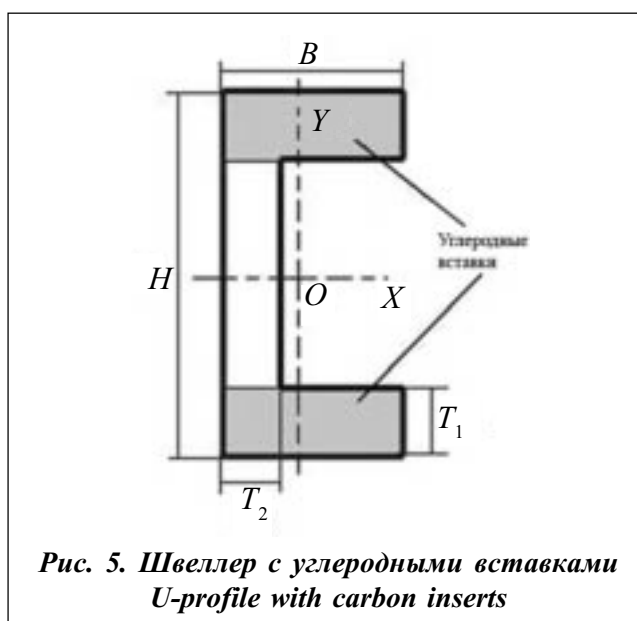


Рис. 5. Швеллер с углеродными вставками
U-profile with carbon inserts

$$K_n(\varphi) = \Delta k_{xx}(\varphi) / \Delta p(\varphi),$$

где Δk_{xx} – интенсивность увеличения жёсткости при изменении параметров; Δp – интенсивность увеличения себестоимости материалов; φ – изменяемый параметр.

Если $K_n < 1$, то модификацию профиля считаем не эффективной, в противном случае – эффективной.

Оценим параметр K_n при введении углеродных вставок в швеллер по формуле

$$K_n = \left(\frac{K_{yg}(v_{yg}) - K}{K} \right) / \left(\frac{P_{yg}(v_{yg}) - P}{P} \right) = \left(\frac{K + v_{yg}(E_{yg} - E_{ст})I_{yg} - K}{E_{ст}I} \right) / \left(\frac{P + v_n v_{yg}(p_{yg}\rho_{yg} - p_{ст}\rho_{ст})S_{yg} - P}{P} \right) = \frac{\Delta E}{(p_{yg}\rho_{yg} - p_{ст}\rho_{ст})} \frac{I_{yg}}{I} \frac{P}{v_n S_{yg}}, \quad (1)$$

где K_{yg} – жёсткость профиля с углеродными вставками; K – жёсткость профиля без углеродных вставок; $\Delta E = (E_{yg} - E_{ст})/E_{ст}$ – относительное увеличение модуля упругости углеродного волокна по отношению к стеклянному волокну; v_{yg} – объёмное содержание углепластика в углеродной вставке; v_n – объёмное содержание армирующего наполнителя в пластике; P_{yg} – себестоимость профиля с углеродными вставками; P – стоимость одного погонного метра профиля без углеродных вставок; E_{yg} , $E_{ст}$ – модуль углепластика и стеклопластика; p_{yg} – стоимость 1 кг углеродного волокна; $p_{ст}$ – стоимость 1 кг стеклянного волокна; ρ_{yg} – плотность угля; $\rho_{ст}$ – плотность стекла; I – момент инерции профиля; I_{yg} – момент инерции углеродной вставки; S_{yg} – площадь углеродной вставки.

Анализируя выражение (1), можно сделать вывод, что эффективность зависит от отношения

между увеличением модуля упругости и ценой на углеродное волокно, а также от отношения геометрических параметров.

Учитывая, что при эффективной модификации $K_n \geq 1$, можно найти зависимость между стоимостью углеродного волокна и модулем упругости, при котором выгодно использовать углеродное волокно:

$$p_{yg} \leq \frac{1}{\rho_{yg}} \left(p_{ст}\rho_{ст} + \Delta E \frac{I_{yg}}{I} \frac{P}{v_n S_{yg} \cdot 1 \text{ м}} \right). \quad (2)$$

В качестве примера оценим максимально допустимую стоимость углеродного волокна при модификации мостового швеллера 388 x 120 x 12/10 мм [4].

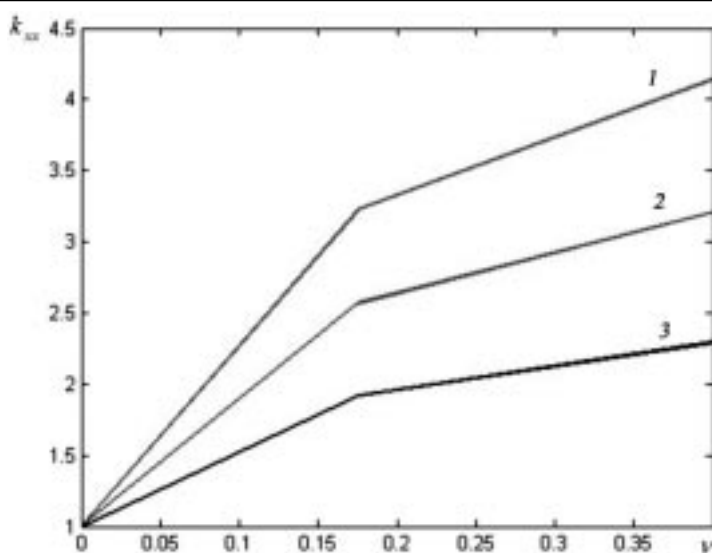


Рис. 6. Относительное изменение расчётной жёсткости в зависимости от объёмного содержания волокна

The estimated relative stiffness of the profile versus fibre volume fraction

Входные параметры

Плотность углерода, г/см ³	1,73
Плотность стекла, г/см ³	2,56
Стоимость 1 кг УК, у.е.	18
Стоимость 1 кг стекловолокна, у.е.	1,6
Содержание армирующего наполнителя	0,4
Модуль стеклопластика, ГПа	34,4
Модуль углепластика, ГПа	78,8
Момент инерции, мм ⁴	142×10^6
Момент инерции углестеклопластиковой вставки, мм ⁴	101×10^6
Стоимость стеклопластикового швеллера, у.е./м	35
Площадь углестеклопластиковой вставки, мм ²	2880

Подставляя эти значения в формулу (2), получаем, что стоимость углеродного наполнителя не должна превышать 18 у.е.

Был изготовлен пултрузионным способом швеллер поперечного сечения 388 x 120 x 12/10 мм. Углеродный жгут УК (30 ктекс) вводился равномерно в полки швеллера, чередуясь со стекловолокном. При этом объёмное содержание углеродного волокна в материале полки составило 20% (по объёму всего изделия 10%). На рис. 7 представлена фотография натурального сечения профиля со вставками из углеродного волокна.

Характеристики гибридного материала стеклоуглепластика, полученные на образцах, вырезанных из полок профиля, приведены в табл. 5.

Фотография установки для испытания на изгиб полноразмерного профиля приведена на рис. 8.

В табл. 6 представлены результаты эксперимента на изгиб для стеклоуглепластикового и стеклопластикового швеллеров (пролёт 2,8 м). Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что жёсткость профиля повысилась в 1,4 раза.

При сопоставлении полученных данных установлена относительно высокая сходимость расчётных и экспериментальных значений жёсткости пултрузионного профиля на основе угле-стеклопластика, подтверждающая эффективность использования углеродных волокон с модулем 160–200 ГПа для пултрузионных элементов мостовых конструкций.



Рис. 7. Поперечное сечение профиля со вставками из углеродного волокна
A cross section of the profile with carbon fiber inserts



Рис. 8. Установка для испытания швеллера
Testing machine for U-profile

Таблица 5

Характеристики стеклоуглепластика

Характеристика	Среднее значение	Коэффициент вариации, %
Предел прочности на растяжение σ_b , МПа	529	10,2
Модуль упругости E , ГПа	48,27	7,1
Предел прочности на сжатие вдоль армирования σ_b , МПа	366	9,5
Предел прочности на сжатие поперёк армирования σ_b , МПа	98,9	7,4
Разрушающее напряжение сдвига τ , МПа	41,1	2,6

Таблица 6

Результаты эксперимента на изгиб

Материал	Нагрузка, т	Прогиб, мм	Увеличение жёсткости
Стеклопластик	10	9,4	1,0
Стеклоуглепластик	10	6,7	1,4

Наноматериалы для мостостроения

Технологические процессы изготовления элементов мостовых конструкций методами пултрузии и инфузии требуют разработки полимерных связующих со строго регламентированными реологическими характеристиками, которые затрудняют решение проблемы стойкости к горению, например, введением большого количества порошкообразных антипиренов, резко повышающих вязкость связующего.

Очевидным решением проблемы является использование наномодификатора – порошка наночастиц меди в количестве менее 1%, практически не влияющем на вязкость связующего, но обеспечивающем эффект по параметрам, характеризующим сопротивляемость горению на уровне композита, содержащего более 100% тригидрата оксида алюминия [13].

Механизм работы наномеди как антипирена основан на передаче 4f-электрона радикалу ОН, освобождающемуся при горении полимера. При этом 0-валентная медь окисляется, а радикал восстанавливается и становится неактивным, горение прекращается. Известно, что медь является сильным восстановителем и может вывести из рабочего состояния отвердители и катализаторы. Для исключения этого отрицательного эффекта проводилось капсулирование наномеди эпоксидными составами. Для предотвращения окисления все процессы совмещения наночастиц меди с полимерами осуществлялись в вакуумной среде. В патентах России и США показано, что введением наночастиц меди в сочетании с наночастицами силикатов и тригидратом оксида алюминия достигается синергетический эффект огнезащиты полимеров и композитов на их основе.

На основе связующего, модифицированного наномедью, были изготовлены пултрузионные профили (швеллер 400 х 120 х 18 мм) (рис. 9).



Рис. 9. Стеклопластиковый швеллер 400 × 120 × 18 мм на основе винилэфирной смолы с содержанием наночастиц меди
A U-profile of a size of 400 × 120 × 18 mm on the base of vinyl ester resin with nano-copper

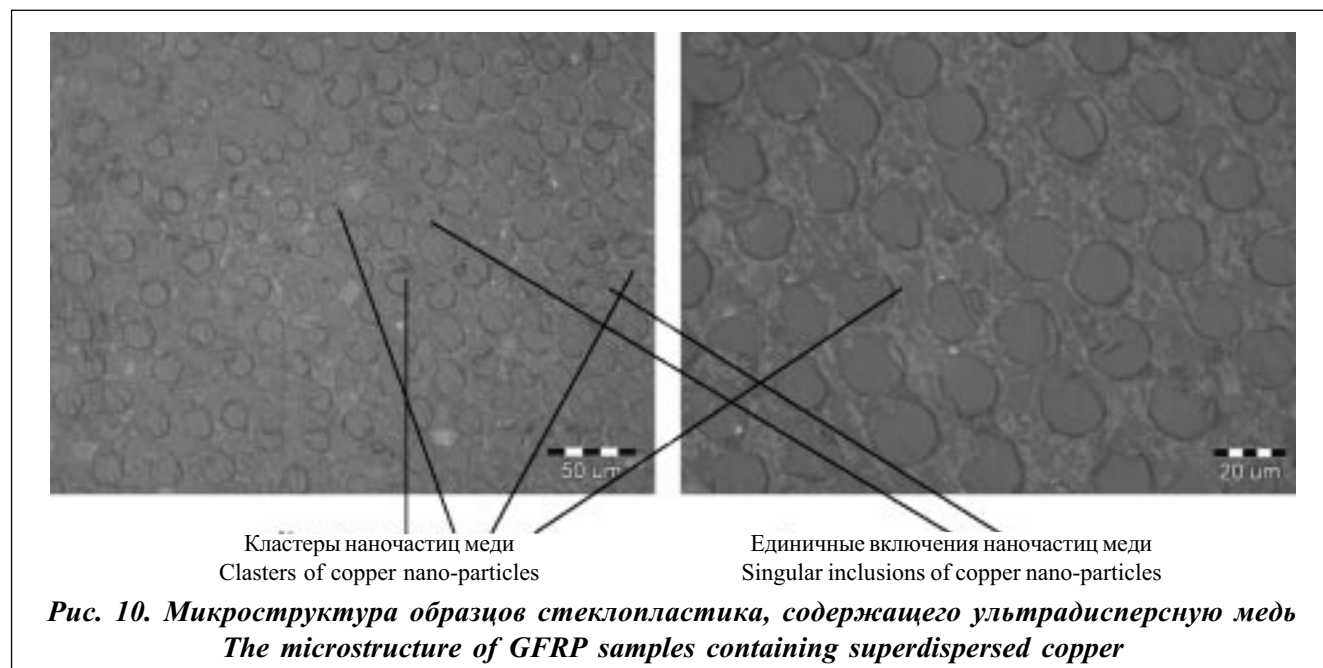


Таблица 7

**Результаты определения горючести
и воспламеняемости**

Показатель	КМ + 100%	КМ + наночастицы меди
Горючесть ГОСТ 30244–94		
Температура дымовых газов, °С	184	105
Время самостоятельного горения, с	29	26
Повреждения образца по длине, %	15	12
Степень повреждения образцов по массе	2	1
Воспламеняемость ГОСТ 30402–96		
Время до воспламенения при плотности теплового потока, с:		
20 кВт/м ²	600	отсутствует
25 кВт/м ²	-	911
30 кВт/м ²	154	391
Критическая поверхностная плотность теплового потока, кВт/м ²	20	25

Методом электронной микроскопии исследована структура образцов композита, вырезанных из швеллера. Снимки приведены на рис. 10, на которых видны единичные включения частиц меди и кластеры из нескольких частиц.

В табл. 7 приведены результаты определения горючести и воспламеняемости по строительным нормам. Из представленных результатов видно: при испытании на горючесть снижаются практически все показатели, в частности, один из наиболее важных – температура дымовых газов. Результаты по снижению температуры дымовых газов практически в 1,5 раза и отсутствие воспламенения при плотности теплового потока при 20 кВт/м² являются важными пока-



зателями для объектов, эксплуатирующихся в подземных переходах, например, пандусов для инвалидов.

С применением наномодифицированного связующего изготовлена партия пултрузионных профилей, и с их использованием построен первый мостик, подаренный НПП «АпАТЭК» городу Сочи. Длина пролёта 13 м. На рис. 11 показаны области применения нанодобавок.

Библиографический список

1. Кленин Ю.Г. и др. Мостовые конструкции из стеклопластика / Ю.Г.Кленин, С.Н.Озеров, В.Т.Семёнов, А.Е.Ушаков, А.Х.Хайретдинов // Внедрение опыта прикладных перспективных технологий авиастроения в промышленности и на транспорте : сб. статей. Вып. 1. М. : Изд-во ЦАГИ, 2001. С. 135–140.
2. Кленин Ю.Г. и др. Применение композиционных материалов для мостовых конструкций / Ю.Г.Кленин, А.В.Панков, Т.Г.Сорина, А.Е.Ушаков // Внедрение опыта прикладных перспективных технологий авиастроения в промышленности и на транспорте : сб. статей. Вып. 3. М. : Изд-во ЦАГИ, 2004. С. 5–12.
3. Озеров С.Н., Панков А.В. Выбор конструктивно-силовой схемы пешеходного моста и сортамента профилей // Внедрение опыта прикладных перспективных технологий авиастроения в промышленности и на транспорте : сб. статей. Вып. 3. М. : Изд-во ЦАГИ, 2004. С. 42–48.

4. Казак А.Е., Панков А.В. Оценка возможности создания железнодорожного моста из композитных пултрузионных профилей // Внедрение опыта прикладных перспективных технологий авиастроения в промышленности и на транспорте : сб. статей. Вып. 3. М. : Изд-во ЦАГИ, 2004. С. 36–41.
5. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология : учеб. пособие / М.Л.Кербер, В.М.Виноградов, Г.С.Головкин и др. ; под ред. А.А.Берлина. СПб. : Профессия, 2008.
6. Кленин Ю.Г. Разработка пултрузионной технологии производства профилей силового и электроизоляционного назначения // Внедрение опыта прикладных перспективных технологий авиастроения в промышленности и на транспорте : сб. статей. Вып. 2. М. : Изд-во ЦАГИ, 2003. С. 36–38.
7. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков / Гуртовик И.Г., Соколов В.И., Трофимов Н.Н., Шалгунов С.Г. М. : Мир, 2002.
8. Marshall R. All about powerboats: understanding design and performance. McGraw-Hill Professional, 2002. ISBN 0071362045, 9780071362047.
9. Koefoed M. Modeling and Simulation of the VARTM Process for Wind Turbine Blades : Special Report. No. 50. Institute of Mechanical Engineering, Aalborg University. Denmark. January 2003, ISSN 0905-2305.
10. Ushakov A., Klenin Y., Ozerov S. Development of modular arched bridge design // Proceedings of 5th International Engineering and Construction Conference (IECC'5). Irvine, CA, USA. 2008. P. 95–101.
11. Композиционные материалы : в 8 т. Т. 3 : под ред. Л.Браутмана, Р.Крока ; пер. с англ. М. : Машиностроение, 1978; Применение композиционных материалов в технике / под ред. Б.Нотона, 1978.
12. Углеродные волокна / под ред. С.Симамуры ; пер. с япон. М. : Мир, 1987.
13. Pultrusion composites and products with high fire resistance on the base of nanomodified polymers / A.E.Ushakov, U.G.Klenin, T.G.Sorina, A.X.Hayretidinov, A.A.Safonov // Proceedings of 2nd Global Pultrusion Conf. «Composite Profiles – Engineering & Design». Baltimore, USA, 2009.

Сведения об авторах

- А.Е. Ушаков:** профессор, д-р техн. наук. Генеральный директор НТИЦ «АПАТЭК-Дубна». Университетская ул., д. 11, стр. 16. 141980 Дубна, Россия
- Ю. Г. Кленин:** управляющий директор НТИЦ «АПАТЭК-Дубна».
- Т.Г. Сорина:** канд. техн. наук, главный специалист НТИЦ «АПАТЭК-Дубна».
- А.Х. Хайретдинов:** главный специалист НТИЦ «АПАТЭК-Дубна».
- А.А. Сафонов:** канд. техн. наук, начальник отдела НТИЦ «АПАТЭК-Дубна».