

УДК 691.175.5/8

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Кочуров Д.В.

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (600000, г. Владимир, ул. Горького, 87),

E-mail: dkochurov95@mail.ru

Аннотация: Данная статья посвящена вопросам изучения высокопрочных полимерных композиционных материалов. Описаны понятие полимерного композиционного материала, виды высокопрочных полимерных композиционных материалов. Также освещены физико-химические основы прочности полимерных композиционных материалов.

В настоящее время для изготовления деталей все чаще применяются материалы, обладающие высокими прочностными свойствами, что обусловлено развитием технологий и необходимостью совершенствования узлов и механизмов различных устройств. Традиционные конструкционные материалы, такие как стали и их сплавы, цветные металлы и их сплавы, способны обеспечить требуемую прочность деталей, однако имеют высокую стоимость и значительную массу. Для устранения этих проблем в промышленности реализуются технологии изготовления деталей из композиционных материалов. Наиболее широко распространены композиционные материалы на полимерной основе, армированные стеклянными, углеродными, борными и органическими волокнами и тканями. Эти материалы, как правило, состоят из двух или более компонентов, обладающих различными физико-химическими свойствами и объединенных в единую макроструктуру. Композиционные материалы имеют высокую прочность в сочетании с низкой плотностью, способны сопротивляться коррозии и химическому воздействию, а также обладают сравнительно невысокой стоимостью.

Ключевые слова: *высокопрочный, полимерный, композиционный, волокно, армированный, адгезия, прочность.*

UDC 691.175.5/8

high-strength polymer composite materials

Kochurov D.V.

Vladimir state university of A.G. and N.G. Stoletovs (600000, Vladimir, Gorky street, 87),

E-mail: dkochurov95@mail.ru

Abstract: This article is devoted to the study of high-strength polymer composite materials. The concept of polymer composite material, types of high-strength polymer composite materials are described. The physical and chemical bases of strength of polymer composite materials are also covered.

Currently, for the manufacture of parts are increasingly used materials with high strength properties, due to the development of technology and the need to improve the components and mechanisms of various devices. Traditional structural materials, such as steels and their alloys, non-ferrous metals and their alloys, are able to provide the required strength of parts, but have a high cost and a significant weight. To eliminate these problems in the industry implemented technology for manufacturing parts from composite materials. The most widely used composite materials based on polymer, reinforced with glass, carbon, boron and organic fibers and fabrics. These materials typically consist of two or more components with different physical and chemical properties and combined into a single macrostructure. Composite materials have high strength in combination with low density, are able to resist corrosion and chemical effects, and have a relatively low cost.

Keywords: *high-strength, polymeric, composite, fiber, reinforced, adhesion, strength.*

В инженерной практике наблюдается тенденция постепенной замены металлов и других традиционных конструкционных материалов полимерными материалами. Однако,

правильный выбор полимерных материалов для каждого конкретного случая затруднен очень сильным различием свойств между традиционными и полимерными материалами. К примеру, такой показатель как коэффициент теплового расширения полимерных материалов в несколько раз превышает аналогичный показатель для других видов материалов. Поэтому для понижения указанного показателя довольно часто используют введение различных наполнителей [2].

Одной из важнейшей целью использования наполнителей является снижение стоимости полимерных композиционных материалов. Именно эта цель в решающей степени определяет большой интерес к наполнителям и наполненным системам, проявляющейся в последнее время. Необходимо отметить, что большое значение имеет также способность различных видов наполнителей придавать новые свойства полимерным материалам по сравнению с ненаполненными материалами [12].

В настоящее время в связи с необходимостью обеспечения новой техники конструкционными материалами в последние десятилетия исследованию физико-механических свойств композиционных материалов уделяют особое внимание. Созданием различных композиционных материалов есть возможность реализовать уникальные прочностные свойства монокристаллических усов, металлических и полимерных волокон с высокими прочностными свойствами. Преимущество любого композиционного материала состоит в том, что им возможно придать необходимые конструктивные свойства, а также есть возможность создать материал с такими показателями, как высокие значения прочности, деформируемости, а также вязкости разрушения. Надежность работы конструкции зависит в первую очередь от запаса прочности конструкционного материала, а также от такой характеристики, как вязкость разрушения, т.е. способность материала препятствовать распространению трещины [1].

Развитие современной промышленности композиционных материалов предполагает внедрение и применение новых конструкционных материалов, обладающих высокой прочностью, водостойкостью и химической стойкостью в сочетании с невысокой стоимостью. Все эти требования возможно выполнить, если применять композиционные материалы, способные работать в агрессивных средах, а также обладающие невысокой массой и высокими прочностными свойствами [26].

Под композиционными материалами подразумевают многокомпонентные материалы, которые состоят из металлической, полимерной, керамической, углеродной или другой основы (т.н. матрицы), армированной наполнителями из нитевидных кристаллов, волокон, тонкодисперсных частиц и другие. Все композиционные материалы по структуре наполнителя подразделяют на волокнистые (армированы волокнами и нитевидными

кристаллами), слоистые (армированы пластинками, пленками, слоистыми наполнителями), дисперсноармированные или дисперсноупрочненные (с наполнителем в виде тонкодисперсных частиц). В композиционном материале матрица обеспечивает монолитность материала, передачу и распределение напряжения в наполнителе, определяет тепло-, огне-, влаго- и химическую стойкость. Все композиционные материалы по природе материала матрицы различают полимерные, металлические, керамические, углеродные и другие композиционные материалы [29].

Композиционным материалом называют искусственно созданный неоднородный сплошной материал, который состоит из двух или более компонентов с достаточно четкой границей раздела между компонентами. Основным классом материалов, которые удовлетворяют довольно жестким, часто противоречивым друг другу требованиям, а именно обеспечению минимальной массы конструкций, максимальной прочности, надежности, жесткости, долговечности при работе в довольно тяжелых условиях нагружения, при высоких температурах и в агрессивных средах являются полимерные композиционные материалы. В основном полимерные композиционные материалы применяются в авиации в качестве высоконагруженных деталей самолетов и двигателей, в космической технике в качестве узлов силовых конструкций аппаратов, в горной промышленности, в автомобилестроении, в гражданском строительстве и в других областях народного хозяйства [21].

Композиционный материал представляет собой комбинацию из разнородных и нерастворимых друг в друге компонентов, соединяемых между собой в единое целое за счет адгезионного взаимодействия на границе их раздела. Все многообразие композиционных материалов в зависимости от типа матрицы можно разделить на четыре основные группы: полимерные (ПКМ), металлические (МКМ), углерод-углеродные (УУКМ) и керамические (ККМ). В настоящее время наиболее прочными и хорошо освоенными являются композиционные материалы, которые армированы непрерывными стеклянными, углеродными, арамидными, борными и металлическими волокнами [20].

Использование композиционных материалов вместо традиционных материалов позволяет существенно уменьшить вес продукта, при этом не изменяя прочностные характеристики данного материала, что особенно важно для авиационной и аэрокосмической промышленности. В большинстве случаев полимерные материалы очень часто не обладают достаточной жесткостью и прочностью, чтобы обеспечить требования, которые предъявляются к конструкциям. Введение самых разнообразных усиливающих наполнителей является наиболее традиционным способом улучшения свойств композиционных

материалов, достаточных для того, чтобы композиционные полимерные материалы можно было использовать в качестве конструкционных материалов [6].

Полимерные композиционные материалы обладают очень ценным комплексом технических свойств, наиболее важными из которых являются низкая плотность и связанные с этим высокая удельная прочность и удельная жесткость материалов, возможность эксплуатации в достаточно широком температурном диапазоне и в условиях действия знакопеременных нагрузок, коррозионной стойкостью и способностью выдерживать довольно длительные статические и динамические нагрузки, повышенной влажности и т.д.

В настоящее время наиболее перспективным для использования в качестве конструкционных материалов являются полимерные композиционные материалы на основе высокопрочных органических (арамидных) и углеродных волокнистых наполнителей с полимерной матрицей, т.н. органопластики и углепластики. Самым перспективным направлением использования арамидных и современных углеродных материалов является направление, которое связано с созданием очень легких и высокопрочных композиционных материалов для использования их в различных областях авиационно-космической и других видов техники [3].

Однако полимерные композиционные материалы обладают рядом недостатков. Как известно, для изготовления различных деталей (изделий) из полимерных композиционных материалов применяют различные методы, такие как экструзия, намотка, прессование и другие виды технологий, которые позволяют получать необходимый контур и профиль детали (изделия), однако в большинстве случаев для получения готовой детали необходимо использовать механическую обработку. При этом возникают трудности, которые связаны со спецификой свойств самих полимерных композиционных материалов: к примеру, деструкция полимерного связующего (матрицы) и появление в процессе механической обработки различных твердых структур, которые оказывают самое негативное влияние на состояние режущей кромки обрабатываемого инструмента; высокая твердость наполнителя; слоистая структура и т.п. Все вышеперечисленные факторы вызывают интенсивный износ режущего инструмента и приводит к неудовлетворительному качеству обработанной поверхности изделий [23].

Под армированными пластмассами подразумевают полимерные композиционные материалы, которые состоят из ориентированных бесконечно длинных, непрерывных волокон, соединенных клеящей средой – т.н. полимерной матрицей. Идея создания таких материалов заключается в том, чтобы использовать высокие упругопрочностные свойства волокон в полимерных конструкционных материалах. Данный принцип реализуется в природных конструкциях, к примеру в растениях и костях животных, которые представляют

собой анизотропные материалы, свойства которых соответствуют напряжениям, которые возникают в тех или иных направлениях [18].

В настоящее время наибольшее распространение из армированных пластмасс получили стекло- и углепластики. Неоднократные попытки внедрить для армирования различных конструкционных материалов очень легкое высокопрочное высокомодульное полиэтиленовое (ВВПЭ) волокно из сверхвысокомолекулярного полиэтилена не обвенчались успехом, поскольку полученный полиэтиленпластик (ПЭП) отличался очень низкими физико-механическими свойствами, что определялось очень плохой адгезией ВВПЭ-волокна к смоляным матрицам, а также низкой устойчивостью при сжатии и низким сопротивлением ползучести. Существуют два подхода для преодоления недостатков ВВПЭ-волокна в качестве армирующего материала для упрочнения композиционных материалов различного конструкционного назначения. Также были изучены возможности совместного применения ВВПЭ и стеклянных или углеродных волокон в одном полимерном композиционном материале. В полученных таким образом гибридных полимерных композиционных материалах каждое из данных волокон вносит свой положительный вклад в прочностные характеристики композиционного материала. Стеклянные и углеродные волокна придают полимерным композиционным материалам достаточную жесткость и устойчивость при сжатии, а также ВВПЭ-волокна делают композиционный материал более эластичным и предотвращают отделение осколков и фрагментов при хрупком разрушении материала [17].

В 70-х годах XX века появились первые материалы, которые были армированы нитевидными монокристаллами (т.н. «усами»). Такие нитевидные кристаллы получают, в основном, протягиванием расплава через отверстия в фильерах. Современной промышленностью используются «усы» оксида алюминия, карбидов бора и кремния, оксида бериллия, нитридов алюминия и кремния и т.д. с длиной около 0,3–15 мм и диаметром около 1–30 мкм. Армирование «усами» позволяет значительно повысить прочность композиционного материала и повысить его жаростойкие свойства. Армирование «усами» оксида алюминия композиционных материалов на основе молибдена и вольфрама почти вдвое повысило их прочность при температуре около 1650 °С, что позволяет использовать данные материалы при изготовлении различных изделий [28].

Полимерные композиционные материалы представляют собой искусственно созданные неоднородные сплошные материалы, состоящие из двух и более компонентов с четкой границей между ними. Композит состоит из матрицы (смола, полимер, керамика) и армирующего материала. Материал матрицы окружает и фиксирует армирующий материал, придает изделию форму. Армирующее вещество передает свои механические и физические свойства изделию, таким образом усиливает свойства матрицы [32].

Высокопрочные композиционные полимерные материалы (ВКПМ) представляют собой материалы на основе полимерного связующего с заданным распределением в нем армирующих элементов. Доля резьбовых соединений в деталях из ВКПМ составляет около 40% [19].

Спецификой создания конструкции из полимерных композиционных материалов следует назвать одновременное проектирование конструкций из полимерных композиционных материалов и материала для нее, т.е. определение геометрии элементов, структуры материала и способов изготовления конструкции. Основная особенность полимерных композиционных материалов – это возможность создания из них материалов и элементов конструкций с заданными свойствами, наиболее полно удовлетворяющими характеру и условиям работы изделий [7].

Конечные свойства полимерных композиционных материалов зависят от многих факторов, основными из которых являются использование исходных материалов и технологические процессы их изготовления. Укрупненно их можно разделить на два вида - разброс свойств исходных материалов в диапазоне, указанном в нормативной документации, влияет в первую очередь на характеристики полуфабриката-связующего или препрега [27].

В настоящее время все шире используются высокопрочные композиционные материалы благодаря высокой прочности и жесткости полимерных материалов. При этом широко применяемые полиолефины имеют плохую адгезию с поверхностью волокнистого наполнителя. Это обусловлено трудностью совмещения гидрофильной поверхности наполнителя с неполярной или слабополярной полимерной матрицей. Как правило, адгезионные характеристики являются одними из важнейших показателей для получения высокопрочных композиционных материалов. Таким образом, актуальной задачей полимерной технологии является улучшение уровня адгезионного взаимодействия на границе раздела фаз «полимер – волокно» и определение способов ее регулирования [11].

Композиционные материалы типа стекловолоконитов, карбоволоконитов, бороволоконитов, органоволоконитов, а также углепластики, полученные путем синтеза различных соединений, также имеют ряд преимуществ перед остальными материалами: минимальный вес при высокой прочности материала; относительно простое изготовление деталей сложной формы; превосходные декоративные качества поверхности деталей, позволяющие отказаться от покраски (для карбона). Однако процесс изготовления композитных изделий из них очень трудоемок, длителен и дорог, наиболее весомым недостатком является невозможность восстановления изделий после деформации. Все это способствует тому, что массово изделия из композиционных материалов практически не выпускаются [8].

Проблема целенаправленного повышения износостойкости и понижения коэффициента трения полимерных композиционных материалов в паре трения со сталью остается на сегодняшний день актуальной задачей в полимерной трибологии. Одним из основных перспективных способов создания триботехнических материалов является армирование полимерных материалов волокнистыми наполнителями. Полимерные композиционные материалы с содержанием углеродных, борных, базальтовых, металлических волокон обладают высокой работоспособностью в узлах трения без смазки благодаря прочности, жесткости и химической стойкости волокон. При этом использование полимерных композиционных материалов обеспечивает надежность и долговечность узлов, удешевление эксплуатации и ремонта транспортных средств [11].

Один из важнейших вопросов трибологии, решение которого позволит прогнозировать физико-механические характеристики создаваемых материалов и вплотную подойти к проблеме создания композитов с заданными свойствами, - определение величины адгезионного взаимодействия на границе раздела компонент в композиционном материале. Высокие физико-механические и трибологические характеристики полимерных композитов определяются не только характеристиками компонентов, входящих в этот композиционный материал, но и величиной и стабильностью адгезионного взаимодействия на границе раздела матрица - наполнитель. Фундаментальные исследования адгезионного взаимодействия на границе раздела конденсированных сред послужили научной основой для разработки нового класса антифрикционных самосмазывающихся композиционных полимерных материалов, предназначенных для использования в тяжелонагруженных узлах трения. Оценка адгезионного взаимодействия на межфазной границе, изучение природы сил молекулярного сцепления контактирующих поверхностей, расчет величины этой силы и определение способов ее регулирования дают возможность сформулировать общие подходы к направленному подбору компонент в композите и обеспечить максимальную реализацию их свойств [14].

Одной из важнейших задач в машиностроении является снижение коэффициента трения в узлах и механизмах. Прогрессивный метод улучшения триботехнических свойств поверхностей трения – это нанесение на них различных типов износостойких покрытий. Одним из таких покрытий являются полимерные композиты. Антифрикционные полимерные композиционные покрытия применяются при высоких нагрузках в авиакосмической технике, автомобилестроении и других областях (до 250 МПа). Материал работает в условиях самосмазывания, при коэффициенте трения f до 0,025, имеет высокие ресурсы до 10^9 циклов [15].

Одним из путей повышения механических характеристик полимера является его дисперсное упрочнение, однако использование дисперсных наполнителей не всегда позволяет добиваться необходимого сочетания физико-механических, трибологических и теплофизических свойств получаемых полимерных композиционных материалов. Использование в качестве наполнителей армирующих элементов является перспективным способом улучшения механических характеристик полимеров [9].

В связи с повышением требований к эффективности современной машиностроительной, ракетно-космической и авиационной техники, по весовым, температурным и прочностным характеристикам, разрабатываются и внедряются новые конструкционные и теплозащитные материалы. Научно-технический интерес представляют композиционные материалы (КМ) на основе углерода, углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) и изделия из них, особенно в области высоких температур [4].

Углеродные наноматериалы, такие как углеродные нановолокна, являются одними из наиболее перспективных материалов для различных применений, а именно для использования в производстве дисплеев, сенсоров, углерод-литиевых батарей для сотовых телефонов и компьютеров, стартовых конденсаторов для электроники, биоматериалов, а также сорбционных материалов и систем хранения водорода. Наиболее актуальным применением данных наноматериалов является их использование при создании конструкционных и функциональных композиционных материалов различного назначения, а также высокопрочных и высокомодульных углеродных комплексных нитей. Основная проблема их использования на макроскопическом уровне заключается в их ограниченной длине [25].

В аэрокосмической техники достаточно широко применяют композиционные полимерные материалы, армированные различными наполнителями. В качестве таких композиционных материалов используют полиэфирэфиркетоны, в частности, графелоны, состоящие из полиэфирэфиркетонов с армирующим наполнителем в виде измельченного волокна углеродной графитизированной ткани. Графелоны относят к антифрикционным композиционным материалам на основе термопластичных полимеров и могут использоваться при изготовлении высоконапряженных узлов трения и механизмов [5].

Известно, что качество готового полимерного композиционного материала зависит от качества соединения армирующего волокна с полимерным наполнителем, которое определяется их адгезионным взаимодействием. Межфазное адгезионное взаимодействие зависит от возникновения следующих факторов:

- химических ионных или межатомных связей между компонентами;
- межмолекулярных (водородных, ван-дер-ваальсовых) связей;

- фрикционного взаимодействия поверхностей.

Одним из важнейших показателей качества полимерного композиционного материала является прочность контакта армирующего волокна с полимерной матрицей, зависит от множества различных факторов. Самой важной задачей при создании полимерного композиционного материала является обеспечение равномерной и полной передачи внешней нагрузки армирующим волокнам от полимерной матрицы, служащая также в качестве защиты армирующего волокна от любых внешних воздействий на композиционный материал [13].

В производстве полимерных композиционных материалов часто возникает вопрос о возможности прогнозирования прочностных характеристик композиционных материалов не только на конечной стадии технологического процесса, но и в условиях эксплуатации, т.е. возникает вопрос о возможности расчета длительной прочности композиционных материалов уже на стадии изготовления. Прогнозирование изменения физических свойств композиционных материалов во времени возможно при использовании математических моделей, которые описывают как процесс изготовления, так и процесс эксплуатации полимерного композиционного материала [22].

Механическая прочность любого полимерного композиционного материала во многом определяется его структурными характеристиками и особенностями. В настоящее время до сих пор остаются малоизученными вопросы, связанные с зависимостью прочности от объемного содержания матрицы и наполнителя, величины и вида пористости в материале, адгезионных свойств матрицы к наполнителю и типа самой матрицы, размера частиц или зерен наполнителя. Решение данной проблемы тормозится и тем обстоятельством, что до сих пор точно неизвестны механизмы разрушения многокомпонентных полимерных композиционных материалов [16].

Для того чтобы полимерный композиционный материал смог воспринять нагрузку наиболее полно всеми составляющими его компонентами, структура должна отвечать определенным требованиям. Во-первых, в композиционном материале должна быть достаточная объемная доля армированных волокон определенной критической длины. Во-вторых, создание в материале необходимых прочных связей высокопрочных волокон с пластичной матрицей. В-третьих, наличие дискретных волокон будет в значительной степени нагружены и есть возможность определять прочность композиции лишь в том случае, когда отношение длины частиц к их толщине становится большим некоторой определенной величины. В-четвёртых, волокна композиции должны быть строго ориентированы вдоль оси деформации, поскольку от этого в сильной степени зависит прочность полимерного композиционного материала. Разориентация волокон более чем на

10-15° значительно уменьшает прочность материала, оказывает влияние на механизм передачи нагрузки от матрицы к волокну и на вид разрушения полимерного материала [30].

У полимерного композиционного материала между волокном и связующим образуются пограничные слои, которые обеспечивают более высокие физические и химические связи, и одновременно обеспечивается равномерное перераспределение напряжений между волокнами, предотвращая растрескивание волокон и матрицы при высокой нагрузке. Но слишком высокая прочность сцепления может привести к концентрации напряжений на границе раздела и уменьшению вязкости разрушения углеродного волокна, так как оно является хрупким и чувствительным материалом к поверхностным повреждениям. Следовательно, лучший способ повысить сцепление между волокном и матрицей - получить аппарат высокой прочности и высокой вязкости [31].

При упрочнении конструкционных и производстве разных композиционных материалов применяют плотноупакованное состояние. В первом случае добиваются увеличения механических свойств, а при производстве композиционных материалов плотноупакованное состояние выполняет роль связующего поверхностно активного слоя. Плотноупакованное состояние является по существу пятым агрегатным состоянием вещества и реализуется в естественных и искусственных условиях [10].

Современные дисперсно-упрочненные композиционные материалы с полимерной матрицей находят широкое применение при изготовлении и ремонте широкого спектра узлов и деталей автомобилей, включая и сам кузов. Применение композиционных материалов позволяет значительно улучшить их весовые характеристики, от которых напрямую зависят практически все технико-эксплуатационные показатели транспортного средства, включая такие важнейшие, как тягово-скоростные, топливно-экономические, устойчивость, управляемость и др. Помимо этого, улучшается эстетичность экстерьера и интерьера [24].

Таким образом, в последнее время большое внимание уделяется широкому использованию композиционных материалов, обладающих в отличие от жаропрочных сталей и сплавов специфичными уникальными свойствами. Характерным для многих стран является то обстоятельство, что, несмотря на стремительные темпы роста исследований и производства углеродных материалов, дисбаланс производства и применения этих материалов не уменьшается. Например, производство композитов в США с 2000-2013 увеличилось на 35-40% в год.

Следует отметить, что, несмотря на очевидные преимущества полимерных композиционных материалов, их внедрение ведется еще недостаточно интенсивно. Определенными препятствиями являются необходимость развития новых производственных мощностей, совершенствование технологии изготовления и недостаточно глубокая

подготовка инженерно-технических работников в области теории механики композитных материалов. Эти препятствия являются причиной того, что если в авиационно-космической технике, судостроении достигнуты неплохие результаты по созданию изделий из композитных материалов, обладающих высоким массовым совершенством, то в других отраслях техники известные технологии изготовления силовых и корпусных элементов из композитов используются еще недостаточно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдумамонов, А. Влияние структуры на прочность композиционного материала [Текст] / А. Абдумамонов, Р.М. Валиев, С.Н. Каримов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2010. – №7. Том №53. – С. 511-515.
2. Айгубова, А.Ч. Тепловое расширение нанокompозитов фенилон/углеродные нанотрубки [Текст] / А.Ч. Айгубова, Г.В. Козлов, Г.М. Магомедов, Г.Е. Заиков // Вестник технологического университета. – 2015. – №16. Том №18. – С. 137-140.
3. Антипов, Ю.В. Полимерные композиционные материалы. Технологии и применение [Текст] / Ю.В. Антипов, А.А. Кульков, Н.В. Пименов // Высокомолекулярные соединения. – 2016. – №1. Том №58. Серия С. – С. 29-41.
4. Бакулин, А.А. Проблемы прочности соединения деталей элементами из композиционных материалов [Текст] / А.А. Бакулин, М.Н. Захаров, Е.В. Квитка, М.А. Любченко, И.В. Магнитский, К.А. Пономарев // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2016. – №3. – С. 1-11.
5. Белов, А.В. Исследование коэффициента трения и износостойкости графелона [Текст] / А.В. Белов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2017. – Том №1. – С. 225-227.
6. Брусенцева, Т.А. Композиционные материалы на основе эпоксидной смолы и наночастиц [Текст] / Т.А. Брусенцева, А.А. Филиппов, В.М. Фомин // Известия Алтайского государственного университета. – 2014. – №1-1 (81). – С. 25-27.
7. Веселова, А.В. Разработка высокоточных конструкций из полимерных материалов [Текст] / А.В. Веселова, А.В. Веселов // Интерактивная наука. – 2017. – №2 (12). – С. 159-160.
8. Гаврилова, В.Г. Анализ возможности применения различных материалов для изготовления деталей кузовов в практике автомобилестроения [Текст] / В.Г. Гаврилова, М.В. Помазков, Н.Е. Караваева // Вестник Приазовского государственного технического университета. – 2015. – №31. – С. 42-50.

9. Гоголева, О.В. Разработка высокопрочных композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и базальтового волокна [Текст] / О.В. Гоголева // Международная научно-техническая конференция «Полимерные композиты и трибология» (ПОЛИКОМТРИБ-2015) 23-26 июня 2015 г. Тезисы докладов международной научно-технической конференции: сборник тезисов докладов / В.Н. Адери́ха [и др.] - Гомель: ИММС НАНБ, 2015. – С. 126.

10. Гречихин, Л.И. Плотнупакованное состояние и его роль в упрочнении конструкционных материалов [Текст] / Л.И. Гречихин, Э.Д. Подлозный // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2013. – №1, 2 (46). – С. 79-89.

11. Данилова, С.Н. Износостойкие полимерные композиционные материалы с улучшенным межфазовым взаимодействием в системе «полимер-волокно» [Текст] / С.Н. Данилова, А.А. Охлопкова, А.А. Гаврильева, Т.А. Охлопкова, Р.В. Борисова, А.А. Дьяконов // Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова. – 2016. – №5 (55). – С. 80-92.

12. Ершова, О.В. Изучение влияния состава неорганического наполнителя на физико-химические свойства полимерного композиционного материала [Текст] / О.В. Ершова, Э.Р. Муллина, Л.В. Чупрова, О.А. Мишурина, Л.А. Бодьян // Фундаментальные исследования. – 2014. – №12. – С. 487-491.

13. Ибатуллина, А.Р. Обзор современных методов регулирования свойств композиционных материалов (КМ) на основе терморезистивных наполнителей армированных высокопрочными высокомодульными волокнами [Текст] / А.Р. Ибатуллина, Е.А. Сергеева // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – №9. Том №16. – С. 123-126.

14. Колесников, В.И. Влияние адгезионного сцепления на границе раздела компонент на фрикционные характеристики полимерных композитов [Текст] / В.И. Колесников, Н.А. Мясникова, Ю.Ф. Мигаль, А.И. Буря, Ф.В. Мясников, О.П. Чигвинцева // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – №4. – С. 10-14.

15. Кохановский, В.А. Матричный материал для антифрикционного полимерного композита [Текст] / В.А. Кохановский, И.В. Больших // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – №5. – С. 33-37.

16. Крюков, С.А. Прогнозирование и определение механической прочности абразивных композиционных материалов [Текст] / С.А. Крюков, А.В. Славин, Н.В. Байдакова // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – №13. – С. 56-58.

17. Кудинов, В.В. Гибридные полимерные композиционные материалы [Текст] / В.В. Кудинов, Н.В. Корнеева, И.К. Крылов, В.И. Мамонов, М.В. Геров // Физика и химия обработки материалов. – 2008. – №2. – С. 32-37.

18. Куперман, А.М. Высокопрочные армированные пластики [Текст] / А.М. Куперман, Ю.А. Горбаткина, Р.А. Турусов // Химическая физика. – 2012. – №8. Том №31. – С. 50-59.

19. Лебедев, П.В. Технологическое обеспечение качества резьбовых соединений в деталях из высокопрочных композиционных полимерных материалов [Текст] / П.В. Лебедев // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: автореферат диссертации / А.М. Марков [и др.] - Барнаул: ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет имени И. И. Ползунова», 2011. – 16 с.

20. Макаров, В.Ф. Исследование проблем механической обработки современных высокопрочных композиционных материалов, используемых для производства деталей авиационной и ракетно-космической техники [Текст] / В.Ф. Макаров, А.Е. Мешкас, В.В. Ширинкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2015. – №2. Том №17. – С. 30-41.

21. Минязова, А.Н. Определение прочности композиционных материалов [Текст] / А.Е. Минязова, И.В. Красина, С.В. Илюшина, М.Д. Валиева // Вестник технологического университета. – 2017. – №24. Том №20. – С. 87-88.

22. Обливин, А.Н. Длительная прочность композиционных материалов [Текст] / А.Н. Обливин, М.В. Лопатников // Лесной вестник. – 2012. – №7. – С. 19-24.

23. Орлова, Е.Е. Проблемы резания высокопрочных композитов [Текст] / Е.Е. Орлова, Г.В. Гурулева // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – №2. – С. 17-20.

24. Осипов, Н.Л. К вопросу о прочности полимерных композитов, применяемых в автомобилестроении [Текст] / Н.Л. Осипов, В.А. Пирожков, И.С. Чабунин // Известия Московского государственного технического университета «МАМИ». – 2014. – №2 (20). Том №1. – С. 45-47.

25. Пат. 2393276 Российская Федерация, МПК D01F 9/127, B82B 3/00, C01B 31/02. Способ изготовления длинных ориентированных жгутов углеродных нановолокон [Текст] / В.З. Мордкович, А.Р. Караева, С.В. Заглядова, И.А. Маслов, А.К. Дон; патентообладатель ООО «Объединенный центр исследований и разработок». - № 2009107858/04; заявл. 05.03.2009; опубл. 27.06.2010, Бюл. № 18. – 16 с.: ил.

26. Рычков, Д.А. Совершенствование технологии формообразования высокопрочных стекловолоконистых композиционных материалов на полимерной основе

[Текст] / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, В.В. Базаркина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – №3 (56). – С. 150-153.

27. Сатдинов, Р.А. Анализ температурно-временных параметров режимов отверждения ПКМ с заданными характеристиками [Текст] / Р.А. Сатдинов, С.Е. Истягин, Е.А. Вешкин // Труды ВИАМ. – 2017. – №3 (51). – С. 85-94.

28. Судаков, А.И. Перспективы применения композиционных материалов в ракетостроении [Текст] / А.И. Судаков, В.В. Геращенко, А.С. Тимохович // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2016. – №12. Том №1. – С. 173-174.

29. Сырбаева, Ш.Ж. Особенности применения физических методов контроля качества полимерных композиционных материалов [Текст] / Ш.Ж. Сырбаева, Г.Д. Богенбаева, Л.К. Баймукашев, Н.А. Гайнеденов, Ж.К. Салыкбаева, С.А. Утешова // Успехи современной науки. – 2017. – №12. Том №1. – С. 18-23.

30. Тялина, Л.Н. Новые композиционные материалы [Текст]. В 3 т. Т. 2. Технология переработки пластических масс / Л.Н. Тялина, А.М. Минаев, В.А. Пручкин; под ред. Подкаура А.М. и В.А. Федорова – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011 – 80 с.: ил. – ISBN 978-5-8265-0988-3. – 100 экз.

31. Цуй, С. Анализ состояния поверхности высокопрочных композиционных материалов с углеродным волокном и исследование их механических характеристик [Текст] / С. Цуй, Р.И. Гусева, Л. Вэй, Ч. Линюни, Г. Юй // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2011. – № IV-1 (8). – С. 4-8.

32. Цыгвинцев, И.В. Применение композитных материалов в строительстве [Текст] / И.В. Цыгвинцев, П.И. Постникова, И.В. Сенцов // Международный научный журнал «Инновационное развитие». – 2017. – №7 (12). – С. 26-29.