

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ОТРАСЛИ (ОБЗОР)

© Данила Денисович Власов¹, Вадим Витальевич Жавыркин²,
Кирилл Владимирович Клементьев³, Кирилл Владимирович Колесников²,
Степан Владимирович Огоньков⁴, Юлия Вадимовна Ронжина³,
Николай Алексеевич Татусь¹

¹Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия

danila_vlasov_98@mail.ru

²Общество с ограниченной ответственностью «Центр инновационного развития СТМ»,
Екатеринбург, Россия

zhavyrkinv@mail.ru

³Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», Москва, Россия

⁴Общество с ограниченной ответственностью «Специальные технологии контроля»,
Москва, Россия

Аннотация. В статье приводится анализ современных композитных технологий, а также показана возможность их применения в железнодорожной области. Показаны достоинства и недостатки технологий, приведены принципиальные типы и виды изделий, по этим технологиям изготавливаемые. Проведено примерное сравнение стоимости изделий, изготовленных по различным технологиям.

Ключевые слова: технологии изготовления композитных материалов, эффективность применения, элементы железнодорожных конструкций, ценообразования композитных технологий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51023.

PRODUCTION TECHNOLOGIES FOR COMPOSITE PARTS AND THEIR APPLICATION IN RAILWAY INDUSTRY (OVERVIEW)

© Danila D. Vlasov¹, Vadim V. Zhavyrkin²,
Kirill V. Klementiev³, Kirill V. Kolesnikov²,
Stepan V. Ogonkov⁴, Yulia V. Ronzhina³,
Nikolay A. Tatus¹

¹Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

danila_vlasov_98@mail.ru

²STM Center of Innovation Development, Ekaterinburg, Russia

zhavyrkinv@mail.ru

³Railway Research Institute of JSC Russian Railways, Moscow, Russia

⁴«Special Technology Control», Moscow, Russia

Abstract: The article provides an analysis of modern composite technologies, as well as the possibility of their application in the railway industry. Advantages and disadvantages of technologies are shown, main types of products manufactured with these technologies are given. An approximate cost comparison of products manufactured using various technologies is made.

Key words: composite materials manufacturing technologies, application efficiency, elements of railway structures, pricing of composite technologies.

Acknowledgements. The reported study was funded by RFBR, Sirius University of Science and Technology, JSC Russian Railways and Educational Fund "Talent and success", project number 20-38-51023.

Введение. Из анизотропии свойств волокнистых композитных материалов (КМ) следуют не только их уникальные механические характеристики, но и определенные технологические особенности изготовления тех или иных узлов и деталей, которые различаются для различных видов транспорта. Например, в авиации и космической технике одного снижения веса при сохранении прочности и жесткости уже достаточно для эффективного применения КМ, но для железнодорожного транспорта наиболее эффективное применение КМ обеспечивается не только снижением веса, но и решением какой-либо инженерной задачи, например увеличение долговечности или износостойкости, повышение плавности хода, ремонтпригодности, простота изготовления и т.п. Понятно, что в одной статье охватить такой большой материал сложно, поэтому каждый раздел статьи будет построен по следующей схеме: описание технологии КМ, элементы железнодорожных (ЖД) конструкций, производимые по указанной технологии, достигаемые эффекты. Как пример применения КМ в ЖД отрасли можно привести рамы тележек для поездов метрополитена [1], кузова вагонов [2], а также шпалы и другие элементы конструкции подвижного состава и строения пути [3, 4].

Как известно, при создании композитных деталей материал создается одновременно с конструкцией. Эта черта применения композиционных материалов является как их ключевым преимуществом, так и серьезным осложняющим фактором производства композитных изделий. Достоинство заключается в управляемых свойствах конструкции: материал создается именно для проектируемого узла после оценки его напряженно-деформированного состояния. Таким образом, структура изделия «подгоняется» под условия эксплуатации. Более того, сформованные композитные детали не нуждаются в механической обработке, что позволяет снизить энергоемкость производства за счет минимизации потребности в дополнительном оборудовании.

С другой стороны, качество материала и конструкции напрямую зависит от квалификации специалистов, соблюдения технологического процесса и выдержанности технологии. Некоторые технологии формования композитов требуют дорогостоящего оборудования и оснастки, а работа с определенными типами связующих и наполнителей вредна для здоровья. Однако, стоит отметить, что большинство этих недостатков можно нивелировать за счет автоматизации при крупносерийном производстве.

В настоящее время во всём мире активно разрабатываются программы по внедрению композитных материалов в производство [5 - 7] и проводятся исследования определяющие эффективность их применения [3, 8 - 13]. Технологий производства деталей из КМ достаточно много [14] причем каждая обладает отличительными особенностями, однако все

они схожи по принципу: сначала, путем комбинирования матрицы и наполнителя, создается форма конструкции с последующей полимеризацией – переходом матрицы в твердое агрегатное состояние.

Важно учитывать, что составляющие композита бывают различных видов: волокнистый наполнитель может быть представлен тканью, непрерывным или разрезанным волокном, а полимерные связующие бывают термореактивными и термопластичными. Отсюда следует, что технология производства должна выбираться исходя из свойств компонентов будущего элемента конструкции. Ниже будут рассмотрены основные технологии, применяемые для полимерных волокнистых композитов, их принципиальные особенности, рассмотрены детали, узлы и агрегаты, которые могут быть изготовлены по заявленной технологии, показана эффективность замены металла на КМ.

Материалы и методы

1. Намотка. Одна из старейших технологий производства композитных изделий – технология намотки [15 - 17], которая используется для непрерывных волокон, однонаправленных лент, нитей или жгутов. Намотка является относительно простой технологией, ее принцип состоит в том, что непрерывный наполнитель подается с бобины на вращающуюся оправку, пропитываясь при этом связующим (рисунок 1).

Основное оборудование, необходимое для технологии – намоточный станок и система подачи наполнителя. Простейшие намоточные станки похожи на токарные, в которых вместо детали вращается оправка. Более сложные детали – сферы, торы и элементы трубопровода наматываются на специальных орбитальных станках. Настройка станка определяет два важнейших параметра: угол намотки волокон на оправку и силу натяжения волокна. Угол укладки наполнителя отвечает за механические характеристики изделия, а натяжение нити – за итоговое качество детали.

Не менее важным является этап пропитки, в ходе которого регулируется соотношение объемных долей связующего и наполнителя. В процессе совмещения волокон и матрицы существенную роль играют такие свойства жидкого полимера как вязкость и угол смачивания. Для лучшего смачивания наполнителя необходимо также регулировать скорость пропитки.

В зависимости от способа пропитки наполнителя выделяют два вида намотки: мокрую и сухую (рисунок 1). Мокрая намотка предполагает пропитку нитей непосредственно перед намоткой на оправку. Для этого волокна от шпулярика идут к пропиточной ванне, пропитываются связующим, протягиваясь через саму ванну, либо контактируя с роликом, после через натяжитель и раскладчик попадают на оправку и затем отверждаются. Преимуществами мокрого способа намотки являются: совмещенность производства, короткий производственный цикл, более низкое требуемое контактное давление (натяжение нити). К недостаткам следует отнести меньшую производительность по сравнению с сухим методом из-за небольшой скорости пропитки наполнителя и существенного загрязнения производственного пространства брызгами связующего. Методом мокрой намотки удобно формировать крупногабаритные тела вращения.

Пропитка волокон полимерным связующим в технологии сухой намотки происходит задолго до непосредственной намотки на оправку. Волокна и нити пропитываются матрицей в ходе отдельной технологической операции, при этом все излишки связующего удаляются, а сама композиция частично полимеризуется и сматывается в рулоны. Полученные заготовки называются препрегом, который, в дальнейшем, и наматывается на оправку аналогично

волокнам при мокрой намотке с последующим окончательным полимеризованием.

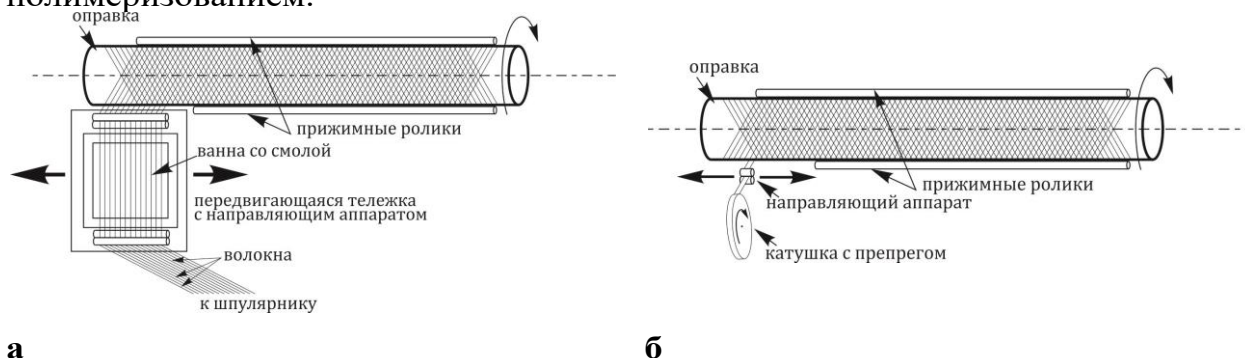


Рис. 1. Намотка: а) мокрая; б) сухая.

Примечательно, что в определенных условиях препрег может храниться до нескольких месяцев, что упрощает управление производственным процессом. Сухой метод намотки также позволяет использовать термопластичные связующие, что невозможно при мокрой намотке. Данная технология намотки считается более производительной, но и более дорогостоящей за счет отдельной операции изготовления препрегов, а также необходимости создания специальных условий их хранения.

Технология намотки применяется для формования тел вращения, например, ЖД цистерн [18] (вообще говоря, поперечное сечение тела вращения не обязано быть круглым) которые применяются для перевозки жидких химически-активных веществ. Составы, состоящие из десятков цистерн, растягиваются на сотни метров. Преимущества пластиков армированных волокнами тут очевидны – снижение веса: применение стеклопластика позволит снизить вес самой цистерны примерно в 3 раза, в довесок получаем коррозионную и химическую стойкость и нехрупкость.

Применение данной технологии не ограничивается ЖД цистернами. Существует возможность изготовить по этой технологии – карданный вал. Карданные валы применяются для передачи крутящего момента от оси колесной пары на якорь генератора, который служит источником электроэнергии в пассажирских, почтовых и холодильных вагонах. Примерами конструкций с использованием карданных валов являются: ТРКП, ТКП и ТК-2. Применение пластиков армированных волокнами позволяет помимо снижения массы повысить изгибную жесткость, повысить резонансную частоту, увеличить длину и скорость вращения вала.

Части рессорного подвешивания – упругие элементы, с возможностью изготовления намоткой, в подвижном составе применяются в виде витых пружин и торсионов. Применение упругих элементов из композитных материалов позволяет накапливать больше удельной (отнесенной к массе упругого элемента) упругой энергии [19].

2. Пултрузия. Еще одна технология для формования композитных деталей из непрерывных волокон – пултрузия (рисунок 2). В переводе с английского (pull through) – протяжка. Суть технологии состоит в протягивании пропитанных связующим волокон или лент через нагретую фильеру [20 - 22]. Пултрузия используется для формования композитных профилей, а сечение фильеры определяет форму и размеры поперечного сечения профиля. Технология пултрузии реализуется двумя способами: пропитка наполнителя проводится в специальной емкости перед фильерой, либо уложенные в профиль сухие волокна пропитываются непосредственно в фильере.

Температура фильеры и скорость протягивания крайне важны для первичного отверждения материала, чтобы при выходе из фильеры профиль не потерял свою форму. Дальнейшее отверждение производится в печи. Давление формования также создается фильерой за счет постепенного уменьшения размеров поперечного сечения.

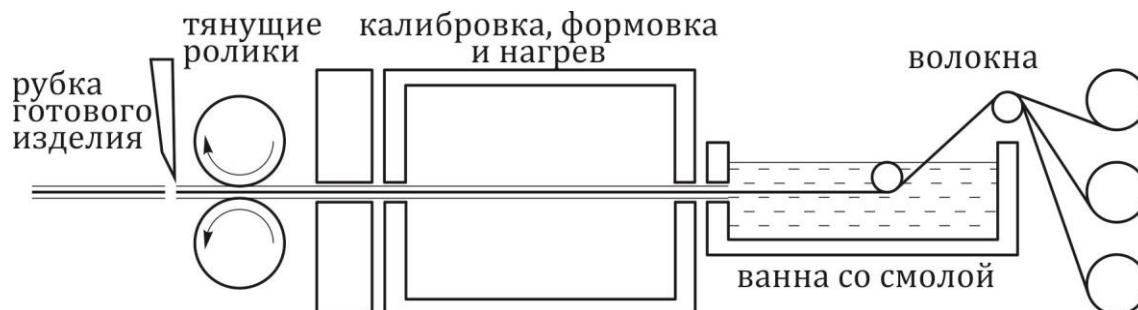


Рис. 2. Принципиальная схема процесса пултрязии.

Пултрязия допускает использование термопластичного связующего, однако в таком случае вместо отверждения в печи профиль остужается до температуры стеклования полимера.

К преимуществам пултрязии можно отнести высокую точность, простоту и универсальность производства: для изменения формы профиля необходимо заменить преформовочное отверстие. Из недостатков можно выделить необходимость точного контроля вязкости и температуры связующего, а также скорость протягивания.

Если требуется изготовить каркас конструкции пултрязия незаменима. В подвижном составе возможно применение пултрязионных труб и профилей в качестве силовых элементов композитных панелей для боковин и крыш вагонов. Пока боковины делаются из стальных профилей и листового проката, однако, Урал Вагон Завод изготовил вагон-хоппер и крышу для него из композитов [23]. Укладка волокон вдоль профиля значительно увеличивает его жесткость, поскольку модуль упругости однонаправленного пакета слоёв максимален, поэтому профили из волокнистых композитов не уступают стальным по прочности и жесткости и к тому же значительно выигрывают в коррозионной стойкости и весе.

Профили из композитного материала, используются при постройке пролетных строений мостов. Есть положительный опыт проектирования мостовых конструкций различного назначения [24, 25].

3. Контактное формование. Самая доступная технология изготовления композитных изделий – контактное формование (рисунок 3). Принцип метода – послойная укладка тканей или матов на специальную форму и их дальнейшая пропитка связующим с отверждением [25 - 27]. В данной технологии есть еще два важных этапа: обработка формы специальным антиадгезионным составом перед укладкой, чтобы беспрепятственно извлечь изделие после пропитки, а также уплотнение композита специальными валиками после укладки каждого слоя. Уплотнение валиком не только создает формовочное давление, но и удаляет часть воздуха из жидкого связующего для снижения пористости материала.

По виду наполнителя, а также применяемого технологического оснащения контактное формование разделяют на три технологии: ручная выкладка, автоматизированная выкладка и напыление.

Ручная выкладка (рисунок 3) является самой простой и дешевой технологией, предполагающей ручной труд формовщиков. Отсюда следуют и очевидные недостатки

метода: высокие требования к квалификации формовщика, поскольку от него напрямую зависит качество детали, а также необходимость работы в средствах защиты, поскольку технология считается «грязной».

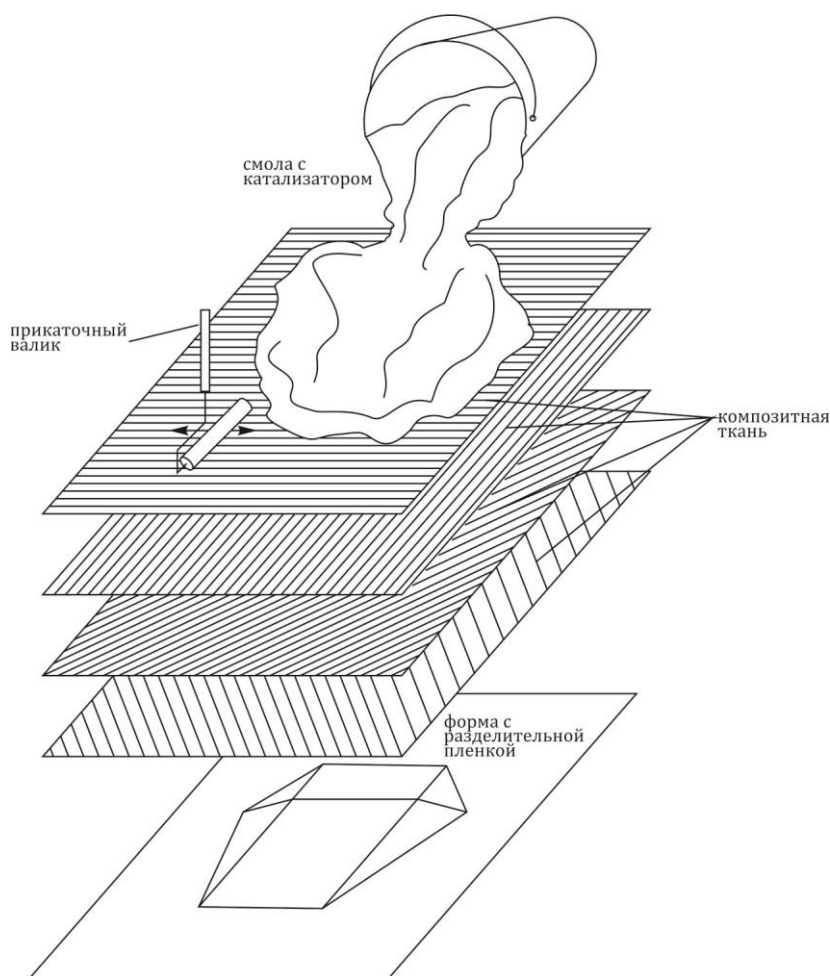


Рис. 3. Принципиальная схема ручной выкладки.

Автоматизированная выкладка аналогична ручной за тем исключением, что укладку материала на форму производит специальный станок, перемещающийся по сложным траекториям. Следует отметить, что при автоматизированной выкладке возможно появление складок, которые не устраняются станком, поэтому для этой технологии применяют препреги и ленты меньшей ширины.

Технология напыления применяется для формования изделий с помощью смеси связующего с измельченным волокном. Полимер в жидком состоянии подается в зону формования через распылительные головки, с другой стороны туда же подается рубленое волокно. Для удаления воздуха и создания давления формования композит прикатывается роликом. Технология напыления может быть ручной, либо автоматизированной.

Контактное формование применяется для штучного изготовления крупногабаритных изделий, таких как небольшие суда и лодки, корпуса автомобилей и различные панели, очень популярно в последнее время изготовлении бассейнов. Основные недостатки технологии – сравнительно низкая производительность и низкий коэффициент использования материала,

однако контактное формование позволяет относительно недорого создавать габаритные конструкции сложных форм с минимальными затратами на изготовление формы.

Мытищинский метровагонмаш - родина практически всех метропоездов России, идёт в ногу со временем, маски современных поездов Московского метрополитена изготовлены из стеклопластика методом контактного формования [26]. Элементы интерьера салонов: люки, крышки, сиденья поездов изготавливаются именно таким способом. Основной эффект, реализуемый при таком способе изготовления – технологичность – простота изготовления изделий сложной формы – из металла такие сложные элементы изготовить практически невозможно. Но расплата за такой способ изготовления, как и было сказано выше, низкие механические характеристики – без силового каркаса ничего не выйдет, а он, в свою очередь, может быть изготовлен из композитных профилей (см. полтрузия).

С применением данной технологии изготавливаются изолирующие стыки ЖД пути. В конструкции рельсовых изолирующих стыков применяется боковые и стыковые прокладки. Боковая прокладка имеет перфорацию, выполнена из стеклопластика, состоит из нижней и верхней частей, между которыми имеется зазор, а перфорация заполнена магнетодиэлектрическим материалом. Стыковая прокладка выполнена из слоистого стеклопластика с пределом прочности на сжатие не менее 300 МПа, на торцевой поверхности которой имеется контурный ободок, выполненный из магнетодиэлектрического эластомера [27].

4. Пропитка под давлением. Другое название технологии – RTM (Resin Transfer Molding) (рисунок 4). Технология заключается в инъекции связующего под давлением в специальную форму с заранее уложенным наполнителем с последующим отверждением [31 - 33]. Оснастка аналогична прессовочной – форма состоит из пуансона и матрицы. Для быстрого отверждения связующего матрица нагревается до необходимой температуры.

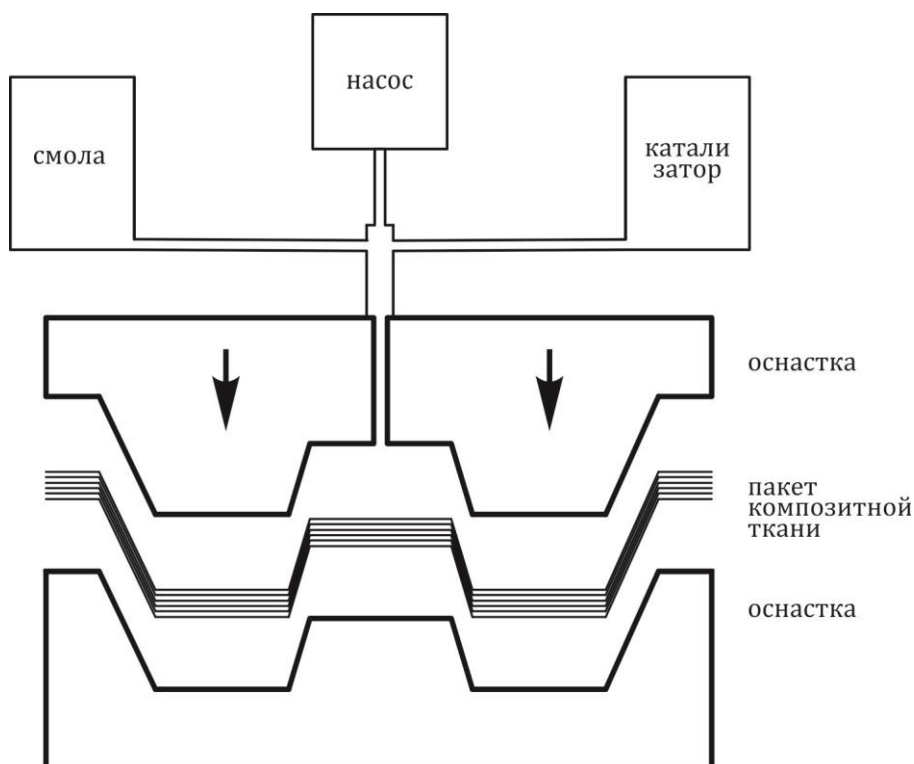


Рис. 4. Принципиальная схема пропитки под давлением.

Поскольку каналы для подачи связующего имеют малый диаметр, жидкая матрица не должна быть вязкой. В связи с этим использование термопластичных полимеров в RTM невозможно.

Выделяют два вида технологии – непосредственно пропитка под давлением (RTM) и пропитка в вакууме (RTM-light). В RTM массивный пуансон прижимается к матрице дополнительным давлением, а пропитка в вакууме предполагает прижим матрицы и пуансона атмосферным давлением за счет вакуума внутри. Легкий пуансон при этом выполнен зеркально матрице.

К достоинствам можно отнести возможность полной автоматизации производственного процесса, высокий коэффициент использования материала и низкую пористость изделий. Из недостатков следует отметить высокую стоимость изготовления оснастки и ее узкую специализацию (матрица используется для одного конкретного изделия), а также высокую энергоёмкость производства.

Высокая точность и повторяемость получаемых деталей позволяют использовать пропитку под давлением для серийного производства.

Применение данной технологии позволяет получать такие изделия, как ЖД шпалы из композитных материалов [3, 34, 35]. Такие элементы верхнего строения пути не подвержены влиянию погодных условий и обладают повышенными эксплуатационными характеристиками, например хладостойкостью.

Интересен опыт изготовления композитных элементов не только из стеклянных и углеродных волокон но из натуральных, древесных. В Воронежском государственном лесотехническом университете им. Г.Ф. Морозова с помощью усовершенствованной RTM-технологии, а именно пропитки, прессования, сушки и термообработки проводят модификацию мягких лиственных пород древесины повышая её механические характеристики. Модифицированная древесина применяется для производства шпал и опор линий электропередач и обладает повышенной пластичностью, гидрофобностью, био-огнестойкостью, формостабильностью, плотностью, прочностью и, следовательно, повышенными эксплуатационными характеристиками. С помощью RTM-технологии повышается степень использования малоценной древесины мягких лиственных пород (береза, осина, тополь), и повышается срок службы деревянных шпал и опор ЛЭП. Прогнозируемый срок эксплуатации получаемых изделий составляет 30-50 лет [36].

5. Вакуумная инфузия. Технология вакуумной инфузии (рисунок 5) заключается в пропитке выложенной армирующей ткани в вакуумном мешке с помощью атмосферного давления и дальнейшего отверждения пакета [37-39]. Вакуумный пакет, помимо ткани и вакуумного мешка, может включать в себя формообразующую поверхность, жертвенную ткань, пропиточную ткань, а также литниковую систему для габаритных деталей. Важная особенность технологии заключается в том, что перед пропиткой полимерное связующее необходимо дегазировать для снижения пористости материала.

Вакуумный насос создает вакуум внутри пакета, после чего дегазированное связующее пропитывает ткань, а его излишки попадают в ловушку для смолы.

Вакуумное формование можно проводить в автоклаве, что позволяет уменьшить вязкость связующего и улучшить пропитку наполнителя.

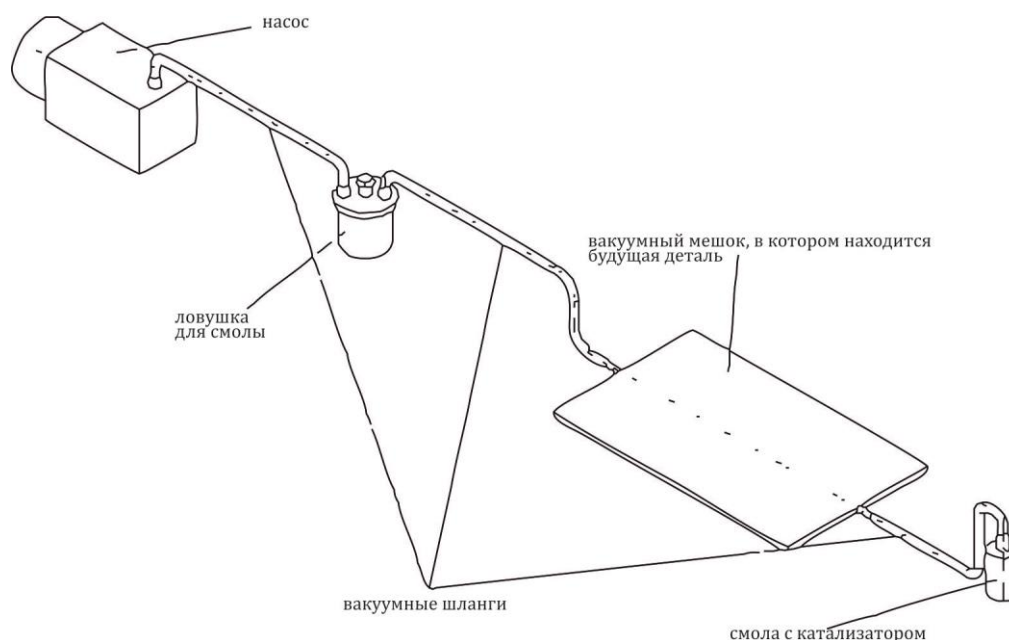


Рис. 5. Принципиальная схема вакуумной инфузии.

Главными преимуществами вакуумной инфузии являются простота и технологичность, дешевизна оборудования и оснастки, а также универсальность – технология позволяет формовать изделия любых форм и габаритов. К недостаткам следует отнести высокие требования к квалификации формовщика, трудоемкость изготовления герметичного вакуумного мешка, а также большой расход материалов оснастки – шланги, пропиточная и жертвенная ткань, также сама вакуумная пленка утилизируются после каждой пропитки.

В качестве связующего для вакуумной инфузии используются термореактивные жидкие полимеры и полимерные пленки, которые представляют собой частично отвержденную матрицу. Пленка укладывается на ткань в вакуумный мешок и под давлением пропитывает волокна. Преимуществом такой матрицы является одинаковая толщина по всей поверхности детали.

Метод вакуумной инфузии достаточно прост. С его помощью изготавливаются рамы колёсных тележек для городского поезда [1, 40], а также отдельные силовые элементы [41]. С помощью укладки волокон под заданными углами возможно получать нужные характеристики конструкции, при чем они могут весьма сильно различаться в разных областях одного и того же элемента.

Изготовление корпусных деталей, которые призваны нести помимо эстетической еще и силовую функцию – область применения вакуумной инфузии. Изготовленный подобным методом корпусной элемент в меньшей степени нуждается в усилителях, чем элемент изготовленный по технологии описанной в п. 3. Широкая возможность варьирования углами укладки и различными тканями позволяет получать материал с характеристиками как однонаправленного – ортотропного, так и практически изотропного.

б. Аддитивные технологии. На сегодняшний день перспективным и динамично развивающимся направлением является создание композитных конструкций с помощью аддитивных технологий. В первую очередь речь идет о трехмерной (3D) печати [42 - 44]. По аналогии с хорошо известной печатью пластиков с помощью программного обеспечения создается управляющая программа и конструкция создается послойно по заданным

траекториям. Отличие заключается только в том, что в сопло полимер подается вместе с армирующими компонентами (рисунок 6). При этом волокна могут быть непрерывными (печать идет непрерывно и конструкция создается из одного волокна), либо разрезанными (мелкодисперсные волокна распределены по объему пластика).

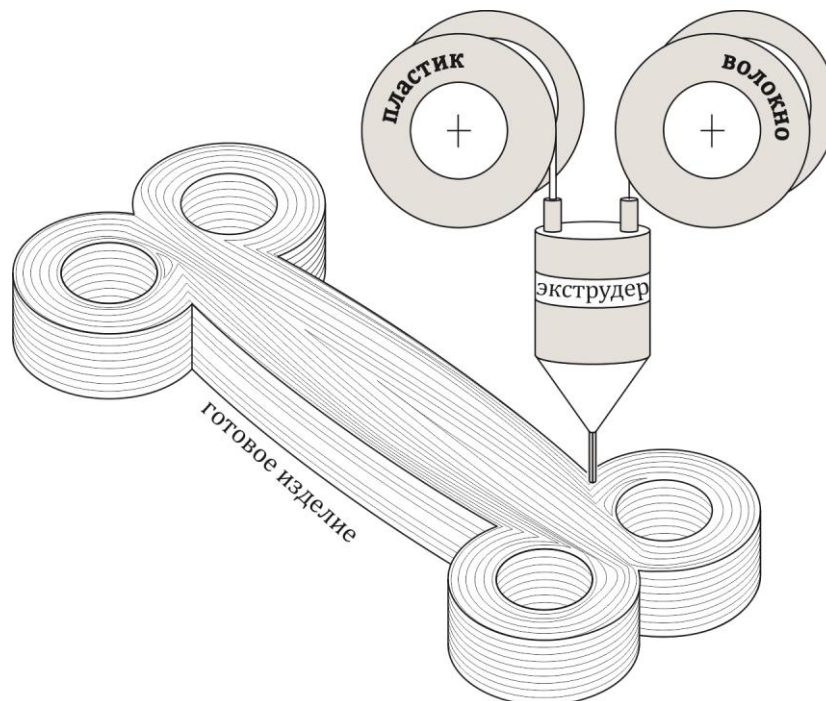


Рис. 6. Принципиальная схема 3D печати с волокнами.

Для создания полимерных композитов методом 3D печати может также быть использована более термостойкая матрица, что повышает требования к рабочим температурам сопла и вносит коррективы в процесс охлаждения конструкции. Этот и многие другие особенности применения аддитивных технологий производства ПКМ сейчас активно прорабатываются учеными на международном уровне. Огромный потенциал и возможности 3D печати композитов представляют высокий интерес как для науки, так и для производства.

Для ЖД транспорта с помощью технологий 3D печати возможно изготовление элементов крепежа, кронштейнов, уголков, подпорок. Самое ценное в таком методе – очень большая гибкость производства – можно изготовить элемент конструкции практически любой формы с достаточно неплохими механическими характеристиками.

7. Ценообразование композитных изделий. Приведенный ниже анализ носит очень условный характер и призван продемонстрировать принципы ценообразования для различных композитных технологий. Для всех технологий цена складывается из стоимости самого материала, приспособлений, который изготавливаются для производства деталей (оснастки), оплаты труда специалистов занятых на производстве. Поскольку композитные технологии и сами детали очень сильно отличаются от традиционных, то в стоимость готового изделия нужно включить затраты на отработку технологии. Более того, вероятность получения изготовленного изделия именно с такими характеристиками, какие закладывали инженеры на этапе проектирования гораздо ниже, чем для металлов: высокая трудоемкость

проектирования, относительно, небольшой опыт изготовления и применения композитных материалов приводят к повышенному количеству испытаний готового изделия, что повышает стоимость продукции. Уточнение структуры и геометрии изделия, переделка оснастки, корректировка технологических процессов – затратные мероприятия, но так всегда бывает при отработке новых технологий. После прохождения вышеописанного пути, который называется короткой фразой «наладка производства» получится легкое и прочное изделие, которое будет серьезно превосходить по характеристикам металлические аналоги. Замещение одной композитной технологий другой практически не возможно – это особенность изготовления композитов. Поэтому сравнение типа: по этой технологии дороже, но качественней – невозможно в принципе!

Намотка. Очень хорошо отработанная технология, поэтому относительно недорогая: есть огромное количество станков для намотки труб и сосудов диаметром от 50 мм до 4-5 м и длиной до нескольких метров. Зачастую станки делаются специально для труб нужных габаритов. Направляющие, пропитывающие и шпулечные аппараты стандартны. Если нужно получить фигуру вращения с некруглым поперечным сечением потребуются изготовление оправки. Оправки чаще всего металлические, с жестким каркасом внутри.

Пултрузия. Весьма хорошо отработанная технология, поэтому вполне доступна. Расходный материал – фильеры формирующие поперечное сечение, через которые протягивается пропитанные смолой волокна. Фильеры могут быть какой угодно формы. Габаритные размеры поперечного сечения профиля ограничены возможностями протягивающего аппарата – в фильерах создается большое сопротивление, существуют пултрузионные стенды с усилием до 40-50 тонн. Очень часто пултрузионные стенды создаются под требуемую конструкцию.

Пропитка под давлением. Одна из самых дорогих технологий, поскольку помимо стоимости материала в цену конечной продукции закладывается стоимость изготовления оснастки, для производства которой используется высокопрочная сталь. Размеры готового изделия ограничены мощностью пропиточного оборудования.

Контактное формование. Самая дешевая и самая вредная технология – очень широко используется ручной труд, применяется для изготовления крупногабаритных малонагруженных деталей сложной конфигурации. Ни в коем случае нельзя использовать для элементов конструкций испытывающих сколько-нибудь серьезную нагрузку. Но, например, маски вагонов, коробчатые кожухи механизмов, баки по такой технологии изготавливать можно, и это будет гораздо дешевле, чем из металла, особенно если нужно штучное производство.

Вакуумная инфузия. Широко распространённая технология, применяемая для крупногабаритных деталей за одну операцию можно изготовить крышу или боковую стенку вагона, для изготовления больших изделий безальтернативна. Механические характеристики на высоком уровне – возможно применение для силовых конструкций. Стоимость – гораздо ниже чем для изготовления металлических аналогов, но есть серьезные сложности при отработке технологии.

Аддитивные технологии. На сегодняшний день являются развивающимися, этим обусловлена высокая стоимость применения технологии. Используется для изготовления относительно небольших кронштейнов, упоров, поддерживающих элементов сложной формы.

Для того чтобы сравнить изделия, изготовленные по перечисленным технологиям применим следующий ход: сравним относительную стоимость килограмма готового изделия в терминах низкая-высокая (табл. 1).

Таблица 1.

Сравнение стоимости технологий

Технология	Относительная стоимость килограмма изделия	Получаемые изделия	Механические характеристики
Намотка	Низкая-средняя	Трубы, валы, баллоны	Высокие
Пултрузия	Средняя	Стержни, профили	Высокие-очень высокие
Пропитка под давлением	Высокая-очень высокая	Силовые панели сложного профиля	Очень высокие
Контактное формование	Очень низкая	Панели любого профиля, кожухи	Очень низкие
Вакуумная инфузия	Средняя	Групногабаритные панели сложной формы	Средние-высокие
Аддитивные технологии	Высокая	Малогабаритные силовые элементы	Высокие

Заключение. Приведенные выше технологии производства конструкций из полимерных волокнистых композитов, сегодня, являют собой практически полный список применяемых на практике методик. Безусловно, существует большое число всевозможных вариаций и ответвлений представленных технологий, однако суть методики в них сохраняется, меняется только оснастка. Более того, важно еще раз подчеркнуть, что рассмотренные методики применимы только для производства ПКМ. Для создания конструкций из металло- или керамокомпозитов (например, вставки для тормозных колодок, контактных рельс, шлифовальных кругов [4, 45 - 49]) используются другие гораздо более трудоемкие и сложные технологии.

По описанию каждой представленной технологии можно сделать вывод о том, насколько она применима для создания силовых и несущих конструкций. Таким образом, очевидно, что контактное формование абсолютно неприменимо для ответственных нагруженных конструкций, в особенности при серийном производстве. Намотка предназначена для создания тел вращения любых круглых и практически любых не круглых сечений, а пултрузия отлично подходит для высококачественного формования длинных балочных элементов с различной формой поперечного сечения. Вакуумная инфузия и пропитка под давлением позволяют создавать точные и качественные изделия сложных форм, при этом высокая повторяемость деталей позволяет применять эти технологии в крупносерийном производстве. Технология 3D печати уникальна тем, что позволяет создавать конструкции по специально рассчитанным траекториям, например, огибая волокнами отверстия или создавая профилированные балки с изменяющейся толщиной. 3D печать позволяет решить ключевые проблемы использования волокнистых композитов и выводит композитные конструкции на более высокий уровень.

В качестве основного, на взгляд авторов, вывода стоит сказать о том, что применение композитов для какого-то отдельно взятого элемента (если это конечно не шпала или столб) кажется менее эффективным, чем перестановка всего железнодорожного пути на композитные рельсы. Не получится решить одну проблему, например снижения вибраций

заменяв стальной кардан на композитный или добавив композитные упругие элементы – возникнут дополнительные проблемы.

Для обеспечения высоких технологических и эксплуатационных характеристик готовой продукции необходимо рассматривать узлы и агрегаты в целом, учитывая их связь с общей системой. Только так можно качественно использовать композитные материалы для производства конструкций. Конечно, это потребует огромных усилий, однако технологии и методики проектирования и расчета известны, дело осталось за малым – применить их!

Think composites! – призывал известный ученый композитчик С. Цай (S. Tsai), для ЖД эта фраза подходит в полной мере!

Список литературы

1. Kim J.S., Yoona H.J. Structural behaviors of a GFRP composite bogie frame for urban subway trains under critical load conditions. *Procedia Engineering*. - 2011. - No 10. - p. 2381–2386. DOI:10.1016/j.proeng.2011.04.391
2. Kim J.S., Lee S.J., Shin K.B. Manufacturing and structural safety evaluation of a composite train carbody// *Composite Structures*. - 2007. - No 78. - p. 468–476. DOI:10.1016/j.compstruct.2005.11.006
3. Ferdous W., Manalo A., Erp G.V., Aravinthan Th., Kaewunruen S., Remennikov A. Composite railway sleepers – Recent developments, challenges and future prospects// *Composite Structures*. - 2015. - No 134. - p. 158–168. DOI:10.1016/j.compstruct.2015.08.058
4. Рахчеев В.Г., Галанский С.А., Максимов И.С. Повышение эффективности шлифования рельсов на основе применения модернизированных композитных и лепестковых кругов и оптимизации системы измерения рельсошлифовального поезда// *Вестник транспорта Поволжья*. - 2018. - № 4 (70). - С. 52 – 58. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35683734>
5. Министерство транспорта Российской Федерации: распоряжение: от 11 сентября 2013 года N МС-91-р. Об утверждении Программы внедрения композиционных материалов, конструкций и изделий из них в области транспорта.
6. Дориомедов М.С., Дасковский М.И., Скрипачев С.Ю., Шеин Е.А. Полимерные композиционные материалы в железнодорожном транспорте России (обзор)// *Электронный научный журнал "ТРУДЫ ВИАМ"*. - 2016. - №7. - С.113-118. (dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-7-12-12).
7. Бектуров К.Б., Зарипов Р.Ю., Медведев А., Каербек Д. Перспективы применения композиционных материалов в грузовом вагоностроении// *Наука и техника Казахстана*. - 2017. - № 1-2. - С. 25–33.
8. Постников В.П., Носкова А.Р. Экономическое обоснование перспектив применения композиционных материалов в сфере грузового вагоностроения// *Вестник ПНИПУ. Социально-экономические науки*. - 2018. - № 2. - С. 188 – 200.
9. Каракаев А.К., Зарипов Р.Ю. Композитные материалы в грузовом вагоностроении// *Наука и техника Казахстана*. - 2016. - № 1-2. - С. 39 – 47.
10. Zinno A., Fusco E., Prota A., Manfredi G. Multiscale approach for the design of composite sandwich structures for train application// *Composite Structures*. - 2010. – No 92. - p. 2208 – 2219. DOI:10.1016/j.compstruct.2009.08.044
11. Kim J.S., Jeong J.C., Lee S.J. Numerical and experimental studies on the deformational behavior a composite train carbody of the Korean tilting train// *Composite Structures*. - 2007. - No 81. - p. 168–175. DOI:10.1016/j.compstruct.2006.08.007

12. Belingardi G., Cavatorta M.P., Duella R. Material characterization of a composite–foam sandwich for the front structure of a high speed train// Composite Structures. - 2003. – No 61. - p. 13–25. DOI:10.1016/S0263-8223(03)00028-X
13. Castella P.S., Blanc I., Gomez Ferrer M., Jolliet O. and others. Integrating life cycle costs and environmental impacts of composite rail car-bodies for a Korean train// Int J Life Cycle Assess. - 2009. – No 14. - p. 429–442. DOI:10.1007/s11367-009-0096-2
14. Полилов А.Н., Татусь Н.А. Биомеханика прочности волокнистых композитов. – Москва, 2018. – 328 с.
15. Ахметов А.М., Кондратец С.В., Перлов С.В. Технология и оборудование для изготовления корпусных и роторных деталей ГТД методом намотки из ПКМ// Авиационная промышленность. - 2013. - № 2. - С. 11.
16. Лоскутов Ю.В., Куликов Ю.А., Шлычков С.В., Темнова Е.Б. Упругие характеристики многослойных криволинейных труб из армированного пластика// Механика композиционных материалов и конструкций. - 2006. - Т. 12, № 2. - С. 219-233.
17. Блазнов А.Н., Сакошев З.Г., Журковский М.Е., Самойленко В.В., Фирсов В.В., Сакошев Е.Г. Разработка программ управления установкой намотки и исследование ПКМ с различными схемами армирования// Южно-Сибирский научный вестник. - 2019. - № 4-2 (28). - С. 13-18.
18. Сергеичев И.В., Сафонов А.А., Ушаков А.Е., Федоренко А.Н., Федулов Б.Н. Моделирование динамических ударных испытаний контейнера-цистерны с сосудом из полимерных композиционных материалов для мультимодальных перевозок химически агрессивных жидкостей и продуктов нефтехимии. XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Казань, 20–24 августа 2015 года. С. 3430–3433.
19. Полилов А.Н., Татусь Н.А., Жавыркин В.В., Тянь Ш. Анализ эффективности кольцевых и ленточных пружин из стеклопластика// Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2020. - № 3. - С. 79-93.
20. Сафонов А.А., Суворова Ю.В. Оптимизация процесса пултрузии стержней большого диаметра// Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2009. - № 6. - С. 59-66.
21. Макухин А.Г., Сыровой Г.В., Ратушняк А.Ю. Пултрузия, как технологический процесс изготовления изделий из композиционных материалов// Прогрессивные технологии и системы машиностроения. - 2016. - № 1 (52). - С. 99-106.
22. Григорьев С.Н., Красновский А.Н., Хазиев А.Р. Механика получаемого пултрузией квазиортотропного композитного стержня круглого поперечного сечения// Конструкции из композиционных материалов. - 2013. - № 1 (129). - С. 3-11.
23. Патент №143314. Российская федерация, МПК В61D 7/00 (2006.01), В61D 17/00 (2006.01). Железнодорожный вагон-хоппер с кузовом из композиционных материалов (варианты): № 2013141661: заявл. 12.09.2013, опубл. 20.07.2014 / Ващенко А.И. и др. 11 с.: ил. – Текст: непосредственный.
24. Осипов В. Мост из композита – это не фантастика// Гудок. - 2014. - №209 (25644). (<https://gudok.ru/newspaper/?ID=1238273&archive=2014.11.24>).
25. Ушаков А.Е. Применение композиционных материалов в путевом хозяйстве. Труды ОАО РЖД "Роль путевого хозяйства в инфраструктуре железнодорожного транспорта". - 2012. – С. 84-91
26. Лысак И.А. Сделано со знаком качества: АО "Метровагонмаш". Методы менеджмента качества. - 2020. - № 11. - С. 24-29.

27. Патент № 81968. Российская федерация, МПК E01B 11/54 (2006.01). Соединитель изолирующий композиционный: №2008137012 : заявл. 16.09.2008 : опубл. 10.04.2009 / Аркатов В.С. и др. – 6 с. : ил. – Текст: непосредственный.
28. Проценко А.Е., Петров В.В., Малышева Д.П. Сравнительный анализ сэндвич-панелей из ПКМ, полученных методами вакуумной инфузии и контактного формования// Ползуновский вестник. - 2020. - № 4. - С. 121-126.
29. Гракова А.Г. Современные технологии в производстве изделий из композиционных полимерных материалов// Colloquium-journal. - 2018. - № 11-6 (22). - С. 29-30.
30. Францев М.Э. Создание надстройки из композитов пассажирского судна на подводных крыльях с позиций обеспечения ее весовой эффективности и характеристик долговечности// Конструкции из композиционных материалов. - 2018. - № 1 (149). - С. 30-34.
31. Хоробрых М.А., Каширский Д.А. Методы изготовления деталей из композиционных материалов пропиткой под давлением в оснастке// Молодой ученый. - 2013. - № 5. - С. 116-122.
32. Спиглазов А.В., Кордикова Е.И., Гончарёнок Д.С. Моделирование процесса пропитки под давлением стеклянных тканей полиэфирным связующим// Труды БГТУ. №4. Химия, технология органических веществ и биотехнология. - 2016. - № 4 (186). - С. 35-38.
33. Войнов С.И., Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Ямщикова Г.А. Влияние внешней среды на свойства органопластика, полученного методом пропитки под давлением (RTM)// Авиационные материалы и технологии. - 2015. - № 4 (37). - С. 72-78.
34. Хвостик М.Ю. Шпалы композитные как альтернатива деревянным// Вестник ВНИИЖТ. - 2016. - Т. 75, № 3. - С. 179 – 182.
35. Бочкарев Д.И., Кебилов А.А., Мирошников Н.Е., Полищук В.П., Казак П.М. Современное состояние и перспективы развития конструкций пути для метрополитена// Механика машин, механизмов и материалов. - 2012. - № 2 (19). - С. 94 – 99.
36. Шамаев В.А и др. Теоретические и прикладные аспекты получения шпал из древесины мягких лиственных пород. – Воронеж, 2019. – 159 с.
37. Соколов В.В., Антипов П.Ю., Голишев О.А., Долинский С.В. Влияние количества слоев армирующего материала на толщину и весовые характеристики углепластиковых деталей, получаемых методом вакуумной инфузии// Пластические массы. - 2021. - № 1-2. - С. 62-64.
38. Руппель В., Дунаев А. Новые решения и инновационные материалы для процесса вакуумной инфузии// Композитный мир. - 2017. - № 1 (70). - С. 42-45.
39. Сафонов А.А. Математическое моделирование пропитки армирующего наполнителя стеклопластиков при вакуумной инфузии// Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2010. - № 6. - С. 70-78.
40. Jeon K.W., Shin K.B., Kim J.S. A study on fatigue life and strength of a GFRP composite bogie frame for urban subway trains. Procedia Engineering. - 2011. - №10. - P. 2405–2410.
41. Yao K., Yang Y., Li H., Liu X., Lei H., Fan H., Fang D. Material characterization of a multi-cavity composite structure for the bogie frame of urban maglev train// Composites Part B. - 2016. - № 99. - P. 277–287.
42. Криницын М.Г., Донцов Ю.В., Юркина В.А. Влияние углеродных волокон на структуру и механические свойства композиционных полимерных материалов, полученных методами аддитивных технологий// Известия высших учебных заведений. Физика. - 2021. - Т. 64. - № 6 (763). - С. 111-117.

43. Торопов А.Л. Способ возведения конструкций на 3D принтере с внутренним силовым каркасом из карбонового волокна// Современные наукоемкие технологии. - 2019. - № 3-2. - С. 261-265.
44. Петров В.М., Безпальчук С.Н., Яковлев С.П. О влиянии структуры на прочность изделий из пластиков, получаемых методом 3D-печати// Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. - 2017. - Т. 9. - № 4. - С. 765-776.
45. Патент № 194825. Российская федерация, (51) МПК E01B 5/18 (2006.01). Контроль рельс повышенной износостойкости: № 2019135158: заявл. 01.11.2019: опубл. 24.12.2019 / Фадеев. В.С. и др. – 6 с. : ил. – Текст : непосредственный.
46. Патент № 2494901. Российская федерация, МПК B61H 1/00 (2006.01), F16D 65/04 (2006.01), F16D 69/02 (2006.01). Тормозная колодка с композиционными вставками для локомотивов и мотовозов : № 2012124544 : заявл. 14.06.2012: опубл. 10.10.2013/ Фадеев. В.С. и др. – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный.
47. Чертовских Е.О., Габец А.В., Марков А.М., Габец Д.А., Иванов А.В. Разработка металлокерамического композиционного материала для фрикционного узла поглощающего аппарата железнодорожного вагона// Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». - 2018. - №1.
48. Воробьев А.А., Кулик В.И., Нилов А.С., Спирюгова М.А. Перспективные технологии производства тормозных дисков из керамоматричных композитов на основе SiC-матрицы систем торможения высокоскоростного железнодорожного транспорта// Известия ПГУПС. - 2020. - Т. 17. - №. 2. – С. 210–220.

References

1. Kim J.S., Yoona H.J. Structural behaviors of a GFRP composite bogie frame for urban subway trains under critical load conditions// Procedia Engineering. - 2011. - No 10. - P. 2381–2386. DOI:10.1016/j.proeng.2011.04.391
2. Kim J.S., Lee S.J., Shin K.B. Manufacturing and structural safety evaluation of a composite train carbody// Composite Structures. - 2007. - No 78. - P. 468–476. DOI:10.1016/j.compstruct.2005.11.006
3. Ferdous W., Manalo A., Erp G.V., Aravinthan Th., Kaewunruen S., Remennikov A. Composite railway sleepers – Recent developments, challenges and future prospects// Composite Structures. - 2015. - No 134. - P. 158–168. DOI:10.1016/j.compstruct.2015.08.058
4. Rakhcheev V.G., Galansky S.A., Maximov I.S. Improvement of rail grinding efficiency based on application of modernized composite and metal wheels and optimization of rail grinding train measurement system// Bulletin of transport of the Volga region. - 2018. - No 4 (70). - P. 52 - 58. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35683734> (in Russian)
5. Ministry of Transport of the Russian Federation: Order: dated September 11, 2013 N MS-91-r On approval of the Program for the introduction of composite materials, structures and products from them in the field of transport (in Russian)
6. Doriomedov M.S., Daskovsky M.I., Skripachev S.Yu., Shein E.A. Polymer composite materials in the russian railways// Electronic scientific journal "PROCEEDINGS VIAM". - 2016. - No7. – p. 113-118. (dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2016-0-7-12-12) (in Russian)
7. Bekturov K.B., Zaripov R.Yu., Medvedev A., Kaerbekov D. Prospects for the use of composite materials in freight car building// Science and technology of Kazakhstan. - 2017. - No 1-2. - P. 25-33 (in Russian)

8. Postnikov V.P., Noskova A.R. Economic justification of the prospects for the use of composite materials in the field of freight car building// Bulletin of PNIPU. Socio-economic sciences. - 2018. - No 2. - P. 188 - 200 (in Russian)
9. Karakaev A.K., Zaripov R.Yu. Composite materials in freight car building// Science and technology of Kazakhstan. - 2016. - No 1-2. - P. 39 – 47. (in Russian)
10. Zinno A., Fusco E., Prota A., Manfredi G. Multiscale approach for the design of composite sandwich structures for train application// Composite Structures. - 2010. – No 92. - P. 2208 – 2219. DOI:10.1016/j.compstruct.2009.08.044
11. Kim J.S., Jeong J.P., Lee S.J. Numerical and experimental studies on the deformational behavior a composite train carbody of the Korean tilting train// Composite Structures. - 2007. - No 81. - P. 168–175. DOI:10.1016/j.compstruct.2006.08.007
12. Belingardi G., Cavatorta M.P., Duella R. Material characterization of a composite–foam sandwich for the front structure of a high speed train// Composite Structures. - 2003. – No 61. - P. 13–25. DOI:10.1016/S0263-8223(03)00028-X
13. Castella P.S., Blanc I., Gomez Ferrer M., Jolliet O. and others. Integrating life cycle costs and environmental impacts of composite rail car-bodies for a Korean train// Int J Life Cycle Assess. - 2009. – No 14. - P. 429–442. DOI:10.1007/s11367-009-0096-2
14. Polilov A.N., Tatus' N.A. Strength Biomechanics of Fibrous Composites. - Moscow: FIZMATLIT, 2018. - 328 p. - ISBN 975-5-9221-1760-9. (in Russian)
15. Akhmetov A.M., Kondratets S.V., Perlov S.V. Technology and equipment for manufacturing case and rotor parts of a gas turbine engine by winding PCM// Aviation industry. - 2013. - No 2. - P. 11. (in Russian)
16. Loskutov Yu.V., Kulikov Yu.A., Shlychkov S.V., Temnova E.B. Elastic characteristics of multilayer curved pipes made of reinforced plastiP// Mechanics of composite materials and structures. - 2006. - Vol. 12. - No 2. - P. 219-233. (in Russian)
17. Blaznov A.N., Sakoshev Z.G., Zhurkovsky M.E., Samoilenko V.V., Firsov V.V., Sakoshev E.G. Development of winding plant control programs and PKM research with various reinforcement schemes// South Siberian Scientific Bulletin. - 2019. - No 4-2 (28). - P. 13-18. (in Russian)
18. Sergeichev I.V., Safonov A.A., Ushakov A.E., Fedorenko A.N., Fedulov B.N. Simulation of dynamic impact tests of tank container with vessel of polymer composite materials for multimodal transportation of chemically aggressive liquids and petrochemical products. XI All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics, Kazan, August 20-24, 2015. – p. 3430-3433. (in Russian)
19. Polilov A.N., Tatus' N.A., Zhavyrkin V.V., Tian X. Analysis of efficiency of fiberglass ring and band springs// Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - 2020. - Vol. 49. - No 3. - P. 243-255. (in Russian)
20. Safonov A.A., Suvorova Yu.V. Optimization of the process of pultrusion of rods of large diameter// Problems of machine building and machine reliability. - 2009. - No 6. pp. 59-66. (in Russian)
21. Makukhin A.G., Syrovoy G.V., Ratushnyak A.Yu. Pultrusiya, as a technological process of making products from composite materials// Advanced engineering technologies and systems. - 2016. - No 1 (52). - P. 99-106. (in Russian)
22. Grigoriev S.N., Krasnovsky A.N., Khaziev A.R. Mechanics of a quasi-orthotropic composite rod of a round cross section obtained by pultrusion// Structures made of composite materials. - 2013. - No 1 (129). - P. 3-11. (in Russian)

23. Patent number 143314. Russian Federation, IPC B61D 7/00 (2006.01), B61D 17/00 (2006.01). Hopper railway car with a body of composite materials (versions): No. 2013141661: declared. 12.09.2013, publ. 20.07.2014 /Vashchenko A.I. and others 11 p. (in Russian)
24. Osipov V. The composite bridge is not fantastiP. Beep. - 2014. - No 209 (25644). (in Russian) <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1238273&archive=2014.11.24>
25. Ushakov A.E. Application of composite materials in the track economy. Works of Russian Railways "The Role of the Track Economy in Railway Transport Infrastructure." - 2012. – P. 84-91. (in Russian)
26. Lysak I.A. Made with a quality sign: Metrovagonmash JSP// Quality management methods. - 2020. - No 11. - P. 24-29. (in Russian)
27. Patent No. 81968. Russian Federation, IPC E01B 11/54 (2006.01). Composite insulating connector: No. 2008137012: declared. 16.09.2008: publ. 10.04.2009 /Arkatov V.S. and others - 6 p. (in Russian)
28. Protsenko A.E., Petrov V.V., Malysheva D.P. Comparative analysis of sandwich panels from PKM obtained by vacuum infusion and contact molding methods// Polzunovsky bulletin. - 2020. - No 4. - P. 121-126. (in Russian)
29. Grakova A.G. Modern technologies in the production of products from composite polymer materials// Colloquium-journal. - 2018. - No 11-6 (22). - P. 29-30. (in Russian)
30. Frantsev M.E. Creation of superstructure from composites of passenger vessel on hydrofoils from the position of ensuring its weight efficiency and durability characteristics// Structures made of composite materials. - 2018. - No 1 (149). - P. 30-34. (in Russian)
31. Khorobrykh M.A., Kashirsky D.A. Methods of manufacturing parts from composite materials by impregnation under pressure in tooling// Young scientist. - 2013. - No 5. - P. 116-122. (in Russian)
32. Spiglazov A.V., Kordikova E.I., Pottery D.S. Modeling the process of impregnation under pressure of glass fabrics with a polyester binder// Works of BSTU. No4. Chemistry, organic technology and biotechnology. - 2016. - No 4 (186). - P. 35-38. (in Russian)
33. Voinov S.I., Zhelezina G.F., Solovyova N.A., Yamshchikova G.A. Influence of the external environment on the properties of organoplastics obtained by the method of pressure impregnation (RTM)// Aviation materials and technologies. - 2015. - No 4 (37). - P. 72-78. (in Russian)
34. Tail M.Yu. Sleepers composite as an alternative to wooden// Bulletin VNIIZHT. - 2016. - V. 75. - No 3. - P. 179 - 182. (in Russian)
35. Bochkarev D.I., Kebikov A.A., Mirosnikov N.E., Polishchuk V.P., Kazak P.M. The modern state and prospects for the development of track structures for the metro// Mechanics of machines, mechanisms and materials. - 2012. - No 2 (19). - P. 94 - 99. (in Russian)
36. Shamaev V.A. and others. Theoretical and applied aspects of production of sleepers from soft hardwood. Voronezh, 2019. – 159 P. (in Russian)
37. Sokolov V.V., Antipov P.Yu., Golishev O.A., Dolinsky S.V. The influence of the number of layers of reinforcing material on the thickness and weight characteristics of carbon-plastic parts obtained by vacuum infusion// Plastic masses. - 2021. - No 1-2. - P. 62-64. (in Russian)
38. Ruppel V., Dunaev A. New solutions and innovative materials for the vacuum infusion process// Composite world. - 2017. - No 1 (70). - P. 42-45. (in Russian)
39. Safonov A.A. Mathematical modeling of impregnation of reinforcing filler of fiberglass during vacuum infusion// Problems of machine building and machine reliability. - 2010. - No 6. - P. 70-78. (in Russian)

40. Jeon K.W., Shin K.B., Kim J.S. A study on fatigue life and strength of a GFRP composite bogie frame for urban subway trains// Procedia Engineering. - 2011. - No10. - P. 2405–2410.
41. Yao K., Yang Y., Li H., Liu X., Lei H., Fan H., Fang D. Material characterization of a multi-cavity composite structure for the bogie frame of urban maglev train. Composites Part B. - 2016. - No 99. - P. 277–287.
42. Krinitsyn M.G., Dontsov Yu.V., Yurkina V.A. Influence of carbon fibres on structure and mechanical properties of composite polymer materials obtained by methods of additive technologies// News of higher educational institutions. Physics. - 2021. - V. 64. - No 6 (763). - P. 111-117. (in Russian)
43. Toropov A.L. Method of erecting structures on a 3D printer with an internal power frame made of carboxylic fiber// Modern knowledge-based technologies. - 2019. - No 3-2. - P. 261-265. (in Russian)
44. Petrov V.M., Bezpachuk S.N., Yakovlev S.P. On the effect of the structure on the strength of plastic products obtained by 3D printing// Bulletin of the State University of the Navy and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov. - 2017. - V. 9, No 4. - P. 765-776. (in Russian)
45. Patent number 194825. Russian Federation, (51) IPC E01B 5/18 (2006.01). Counter rail with increased wear resistance: No. 2019135158: declared. 01.11.2019: publ. 24.12.2019 /Fadeev. V.S. and others - 6 p. (in Russian)
46. Patent number 2494901. Russian Federation, IPC B61H 1/00 (2006.01), F16D 65/04 (2006.01), F16D 69/02 (2006.01). Brake pad with composite inserts for locomotives and motor vehicles: No. 2012124544: declared. 14.06.2012: publ. 10.10.2013/Fadeev. V.S. and others - 9 p. (in Russian)
47. Chertovsky E.O., Gabets A.V., Markov A.M., Gabets D.A., Ivanov A.V. Development of metal-ceramic composite material for the friction assembly of the absorbing apparatus of a railway car// Electronic scientific journal "Engineering Bulletin of the Don." - 2018. - No1. (in Russian)
48. Vorobyov A.A., Kulik V.I., Nilov A.S., Spiriyugova M.A. Promising technologies for the production of brake discs from ceramic matrix composites based on the SiC matrix of high-speed railway braking systems// PGUPS News. - 2020. - V. 17, No. 2. – P. 210-220. (in Russian)

Дата поступления: 22 сентября 2021 г.