

УДК 629.3.021.242

## АНАЛИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ И АКТУАЛЬНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕСУЩИХ СИСТЕМ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Г. А. Арутюнян, асп. / А. Б. Карташов, доц.

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Многие потребительские свойства автомобиля, такие как топливная экономичность, управляемость, скоростные свойства, пассивная безопасность, в значительной степени зависят от конструкции и свойств несущей системы. Несущая система легкового автомобиля воспринимает все нагрузки, возникающие при движении автомобиля, служит для крепления различных узлов и агрегатов, а также для размещения водителя, пассажиров и груза. Большинство легковых автомобилей имеют несущую систему в виде несущего кузова или несущую систему каркасно-панельного типа. На кузов приходится до половины массы всего автомобиля, поэтому снижение массы кузова является эффективным методом снижения массы всего автомобиля.

Серийные легковые автомобили, как правило, имеют стальной несущий корпус, который совмещает в себе технологичность, высокую прочность и жёсткость, а также высокий уровень безопасности. Возможно также изготовление несущей системы из алюминия, что обеспечивает улучшение эксплуатационных свойств за счёт снижения массы и повышения коррозионной стойкости, но в то же время увеличивает стоимость и усложняет технологию. В настоящее время практически исчерпаны пути дальнейшего улучшения свойств несущих корпусов из стали и алюминия. Для совершенствования несущих систем необходимо искать новые методы их изготовления, а также новые материалы.

Перспективным методом совершенствования несущих систем является применение для их изготовления полимерных композиционных материалов. Композиционные материалы обладают высокими показателями удельной прочности и жёсткости, а также возможностью использования их анизо-

тропных свойств для лучшего соответствия условиям нагружения.

Раньше остальных для изготовления композитных несущих систем автомобилей начали применяться стеклопластики. Компактные автомобили с несущей системой из стеклопластика получили распространение в Англии в 1950-х годах. Большинство этих автомобилей имели переднемоторную компоновку и двухместные кузова типа купе. Наиболее яркими представителями являются автомобили Lotus Elite, Rochdale Olympic и Mini Marcos. В отличие от автомобилей Chevrolet Corvette и Pontiac Firebird, которые имели несущую систему каркасно-панельного типа с панелями из стеклопластика, в этих автомобилях стеклопластиковый корпус являлся несущим.

Автомобиль Lotus Elite производился с 1957 по 1963 год. Стеклопластиковый кузов был усилен стальной конструкцией для крепления передней подвески и двигателя, а также стальной рамкой ветрового стекла, повышающей безопасность. Снаряжённая масса двухместного автомобиля составляла 504 кг. При мощности двигателя 75 л. с. автомобиль обладал относительно высокими скоростными показателями, что обуславливало его участие в автогонках.

Rochdale Olympic был выпущен в 1959 году. Он оснащался двигателем мощностью 78 л. с., имел четыре посадочных места и снаряжённую массу 650 кг. Автомобиль Mini Marcos имел два посадочных места и снаряжённую массу всего 476 кг, выпуск начался в 1965 году.



*Рисунок 1.*  
Автомобиль Lotus  
Elite



Рисунок 2. Автомобили  
а) Rochdale Olympic; б) Mini Marcos

В России также проводились работы по изготовлению несущих систем из стеклопластика. В 1958 году в МГТУ им. Н. Э. Баумана был создан экспериментальный автомобиль МВТУ. Микролитражный автомобиль имел кузов каркасно-панельного типа с панелями из стеклопластика. Восемь панелей, составлявших кузов, содержали от одиннадцати до двадцати слоёв стеклоткани. Масса несущей системы составляла 47 кг, автомобиль был продемонстрирован на выставке на ВДНХ.

Опыт, полученный при создании несущей системы этого автомобиля, был затем применён при проектировании кабин военных автомобилей, а также кузовов плавающих машин. Автомобиль ЗИЛ-135А имел кабину бескаркасной конструкции с наружной и внутренней панелями, изготовленными из стеклопластика, и с пространством между ними, заполненным пенополиуретаном.

Несущая система плавающего автомобиля ЗИЛ-135П, созданного в 1965 году, состоит из лодкообразной трёхслойной конструкции. Пространство между внутренней и наружной стеклопластиковыми оболочками заполнено армированным бакелизированной фанерой пенопластом. Толщина наружной стеклопластиковой оболочки составляет от 4 до 5 мм, внутренней — до 3 мм. Толщина пенопласта достигает 30 мм.

Серийные поисково-эвакуационные автомобили ЗИЛ-4906 и ЗИЛ-49061 имели корпуса из полиэфирного стеклопластика со встроенными алюминиевыми рамами лонжеронного типа. Такая конструкция проще в изготовлении, чем конструкция ЗИЛ-135П.

В настоящее время в легковых автомобилях стеклопластик преимущественно применяется для обшивки, а не для несущих элементов ввиду невысоких показателей его жёсткости. Однако стеклопластик применяется для несущих систем автобусов, а также кабин грузовых автомобилей.

Одним из примеров является автобус венгерской фирмы Evopro Modulux. Автобус имеет модульную конструкцию из стеклопластиковых секций и может быть изготовлен в двух- и трёхдверном вариантах. Автобус может выпускаться в электрическом и гибридном исполнениях. Использование стеклопластика позволило значительно уменьшить массу не-

сущей системы. Панели автобуса изготавливаются методом вакуумной инфузии.

Прежде чем найти применение в легковых дорожных автомобилях, несущие системы из углепластика начали применяться в конструкции гоночных автомобилей. Впервые такая несущая система была применена в 1978 году на автомобиле McLaren MP4, выступавшем в классе «Формула-1».

Переход от несущей системы в виде трубчатой пространственной рамы к несущей системе из углепластика, также называемой монококом, был вызван несколькими причинами. За счёт большей удельной прочности и жёсткости углепластика стало возможным увеличить жёсткость корпуса, что положитель-



Рисунок 3. Автомобиль МВТУ

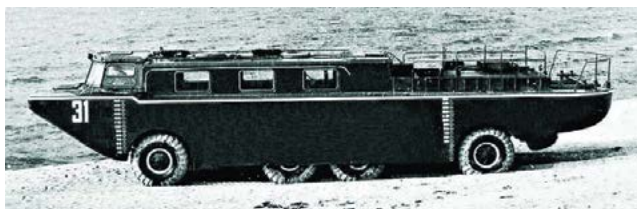


Рисунок 4. Плавающий автомобиль ЗИЛ-135П



Рисунок 5. Электрический автобус Evopro Modulux с несущей системой из стеклопластика



*Рисунок 6.* Несущая система автомобиля McLaren MP4

но сказалось на управляемости, а также увеличить прочность, что повысило пассивную безопасность, масса при этом уменьшилась, повысив скоростные свойства. Также положительно сказывается на безопасности то, что несущая система из углепластиковых панелей, в отличие от трубчатой рамы, не имеет сквозных отверстий в кокпит гоночного автомобиля и за счёт этого уменьшает возможность проникновения посторонних объектов в кокпит в случае аварии.

В настоящее время подавляющее большинство гоночных автомобилей с открытыми колёсами, а также некоторые гоночные автомобили с закрытыми кузовами имеют несущую систему, изготовленную из композиционных материалов, преимущественно из углепластика.

Применение композиционных материалов для несущих систем дорожных автомобилей получило распространение в последние годы. Из-за высокой стоимости они в первую очередь начали применяться в спортивных автомобилях, для которых скоростные показатели являются одними из наиболее важных потребительских свойств. Несмотря на высокую стоимость, снижение массы автомобиля за счёт использования композиционных материалов в несущей системе оказывается оправданным, так как снижение массы других узлов и агрегатов, во-первых, имеет ещё большую стоимость или невозможно при текущем уровне развития технологий, во-вторых, оказывает меньший вклад в снижение общей массы автомобиля.

Использование композиционных материалов началось с эксклюзивных автомобилей, выпускаемых единичными экземплярами. В настоящее время такие несущие системы начали применяться в серийных автомобилях, производимых в условиях конвейерного производства.

Первые несущая система из композиционных материалов для изготовления несущей системы автомобиля, предназначенного для движения по дорогам общего пользования, была применена в 1992 году в автомобиле McLaren F1. Автомобиль имел средне-моторную компоновку и был рассчитан на трёх человек, причём водитель располагался в центре, а места для пассажиров были предусмотрены за ним. Несущая система была изготовлена из углепластика. Передняя подвеска крепилась к композитному несущему кузову через закладные элементы. Задняя подвеска крепилась к картеру двигателя, который, в свою очередь, крепился к несущей системе. Всего было изготовлено 106 автомобилей в период с 1992 по 1998 год.

Следующим автомобилем с несущей системой из композиционных материалов стал Ferrari F50. Это двухместный спортивный автомобиль с кузовом типа родстер и средне-моторной компоновкой. Автомобиль выпускался в период с 1995 по 1997 год, и объём выпуска составил 349 штук. Из углепластика была изготовлена средняя часть несущей системы, в которой размещаются водитель и пассажир; передняя часть, а также задняя часть, к которой



крепятся двигатель и задняя подвеска, изготовлены из алюминия. Углепластик изготавливался на основе эпоксидной матрицы. Несущий корпус был изготовлен в виде трёхслойных панелей со средним слоем из арамидных сот.

Другой автомобиль с несущей системой из углепластика выпустила итальянская фирма Pagani в 1998 году. Pagani Zonda также являлся среднеторговым спортивным автомобилем с кузовами типа купе и родстер. Из углепластика была изготовлена средняя часть автомобиля, а подвеска и двигатель крепились к металлическим передней и задней частям несущей системы. Всего было произведено 135 автомобилей.

В 2002 году компания Ferrari повторила опыт компании McLaren и выпустила автомобиль Ferrari Enzo, несущая система которого была изготовлена из углепластика полностью, включая моторный отсек и энергопоглощающую зону спереди. Всего было выпущено 400 экземпляров.

В 2003 году начался выпуск автомобиля Porsche Carrera GT. Автомобиль с кузовом типа родстер также имел среднюю часть несущей системы из углепластика. Объём выпуска составил 1 270 экземпляров.

За десятилетний период — с 1992 по 2002 год — несущие корпуса из композиционных материалов получили применение только в спортивных автомобилях высокой ценовой категории, так называемых суперкарах, объём выпуска которых составлял не более 1 000 экземпляров.

В последующее время объём выпуска автомобилей, использующих композиционные материалы в несущей системе, значительно увеличился. Большинство крупных автомобильных производителей



Рисунок 7. McLaren F1

Таблица 1. Тенденция изменения стоимости и объёма выпуска автомобилей с несущей системой из композиционных материалов

Модель	Годы производства	Объём выпуска	Цена, \$
McLaren F1	1992–1998	106	1 200 000
Ferrari F50	1995–1997	349	528 000
Pagani Zonda	1998	135	500 000
Ferrari Enzo	2002	400	659 330
Porsche Carrera GT	2003–2006	1 270	540 000
Mercedes-Benz SLR	2003–2010	1 400	450 000
Lexus LFA	2010–2012	500	540 000
McLaren 12C	2011	4 000	231 400
Lamborghini Aventador	2011	2 536	393 695
Alfa Romeo 4C	2013	2 500 в год	55 000
BMW i3	2013	16 000 в год	42 275
BMW i8	2014	5 000 в год	135 000

освоили технологию изготовления несущих систем из композиционных материалов. Начиная примерно с 2007 года несущая система из композиционных материалов стала неотъемлемой частью спортивных автомобилей высокой ценовой категории, таких как Porsche Carrera GT, Porsche 918, McLaren 12C, McLaren P1, Lamborghini Aventador, Alfa Romeo 4C, Ferrari LaFerrari, Mercedes-Benz SLR, Lexus LFA, Aston Martin One-77. Отдельные силовые элементы и элементы обшивки из композиционных материалов применяются и в более дешёвых автомобилях. BMW M6 имеет панель крыши, изготовленную из углепластика. Chevrolet Corvette и Ford GT также имеют элементы обшивки и некоторые силовые элементы из углепластика.

В отличие от большинства спортивных автомобилей высшей ценовой категории, выпускаемых ограниченными сериями, автомобиль Alfa Romeo 4C выпускается серийно с объёмом выпуска 2 500 автомобилей в год. Стоимость автомобиля начинается от 55 000 \$. Автомобиль выпускается с кузовами типа купе и родстер. Средняя часть автомобиля изготовлена из углепластика, к ней крепится передняя подвеска. В передней части установлен алюминиевый энергопоглощающий элемент. Задняя часть автомобиля изготовлена из алюминия, к ней крепятся задняя подвеска и двигатель. Деформируемая зона в передней части изготовлена из алюминия. Автомобиль имеет среднеторговую компоновку с приводом на задние колёса. Производство началось в 2013 году. Автомобиль является примером использования несущей системы из композиционных материалов в серийном автомобиле в ценовой категории до 100 000 \$.

Кроме спортивных автомобилей, снижение массы за счёт использования композиционных материалов оказывается экономически оправданным также и для гибридных и электромобилей. В настоящее



*Рисунок 8.*  
Несущая система  
автомобиля Alfa  
Romeo 4C

время для электромобилей важнейшим эксплуатационным параметром является запас хода. При текущем уровне эффективности электрических аккумуляторов для достижения достаточного запаса хода снижение массы несущей системы является необходимым.

Наиболее широко композиционные материалы для дорожных автомобилей использует фирма BMW.

Несущая система электромобиля BMW i3 состоит из плоской алюминиевой рамы, на которой закреплены элементы подвески, аккумуляторы и электродвигатели. На алюминиевую раму устанавливается модуль, полностью изготовленный из углепластика, в котором размещаются пассажиры и груз. По словам представителей компании BMW, использование углепластика позволило снизить массу автомобиля на 300 кг, таким образом компенсировав большой вес аккумуляторных батарей. Снаряжённая масса автомобиля составляет 1 195 кг. Аналогичный электромобиль со стальной несущей системой Nissan Leaf имеет полную массу 1 493 кг. Автомобиль серийно выпускается с 2013 года. За 2014 год было продано 16 052 автомобиля. Стоимость автомобиля начинается от 42 275 \$.

Ещё одним автомобилем от компании BMW с несущей системой из композиционных материалов является BMW i8. Это двухместное купе имеет среднюю часть из углепластика, в то время как подвеска, электрический и бензиновый двигатели крепятся к алюминиевым передней и задней частям. Автомобиль обладает высокими скоростными характеристиками и низким расходом топлива. Стоимость автомобиля начинается от 135 925 \$. При этом за один месяц 2014 года был продан 1 741 автомобиль.

Фирма Volkswagen для своего гибридного автомобиля также выбрала несущую систему из полимерных композиционных материалов. Заявленный расход топлива на 100 км пути для автомобиля Volkswagen XL-1 составляет 0,9 л. Кроме использования гибридной силовой установки и низкого коэффициента лобового сопротивления, такие показатели также обеспечиваются снижением массы несущей системы.

Технология изготовления несущих систем из углепластика претерпела значительные изме-

нения. На начальном этапе появления несущих систем из углепластика использовались технологии из аэрокосмической отрасли, однако они могли применяться только в единичном и мелкосерийном производстве. Производство углепластиковых изделий не было автоматизировано и использовало в основном ручной труд. Детали изготавливались из предварительно пропитанного углеволокна (препрега) на основе эпоксидного связующего. Раскрой и выкладка материала в матрицы осуществлялись вручную. Для предварительного придания углеткани необходимой формы и выкладки сложных поверхностей препрег может предварительно нагреваться. Далее матрица подвергается вакуумированию, а затем помещается в автоклав, где под воздействием высоких температуры и давления происходит полимеризация связующего. Температура в автоклаве в среднем поддерживается на уровне 100 °С, давление составляет до 8 атмосфер. Процесс обработки в автоклаве может длиться до восьми часов. После извлечения детали из матрицы необходимо удалить облой и прорезать необходимые отверстия. Эти операции изначально выполнялись вручную абразивным инструментом. Кроме высокой трудоёмкости, удаление облоя также требует специальных средств защиты, так как углепластиковая пыль является канцерогеном.

Данная технология изготовления деталей из углепластика позволяет получить высокие показатели прочности и применяется для изготовления единичных и мелкосерийных автомобилей, таких как гоночные автомобили или спортивные автомобили высокой ценовой категории. Технологический процесс может быть частично оптимизирован за счёт автоматизации процесса раскроя и выкладки, а также за счёт гидроабразивной обработки детали после извлечения из матрицы. Но основная составляющая процесса — обработка в автоклаве — является трудоёмким процессом. Длительность этого процесса



*Рисунок 9.* Несущая система автомобиля BMW i3

не позволяет использовать его в крупносерийном и массовом производстве.

При изготовлении автомобиля BMW i3 используется технология RTM (resin transfer molding). Углеткань для изготовления деталей предварительно пропитывается временным связующим. Затем ткань помещается в матрицу и подвергается ультразвуковой обработке, после чего предварительное связующее уже позволяет детали сохранять форму. Из нескольких предварительно формованных деталей в новых матрицах собираются более крупные детали. Так, например, каждая из боковых панелей состоит из девяти предварительно формованных деталей. Разделение крупных деталей на более простые позволяет автоматизировать процесс выкладки ткани. Затем оснастка нагревается до 100 °С, и в неё подаётся смола под высоким давлением. Благодаря использованию специальных смол и воздействию температуры полимеризация происходит значительно быстрее, чем при обработке в автоклаве. После извлечения из оснастки деталь подвергается гидроабразивной обработке. При этом удаляется облой, а также изготавливаются необходимые отверстия. Рубленое волокно, полученное в результате переработки облоя, затем используется для изготовления панели крыши. Изготовленные крупные панели соединяются между собой с помощью двухкомпонентного полиуретанового клея и образуют основу кузова.

Для изготовления несущей системы McLaren F1 в 1992 году требовалось 3 000 часов. В 2003 году несущая система McLaren SLR изготавливалась за 500 часов. В настоящее время несущие системы автомобилей BMW i3 и McLaren 12C изготавливаются за 4 часа.

Композитные панели представляют собой тонкостенные оболочки. Обеспечение достаточной жёсткости и прочности конструкции может достигаться за счёт склеивания и приформовывания тонкостенных профилей между собой. Повышение жёсткости профиля за счёт увеличения количества слоёв армирующего материала не является эффективным методом. Вместо этого при необходимости обеспечения жёсткости и прочности композитной панели деталь изготавливается в виде трёхслойной панели. Трёхслойная панель (или сэндвич-панель) состоит из двух прочных и тонких наружных оболочек, связанных между собой малопрочным и лёгким материалом. Средний слой обеспечивает совместную работу наружных оболочек и увеличивает их жёсткость и устойчивость. Наружные слои преимущественно работают на растяжение и сжатие, а средний слой — на сдвиг. Средний слой может быть изготовлен из пенопласта (полистирольного, полихлорвинилового, полиуретанового), сот (алюминиевых, арамидных), гофров (металлических или пластмассовых).



Рисунок 10. Несущая система автомобиля BMW i3



Рисунок 11. Несущая система автомобиля Volkswagen XL-1

Между собой слои связываются с помощью склеивания. В виде трёхслойных панелей изготавливаются крупные панели автомобиля, такие как панель пола, крыши, боковые панели. Широко трёхслойные панели применяются в конструкциях автобусов и плавающих машин. Трёхслойные панели также обладают звуко- и теплоизоляционными свойствами.

В настоящее время стоимость изделия из углепластика массой 1 кг составляет в среднем 20 \$, в то время как стоимость 1 кг стали составляет менее 1 \$. По некоторым оценкам, массовое применение углепластика в несущих системах автомобилей станет экономически оправдано, когда стоимость 1 кг углепластика снизится до 10 \$. При этом за последние десять лет стоимость 1 кг углепластика снизилась на 15 \$.

Углеволокно обладает более высокими показателями прочности и жёсткости, чем стекловолокно, но при этом стоит в среднем в пять раз дороже. Арамидные (органические) волокна могут применяться в тех частях, где требуется износостойкость.

Сравнительные свойства различных армирующих материалов представлены на рис. 12.

Несущая система из углепластика в среднем на 50 % легче, чем аналогичная из стали, и на 30 % легче, чем аналогичная из алюминия. Большой экономии массы можно достичь, если изначально проектировать деталь с учётом особенностей работы композиционных материалов, а не только заменять материал уже существующей металлической детали.

Проанализировав текущий объём и способы применения композиционных материалов, можно сделать следующие выводы.



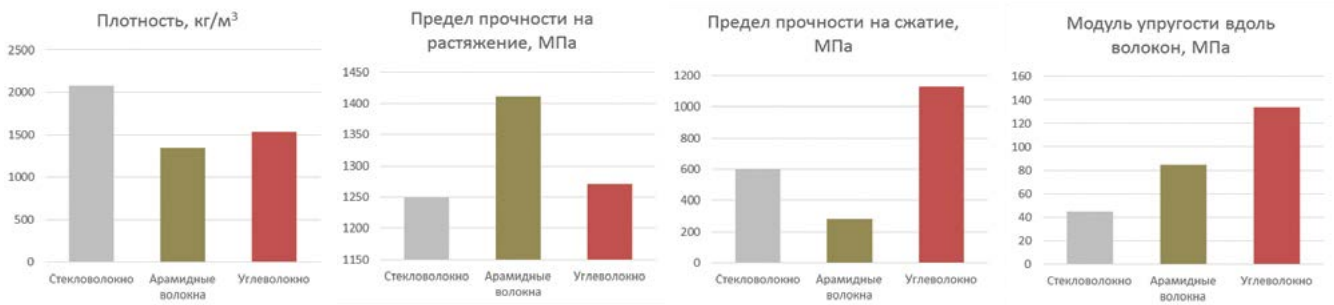


Рисунок 12. Сравнение свойств различных армирующих материалов

Для несущих систем легковых автомобилей наиболее перспективным материалом является углепластик. Стеклопластик, несмотря на свою более низкую стоимость, не обеспечивает достаточных жёсткости и прочности, и переход от стали и алюминия к стеклопластику не является экономически оправданным. Тем не менее он находит применение в конструкции несущих систем автобусов, плавающих автомобилей и кабин грузовиков.

Применение углепластика для несущих систем имеет следующие преимущества:

- повышение прочности;
- повышение жёсткости;
- повышение пассивной безопасности;
- снижение массы несущей системы до 50 %;
- повышение коррозионной стойкости.

Эти преимущества обуславливают применение углепластиков в гоночных, спортивных и электрических автомобилях. При современном уровне развития аккумуляторов для обеспечения достаточного запаса хода электрических автомобилей необходимо снижать массу несущей системы и использовать альтернативные материалы.

Таким образом, основными проблемами, препятствующими распространению несущих систем из композиционных материалов, являются высокая стоимость, сложность и трудоёмкость технологии изготовления, сложность технологии изготовления трёхслойных панелей. Как показал проведённый обзор, стоимость углеволокна имеет тенденцию к снижению, а технология изготовления изделий из него постоянно совершенствуется. В настоящее время разработана технология автоматизированного производства несущих систем из углепластика, позволяющая применять их в серийных автомобилях. Можно ожидать развития технологии автоматизированного изготовления трёхслойных композитных панелей, что позволит в ещё большей степени снизить массу и повысить пассивную безопасность автомобилей. Дальнейшее совершенствование технологии, создание новых связующих, снижение стоимости углево-

локна, а также повышение требований к топливной экономичности и пассивной безопасности приведёт к более широкому использованию несущих систем из композиционных материалов.

В связи с этим актуальным станет вопрос о наличии методики расчёта несущих систем из полимерных композиционных материалов с применением всех доступных современных средств автоматизированного проектирования, таких как метод конечных элементов и имитационное моделирование. Эти методы позволяют учесть макро- и микроанизотропию композиционных материалов, а также смоделировать с приемлемой точностью реологические процессы, порождающие гистерезисные потери и обеспечивающие энергопоглощающие свойства композиционных материалов.

Работа выполнена в рамках договора № 9905/17/07-к-12 между ОАО «КамАЗ» и МГТУ им. Н. Э. Баумана при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Афанасьев Б. А., Даштиев И. З. Проектирование элементов систем автомобиля из композиционных материалов. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007.
2. Niu M. Composite Airframe Structures. — Hong Kong: Conmillit Press Ltd., 1992.
3. Хусаинов А. Ш., Кузьмин А. Ю. Пассивная безопасность автомобиля. — Ульяновск: УЛГТУ, 2011.
4. Вашурин А. С., Орлов А. Н., Тумасов А. В., Сизоненко Д. И. Оценка влияния отдельных конструктивных решений на повышение пассивной безопасности кузовов автобусов из многослойных панелей // Журнал автомобильных инженеров. — 2014. — № 6.
5. Справочник по композиционным материалам: в 2 кн. / пер. с англ. / под ред. Дж. Любина, Б. Э. Геллера. — Кн. 2 / пер.: А. Б. Геллер, Г. Э. Кесслер, А. М. Кнебельман / под ред. Б. Э. Геллера. — М.: Машиностроение, 1988.
6. Malnati P. Faster Cycle, Better Surface: Out of the Autoclave // High-Performance Composites. — 2013. — № 2. — P. 42–45.
7. Birch S. BMW i3, the Inside Story: What It's Made of, How It's Made // Automotive Engineering. — 2014. — № 3.