



УДК 678.8

**ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ В СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ**

Ф.С. Власенко

кандидат технических наук

А.Е. Раскутин

кандидат технических наук

Август 2013

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Труды ВИАМ»,
№8, 2013 г.

УДК 678.8

Ф.С. Власенко, А.Е. Раскутин

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Рассмотрены ряд областей применения ПКМ в строительной индустрии в России и за рубежом, преимущества и недостатки ПКМ в сравнении с традиционными материалами. Приведены тенденции развития технологий изготовления и применения таких изделий, как композитная арматура и композитные мостовые настилы. Выделены основные сдерживающие факторы развития рынка ПКМ строительного назначения в России.

Ключевые слова: *ПКМ в строительных конструкциях, композитная арматура, стеклопластиковая арматура, композитные мостовые настилы, мостовые настилы из полимерных композиционных материалов, новые типы композитной арматуры, полимерные композиционные материалы в строительстве.*

F.S. Vlasenko, A.E. Raskutin

APPLYING FRP IN BUILDING STRUCTURES

The paper considers a number of FRP applications in the construction industry in Russia and abroad, the advantages and disadvantages of FRP compared with traditional materials. Given the technology trends and use of such products as FRP Rebar and FRP bridge decks. The basic constraints of the market FRP for construction purposes in Russia.

Key words: *FRP in building structures, FRP rebar, GFRP rebar, FRP bridge decks, bridge decks made of polymer composite materials, new types of FRP rebar, polymer composites in construction*

В настоящее время на мировом рынке наблюдается увеличение объемов применения ПКМ в строительной индустрии. Так, в 2010 году объем рынка полимерных композиционных материалов (ПКМ) в сегменте «строительство» составил ~3,1 млн. долларов (~17% от общего объема). По прогнозам экспертов объем данного

сегмента увеличится к 2015 году до 4,4 млн. долларов. Применение ПКМ в строительстве позволяет уменьшить массу строительных конструкций, повысить коррозионную стойкость и стойкость к воздействию неблагоприятных климатических факторов, продлить межремонтные сроки, выполнять ремонт и усиление конструкций с минимальными затратами ресурсов и времени. Однако необходимо отметить, что развитие отечественного рынка ПКМ строительного назначения, как и всего рынка ПКМ в целом, значительно уступает мировому. В последние годы принимается ряд мер, направленных на развитие технологий и производства ПКМ, среди которых формирование в 2010 году технологической платформы «Полимерные композиционные материалы и технологии». Одним из инициаторов создания технологической платформы является ВИАМ, принимающий активное участие в работе по развитию композитной отрасли и формированию рынка композиционных материалов и соответствующих технологий в Российской Федерации не только в сегменте авиационной промышленности, но и в других сегментах, в том числе в строительном [1, 2].

Как отмечалось выше, «строительный» сегмент занимает существенную часть рынка ПКМ. Основными областями применения ПКМ являются: арматура и гибкие связи; шпунтовые сваи и ограждения; сэндвич-панели, оконные и дверные профили; элементы мостовых конструкций (пешеходные мосты, переходы, несущие элементы, элементы ограждения, настилы, вантовые тросы); системы внешнего армирования.

Принимая во внимание острую необходимость в масштабном строительстве новых и реконструкции имеющихся объектов транспортной инфраструктуры, основное внимание в данной статье будет уделено таким областям применения ПКМ, как композитная арматура и элементы мостовых конструкций.

За рубежом широкое внедрение композитной арматуры в качестве армирующего материала строительных бетонных конструкций началось с 80-х годов прошлого столетия, в первую очередь при строительстве мостов и дорог. В Советском Союзе научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по разработке и применению композитной арматуры начались в 50-е годы прошлого столетия. В 1963 г. в г. Полоцке был сдан в эксплуатацию цех по опытно-промышленному производству стеклопластиковой арматуры, а в 1976 году в НИИЖБ и ИСиА были разработаны «Рекомендации по расчету конструкций со стеклопластиковой арматурой» [3]. Таким образом, научно-технический задел по изготовлению композитной арматуры был создан еще в Советском Союзе. Композитная арматура на основе непрерывного

волокнутого наполнителя и полимерной матрицы имеет ряд значительных преимуществ по сравнению со стальной арматурой (в том числе и с антикоррозионным покрытием), среди которых малая плотность (в 4 раза легче стальной), высокая коррозионная стойкость, малая теплопроводность, диэлектрические свойства, более высокая прочность. Малая плотность и высокая коррозионная и химическая стойкость особенно важны при строительстве объектов транспортной инфраструктуры (дороги, мосты, эстакады), прибрежных и портовых сооружений.

В последние годы в России обозначился резкий рост интереса к выпуску композитной арматуры, предназначенной для армирования бетонных строительных конструкций. В качестве армирующего наполнителя в арматуре может использоваться стекловолокно, непрерывное базальтовое волокно, а также углеродное волокно. Наиболее распространенный способ изготовления композитной стекло- или базальтопластиковой арматуры – безфильтрная пултрузия (нидлтрузия, плейнтрузия). Среди отечественных производителей стекло- и базальтопластиковой арматуры – ООО «Бийский завод стеклопластиков», ООО «Гален», ООО «Московский завод композитных материалов» и многие другие. Углепластиковая арматура производится ХК «Композит». В табл. 1 и 2 приведены характеристики отечественной и зарубежной композитной арматуры.

Таблица 1

Характеристики российской композитной арматуры

Характеристика	Значения характеристики для композитной арматуры			
	из стеклопластика			из углепластика
	ТУ 2296-001-20994511–2006 (ООО «Бийский завод стеклопластиков»)	ТУ 5714-007-13101102–2009 (ООО «Гален»)	ТУ 5769-001-09102892–2012 (ООО «Московский завод композитных материалов»)	ТУ 1916-001-60513556–2010 (ХК «Композит»)
Предел прочности при растяжении, МПа	1100	1000	1200	1600
Модуль упругости при растяжении, ГПа	50	45	55	130

Характеристики зарубежной композитной арматуры

Характеристика	Значения характеристики для композитной арматуры			
	из стеклопластика		из углепластика	
	Glass V-rod HM (Pultrall)	Aslan 100 (Hughes Brothers, Inc.)	Aslan 200 (Hughes Brothers, Inc.)	Carbon V-rod (Pultrall)
Предел прочности при растяжении, МПа	1000–1300	413–896	2068–2241	1350–1765
Модуль упругости при растяжении, ГПа	62–66	46	124	127–144
Относительное удлинение при разрыве, %	1,7–2,6	0,9–1,9	1,67–1,81	1,2–1,3

Видно, что российские образцы композитной арматуры не уступают по характеристикам зарубежным аналогам. Однако композитная арматура не находит пока достаточно широкого применения в практике строительства в РФ. Одной из причин этого, по мнению авторов, является недостаточная нормативно-техническая база, регулирующая выпуск и применение композитной арматуры. Хотя производителями арматуры были выполнены значительные работы [4], способствующие скорейшему созданию ГОСТ на композитную арматуру [5], требуется разработка ряда стандартов и рекомендаций для проектировщиков и строителей. Для сравнения, в США институт бетона (ACI) в 2012 году выпустил третью редакцию руководства по проектированию, впервые выпущенного в 1999 г., в то время как отечественные рекомендации по расчету конструкций со стеклопластиковой арматурой разработаны в 1976 г. [6]. Кроме того, более активному применению композитной арматуры препятствует небольшой опыт работы с ней как строителей, так и конструкторов и архитекторов.

В настоящее время можно выделить две основные тенденции развития технологии изготовления композитной арматуры за рубежом: использование двухслойной арматуры с сердечником из композита, армированного непрерывными волокнами, и внешней оболочки, армированной рубленым волокнистым наполнителем, и разработку технологий изготовления арматуры с использованием термопластичной полимерной матрицы. В качестве примера рассмотрим разработки компаний Composite rebar technologies Inc. [7] и Plasticomp LLC [8]. Первая разработка университета штата Орегон представляет собой полую композитную арматуру и способ ее изготовления. Композитная арматура включает в себя полый сердечник, состоящий из армированной непрерывными волокнами терморезистивной смолы, и внешнего слоя – оболочки, состоящей из смолы,

армированной рублеными волокнами. Внешняя оболочка прикрепляется химически и физически к сердечнику на одном из этапов непрерывного технологического процесса. Внешний и внутренний диаметр арматуры, их соотношение, а также состав внешней оболочки можно варьировать в достаточно широких пределах, что дает значительные возможности для адаптации продукта к нуждам широкого круга потребителей. Среди преимуществ такой композитной арматуры стоит отметить возможность использования полости внутри сердечника для прокладки электрических или опτικο-волоконных кабелей и размещения датчиков состояния конструкции, также они могут использоваться для подачи теплоносителя и создания таким образом не замерзающего мостового пролета. Наличие полого сердечника позволит соединять секции арматуры друг с другом, что также позволит расширить способы ее применения. Внешний слой, армированный рубленым волокном, предохраняет сердечник от механических повреждений во время транспортировки и применения, а также препятствует проникновению влаги к сердечнику арматуры.

Вторая разработка компании Plasticomp LLC представляет собой технологию изготовления композитной арматуры с использованием термопластичной матрицы. Технологический процесс начинается с изготовления премикса проталкиванием непрерывного волокнистого наполнителя в поток расплава термопластичного связующего, находящегося под высоким давлением и движущегося с большой скоростью. Роторный нож, расположенный по пути следования потока, режет смесь «волокнистый наполнитель–матрица» на короткие отрезки. Далее шнековый смеситель перемешивает рубленое волокно и термопластичную матрицу в расплавленный компаунд, пригодный для дальнейшего экструдирования. Полученный компаунд подается в Т-образную головку экструдера, где он наносится на непрерывный армирующий наполнитель, предварительно пропитанный термопластичным полимером (например, по классической пултрузионной технологии). Таким образом, получается композитная арматура на основе термопластичной полимерной матрицы, состоящая из сердечника, армированного непрерывным волокнистым наполнителем и внешней оболочки также из термопластичной матрицы армированной рубленым волокном. Преимуществами такой системы является большая устойчивость термопластичной матрицы к ударам и образованию микротрещин, возможность нагрева и придания необходимой формы прутку арматуры, возможность использования вторичного полимерного сырья и вторичной переработки самой композитной арматуры. Кроме того, использование вторичного сырья для термопластичной матрицы, а также потенциально возможное ускорение процесса изготовления продук-

ции (не требуется время для отверждения смолы, как в случае реактопласта) может сделать данный процесс более экономически выгодным, чем традиционно используемые технологии изготовления композитной арматуры.

Основными направлениями развития отечественного производства композитной арматуры являются применение в качестве армирующего наполнителя непрерывного базальтового волокна и модификация составов связующих и технологического оборудования с целью улучшения свойств и повышения производительности производства [9].

Благодаря низкой плотности и высокой устойчивости к негативным воздействиям окружающей среды, ПКМ способны обеспечить значительные преимущества над материалами, традиционно применяемыми в строительстве объектов инфраструктуры, в том числе в строительстве мостов. Мосты, путепроводы, эстакады – сложные инженерно-технические сооружения, к которым предъявляются высокие требования по надежности и долговечности. В Северной Америке и Европе ведутся активные работы по применению ПКМ в мостостроении. Мосты с применением элементов из ПКМ возводятся более 15 лет, и объем строительства таких мостов увеличивается. Меняется и класс мостов – от первых экспериментальных пешеходных мостов к автомобильным мостам длиной до 20 м [10–12]. В зарубежных странах основными областями применения ПКМ при строительстве мостов являются композитная арматура, мостовые настилы и пешеходные мосты. Ведутся работы по разработке и созданию вантовых тросов из ПКМ [13, 14], а также быстровозводимых мостов с применением элементов несущих конструкций из ПКМ [15, 16]. По мнению автора работы [10], наиболее перспективными областями применения ПКМ являются пешеходные мосты и мостовые настилы. Стоит отметить, что в РФ активно ведутся работы по разработке технологий изготовления и проектирования пешеходных композитных мостов, построен и успешно эксплуатируется ряд объектов [17], в то время как вопросам разработки, проектирования и применения мостовых настилов из композиционных или гибридных материалов с использованием ПКМ для автомобильных и железнодорожных мостов уделяется меньше внимания.

Мостовые настилы, применяемые за рубежом, делятся по способу установки: укладываемые на опоры моста или на продольные балки; а также по структуре: многоячеистые (типа сотовых конструкций) или сэндвич-панели (композитные плиты с вспененным наполнителем между ними). При изготовлении настилов применяют пултрузию и намотку (изготовление плит и трубчатых/коробчатых структур между плитами), а для изготовления сэндвич-панелей применяют RTM-технологии. В качестве непрерывного

волокнутого армирующего наполнителя используется стекловолокно, а в качестве полимерной матрицы – полиэфирные, эпоксидные и винилэфирные смолы. Для соединения элементов конструкции настила применяют склеивание и/или механическое крепление [11]. Основными способами крепления настила из ПКМ как к опорным элементам, так и между собой являются механический способ (как правило, при помощи болтового соединения) и склеивание. Традиционно применяемый механический способ крепления является надежным и отработанным способом, однако необходимость проделывать отверстия для крепежа в элементах настила ухудшает прочностные характеристики и повышает чувствительность конструкции к факторам окружающей среды. Способ клеевого крепления является более прогрессивным, поскольку обеспечивает прочное и быстрое соединение без нарушения структуры материала (нет необходимости делать отверстия под крепеж), однако существует и ряд недостатков таких, например, как сложность соблюдения требований по подготовке поверхностей и условий окружающей среды при склеивании во время работы на объекте, отсутствие на данный момент методов надежного неразрушающего контроля качества склеивания на объекте – клеевое соединение плохо работает на «расслаивание».

Для повышения надежности и прочностных характеристик настилов, а также снижения их стоимости ведутся работы по созданию гибридных настилов с применением бетонных или железобетонных элементов [10, 18]. Кроме того, возможно применение различных технологических приемов. Так, описанный в работе [12] способ внешней обмотки настила, состоящего из выполненных намоткой коробчатых профилей и полученных пултрузией композитных листов, усиливающим наполнителем позволяет повысить несущую способность настила и его жесткость.

Помимо таких преимуществ настилов из ПКМ, как малая плотность, что позволяет уменьшить нагрузку на опоры и снизить их материалоемкость, легкость установки (требуется техника с меньшей грузоподъемностью, более простая технология установки) и высокая коррозионная устойчивость, позволяющая уменьшить эксплуатационные расходы, существует ряд недостатков и проблем. Среди недостатков – высокая стоимость композитных настилов (в США стоимость настила из ПКМ в 2 раза выше стоимости аналогичного железобетонного настила); сложности с разработкой эффективных конструкций крепления «панель–панель» и «панель–продольная балка»; отсутствие полноценных стандартов и руководств по проектированию; недостаточное количество данных по прочностным характеристикам при комбинированном воздействии механических нагрузок и факторов окружающей среды. В связи с этим актуальными являются рабо-

ты, посвященные системам крепления, разработке рекомендаций по проектированию и эксплуатации композитных настилов, методам прогнозирования прочности, характера разрушения и усталостной долговечности настилов из ПКМ. Значительного внимания также заслуживают работы по применению «умных» композитов, интегрированию датчиков напряженно-деформированного состояния конструкции в ее композитные элементы и применению современных систем диагностики состояния конструкции [19–21].

В заключении необходимо отметить, что существует отставание от США, ряда Европейских стран и Китая по целому ряду позиций:

- в области разработки нормативно-технической документации на выпуск и применение композитной арматуры и мостовых настилов из ПКМ;

- в области технологий изготовления изделий из ПКМ строительного назначения.

Накоплен существенно меньший опыт по применению ПКМ в строительных конструкциях и эксплуатации подобных конструкций. Практически отсутствуют отечественные производители оборудования. Однако повышение интереса к применению ПКМ в строительстве, ряд мер правительства по стимулированию рынка композиционных материалов, а также усилия производителей композитов по совершенствованию нормативно-технической базы создают благоприятные условия для активизации работ по разработке и применению конкурентоспособных изделий из ПКМ отечественного производства в строительной индустрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Гращенко Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 231–242.
3. Рекомендации по расчету конструкций со стеклопластиковой арматурой (Р-16-78) /НИИЖБ и ИСиА. М. 1976. 21 с.
4. Луговой А.Н., Савин В.Ф. О стандартизации подходов к оценке характеристик стержней из волокнистых полимерных композиционных материалов //Стройпрофиль. 2011. №4. С. 30–32.
5. ГОСТ 31938–2012 Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия.
6. Malnati P. A hidden revolution: FRP rebar gains strength //Composites Technology 2011. №12. P. 25–29.
7. Hollow composite-material rebar structure, associated components, and fabrication apparatus and methodology WO 2012/039872; опубл. 29.05.2012.
8. Device and method for improved reinforcing element with continuous center core member with long fiber reinforced thermoplastic wrapping WO 2009/032980; опубл. 12.05.2009.
9. Чурсова Л.В., Ким А.М., Панина Н.Н., Швецов Е.П. Наномодифицированное эпоксидное связующее для строительной индустрии //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 40–47.
10. Keller T. Material-tailored use of FRP composites in bridge and building construction /In: CIAS international seminar. 2007. P. 319–333.
11. Zhou A., Lesko J. State of the Arte in FRP bridge decks /In: FRP composites: materials, Design, and Construction. Bristol. 2006. (Электронный ресурс).
12. Peng Feng, Lieping Ye Behaviors of new generation of FRP bridge deck with outside filament-wound reinforcement /In: Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2006). Miami. 2006. P. 139–142.
13. Wu Z.S., Wang X. Investigation on a thousand-meter scale cable-stayed bridge with fibre composite cables /In: Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2008). Zurich. 2008. P. 1–6.

14. Chin-Sheng Kao, Chang-Huan Kou, Xu Xie Static Instability Analysis of Long-Span Cable-Stayed Bridges with Carbon Fiber Composite Cable under Wind Load //Tamkang Journal of Science and Engineering. 2006. V. 9. №2. P. 89–95.
15. Bannon D.J., Dagher H.J., Lopez-Anido R.A. Behavior of Inflatable Rigidified Composite Arch Bridges /In: Composites & Polycon-2009. American Composites Manufacturers Association. Tampa. 2009. P. 1–6.
16. Rapidly-deployable light weight load resisting arch system: pat. 20060174549A1 US; опубл. 10.08.2006.
17. Ушаков А.Е., Кленин Ю.Г., Сорина Т.Г., Хайретдинов А.Х., Сафонов А.А. Мостовые конструкции из композитов //Композиты и наноструктуры. 2009. №3. С. 25–37.
18. Kayler K. The largest composite bridge ever constructed in the world //JEC Composites Magazine. 2012. №77. P. 29–32.
19. Drissi-Habti M. Smart Composites for Durable Infrastructures – Importance of Structural Health monitoring /In: 5th international conference on FRP Composites. Beijing. 2010. P. 264–267.
20. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Дианов Е.М., Васильев С.А., Медведков О.И. Применение оптического волокна в качестве датчиков деформации в полимерных композиционных материалах //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2010. №3. С. 10–15.
21. Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Особенности создания полимерных композиционных материалов с интегрированной активной электромеханической актюаторной системой на основе пьезоэлектриков //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 31–34.