

УДК 532.13

РАЗРАБОТКА КОРПУСА МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

К. В. НАЙГЕРТ¹, В. А. ЦЕЛИЩЕВ²

¹ kathy_naigert@mail.ru, ² pgl.ugatu@mail.ru

¹ ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)» (ЮУрГУ НИУ)

² ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 05.09.2018

Аннотация. Специфика рабочего процесса магнитоэологических систем требует изготовления ряда элементов их конструкций из немагнитных и хорошо проводящих электромагнитные поля материалов, что делает не допустимым использование металлов. При этом условия эксплуатации магнитоэологических устройств сопряжено с резкими перепадами давлений и температур, это вызывает необходимость поиска материалов, способных выдерживать интенсивные нагрузки. В статье рассмотрены вопросы практической реализации полученных ранее научных результатов применения композитного корпуса для магнитоэологического демпфирующего устройства. Так как существующие композитные материалы не применимы во многих магнитоэологических устройствах, данная исследовательская работа предлагает решение проблемы и описывает оригинальную конструкцию многослойного полимерного композитного корпуса для магнитоэологического демпфирующего устройства и технологию его изготовления.

Ключевые слова: магнитоэологические устройства; композитные материалы; гидравлические системы специального назначения; конструкционные материалы; корпуса магнитоэологических демпфирующих устройств.

ВВЕДЕНИЕ

Становление новых направлений в машиностроении нуждается в совершенствовании технологических процессов и создании новых материалов. Огромное количество достижений фундаментальных исследований смогли быть применены только в последние десятилетия, когда появились материалы, отвечающие своими физическими свойствами предъявляемым требованиям, и технологии, позволяющие изготовить их. Одними из таких материалов, дающих возможность создавать инновационные системы и устройства, являются композитные материалы.

Демпфирующие магнитоэологические устройства не позволяют производить про-

извольную компоновку электромагнитных блоков управления, что является следствием экранирующего эффекта металлических элементов. Применение многих полимерных композитов для корпусов магнитоэологических устройств невозможно в связи с их низкой прочностью под действием интенсивных динамических нагрузок. Существующий уровень развития данных направлений техники приведен в работах [1–11].

Предъявляемые к магнитоэологическим системам требования во многом совпадают с требованиями для гидравлических систем, но отличаются более высокой скоростью отклика системы на сигнал управления, меньшими значениями перемещения

исполнительных элементов и магнитопроводящими и магнитоэкранирующими свойствами определенных элементов конструкций [5–17].

АКТУАЛЬНОСТЬ

Использование металлов для изготовления деталей, на которые устанавливаются или в которые интегрируются блоки электромагнитного управления магнитореологических систем, невозможно, что связано с замыканием магнитных потоков на металлическом элементе и возникновением эффекта экранирования при очевидной необходимости реализации проведения управляющих электромагнитных полей материалами.

Очевидно, что развитие авиационных систем требует снижения массогабаритных характеристик приводов, что можно достичь за счет использования композитов в новых видах магнитореологических устройств. Композитные материалы обладают меньшей массой в сравнении с высокопрочными сплавами, при этом имея равнозначные или более высокие прочностные характеристики.

Поэтому создание магнитореологических устройств требует развития технологий изготовления элементов из принципиально новых конструкционных материалов. При этом необходимо обеспечить достаточную прочность конструкции к динамическим нагрузкам. Особенно актуальна эта проблема при проектировании корпусов магнитореологических опор [5–10, 17].

ЗАДАЧА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ

Разработка высокопрочных композитных корпусов для магнитореологических устройств, обладающих требуемыми свойствами магнитопроводимости, позволяющих упростить компоновку изделий и процесс изготовления поверхностей композитных элементов с низкой шероховатостью, является научно-прикладной задачей.

Статья служит практической реализацией полученных ранее научных результатов, опубликованных в работах [12–17], и рассматривает способ производства элементов

конструкций разработанных и запатентованных устройств.

КОНСТРУКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ

Высокая прочность конструкции к динамическим нагрузкам легко достигается применением композитных материалов и армированием конструкций арамидными (кевларовыми) и углеродными (карбоновыми) волокнами, но механическая обработка композитного материала существенно снижает его прочность. Рациональным решением являются корпуса, изготовленные с композитными вставками, обладающие высокой прочностью, существенно меньшей массой готового изделия, коррозионной стойкостью, магнитопроводностью и электроизоляционными свойствами.

Арамидные волокна являются длинными цепочками синтетического полиамида, содержащими около 85% амидных связей, образованными с двумя ароматическими кольцами. Подобные арамидные связи обладают высокой энергией диссоциации, а арамидные кольца – хорошей термостабильностью.

Принято выделять три типа арамидных волокон:

- Пара-арамида (п-арамида). Пара-арамида волокна равны по прочности стали, но в пять раз легче стали, имеют температуру стеклования около 370°C и практически не горят, не плавятся, температура начала карбонизации около 425°C. К негативным свойствам пара-арамида можно отнести фоторазложение;

- Мета-арамида (м-арамида). Мета-арамида карбонизируются при температурах выше 400°C и выдерживают короткое воздействие температур до 700°C;

- Сополимеры полиамида. Механические прочностные характеристики полиамид-имида (РАИ) при температуре 250°C в течение 500 ч уменьшаются не более чем на 33%, данный сополимер не горит, не плавится, а лишь медленно карбонизируется. В отличие от пара- и мета-арамида обладает более низкой теплопроводностью (в 4 раза меньше).

Углеродные волокна – тонкие нити диаметром от 5 до 15 мкм, образованные параллельными друг другу атомами углерода и объединенными в кристаллы. Именно выравнивание кристаллов определяет высокую прочность углеродного волокна на растяжение. Им присуща высокая термостойкость до 1600–2000°C в отсутствие кислорода. Изготовленные из углеродного волокна композиты обладают высокой абляционной стойкостью, устойчивостью к агрессивным химическим средам, но окисляются при нагревании в присутствии кислорода, поэтому в атмосфере температура окисления 300–370°C. Для углеродных волокон свойственна высокая сила натяжения, прочность порядка 0,5–1 ГПа, модуль 20–70 ГПа, при ориентационной вытяжке прочность 2,5–3,5 ГПа, модуль упругости 200–450 ГПа. Также низкий удельный вес, обусловленный низкой плотностью 1,7–1,9 г/см³, по удельному значению (отношение прочности и модуля упругости к плотности), углеродные волокна отличаются механическими свойствами, превосходящими все известные жаростойкие волокнистые материалы. Углеродное волокно обладает небольшим коэффициентом температурного расширения и химической инертностью.

Но удельная прочность углеродного волокна уступает удельной прочности арамидных волокон. Поэтому рационально изготовление каркаса композитного вкладыша из арамидного волокна.

Для изготовления композитного вкладыша были выбраны следующие материалы, отвечающие прочностным характеристикам и подходящие для изготовления текстильной заготовки [18–21].

Материал 1 К карбоновое волокно:

- Предел прочности 3800 МПа;
- Удельное сопротивление

$1,6 \cdot 10^{-3}$ Ом·см;

- Линейная плотность 0,067 г/м;
- Плотность 1,78 г/см³.

Материал арамидное волокно (кевлар 29–129):

- Предел прочности 20,92 сN/tex;

- Плотность 1,667 г/см³;
- Относительное удлинение при разрыве 3,55 %;
- Температура стеклования 345°C.

В качестве связующего компаунда использована полиэфирная смола с отвердителем, так как данный компаунд обладает хорошей адгезией к полимерным и металлическим поверхностям, а также прочностью на изгиб. Поэтому изготовленный с использованием полиэфирной смолы композитный вкладыш выдерживает динамические нагрузки значительно лучше, чем композит с компаундом на эпоксидной основе. Возможно выполнение арамидного каркаса из цельного волокна как цилиндрической формы, так и в форме гильзы (рис. 1) для повышения прочности, арамидный каркас армируется цельным углеродным волокном. Принимая во внимание сложности, связанные с обработкой композитных материалов после консолидации полиэфирного компаунда и ослабления структуры композита, вследствие появления внутренних напряжений, возникающих в процессе механической обработки, целесообразно выполнять корпуса с композитными вкладышами (рис. 2). Это позволяет легко осуществлять прецизионную обработку поверхностей корпуса без снижения его прочности.

Для корпусов сосудов высокого давления оптимальным будет изготовление цельного композитного вкладыша из арамидного волокна и дополнительное армирование его углеродным волокном. Арамидный каркас композитного вкладыша изготавливается из цельного волокна, начало которого располагается в центре основания гильзы. Арамидное волокно по плоской спирали сплетается в окружность нужного диаметра, скрепляя витки между собой при помощи петель, образованных из волокна, после чего по длине полученной окружности формируется цилиндрическая стенка, за счет соединения между собой рядов петель конец волокна закрепляется на верхнем кольцевом основании цилиндрической стенки.



Рис. 1. Композитный вкладыш

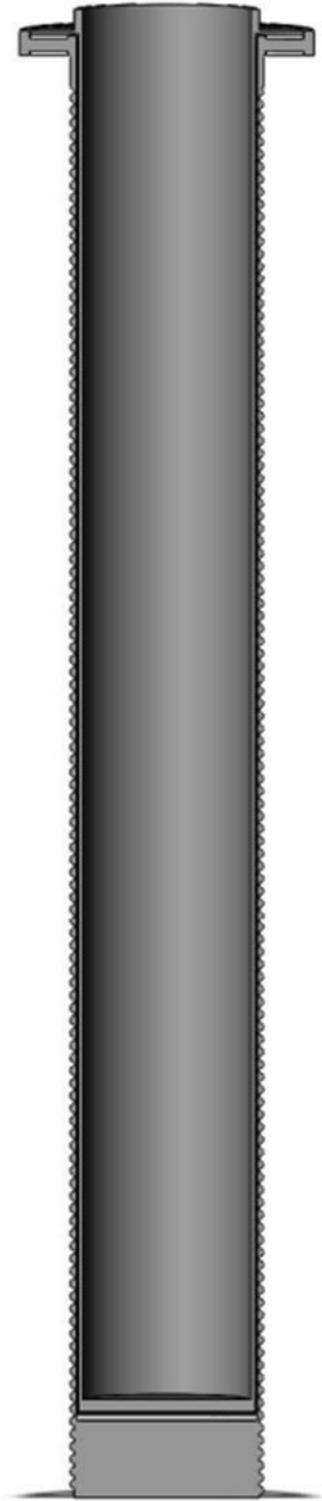


Рис. 2. Корпус магнито-реологического демпфера с композитным вкладышем

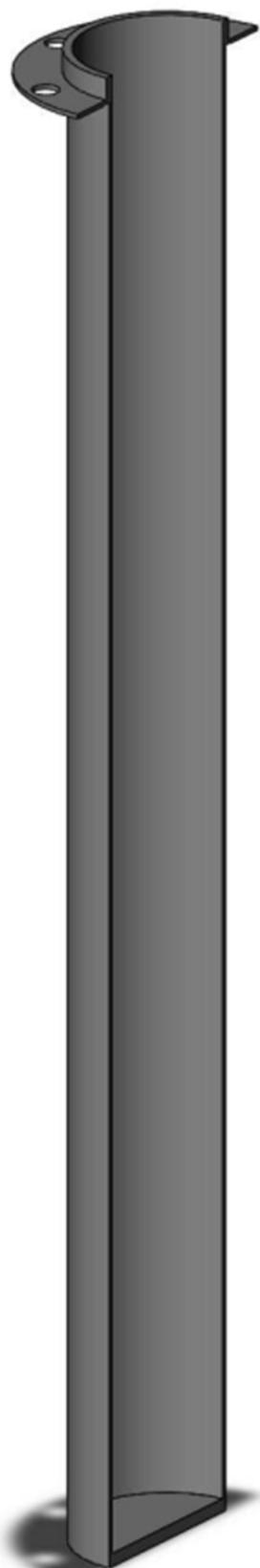


Рис. 3. Внутренняя полимерная оболочка корпуса магнитоэологического демпфера

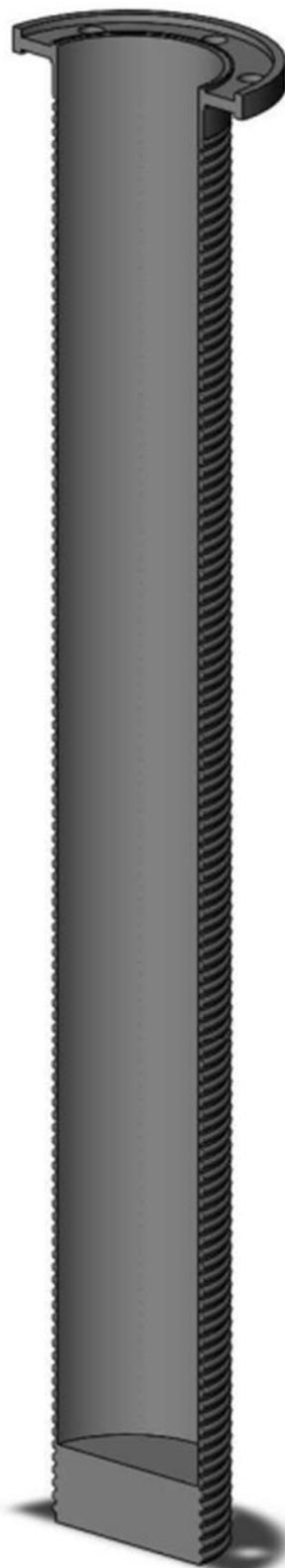


Рис. 4. Внешняя полимерная оболочка корпуса магнитоэологического демпфера

Полученный арамидный каркас армируется цельным углеродным волокном. Углеродное волокно вплетается по цилиндрической стенке арамидного каркаса, от нижнего основания до верхнего основания со смещением на каждом верхнем уровне текстильной структуры на одну структурную единицу, при этом образуя виток трехмерной спирали с шагом, равным высоте цилиндрической стенки. Достигнув верхнего основания цилиндрической стенки, меняется направление углеродного волокна на обратное.

Далее углеродное волокно вплетается по цилиндрической стенке арамидного каркаса от верхнего основания до нижнего, повторяя траекторию первого витка со смещением в сторону на одну структурную единицу арамидного каркаса относительно первого витка спирали.

Достигнув нижнего основания цилиндрической стенки, углеродное волокно проходит через основание гильзы диаметрально, и по аналогии выполняется армирующий виток спирали по цилиндрической стенке арамидного каркаса от нижнего основания до верхнего. И обратный виток от верхнего основания до нижнего основания со смещением в сторону на одну структурную единицу арамидного каркаса относительно полученного армирующего витка спирали. После чего процесс повторяется и продолжается, пока армирование углеродным волокном не будет произведено по всей длине окружности цилиндрического арамидного каркаса.

В результате по длине окружности цилиндрического арамидного каркаса образуется круговой массив армирующих витков из углеродного волокна, витки которого переплетены с арамидным волокном и между собой.

Формирование композитных структур из цельных волокон значительно повышает прочностные характеристики готовых изделий и позволяет им выдерживать существенные разнонаправленные динамические нагрузки.

Материал оболочки корпуса (рис. 3–4) фторопласт. Жесткость полимерного корпуса повышается интеграцией металлических пластин в оболочку корпуса (рис. 5–6) на

уровне крепления композитного корпуса, обеспечивая устойчивость крепежных отверстий к сдвиговым напряжениям и установку металлической пластины в область максимальных статических давлений, между дном композитного вкладыша и внешней оболочкой корпуса. Для обеспечения заданной жесткости и сохранения низкой массы готового изделия достаточно использовать пластины жесткости, изготовленные из алюминиевого сплава или сплава любого другого легкого металла.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

Полимерная оболочка корпуса легко обрабатывается резаньем или изготавливается литьем вакуумным / под давлением, горячей штамповкой, что в значительной степени ускоряет процесс производства, позволяет достигать низкую шероховатость поверхностей и снижает себестоимость готового композитного изделия. Композитный вкладыш изготавливается формовкой в вакууме или методом автоклавного упругого формования.

В мелкосерийном производстве и при прототипировании рационально изготовление оболочки корпуса путем механической обработки поверхностей. Точение, фрезерование и сверление изделий из пластика с целью сохранения достаточной точности требуют организации хорошего охлаждения и оптимизации подачи смазочно-охлаждающей жидкости или струи сжатого воздуха, направленного в зону резания, так как большинству полимеров присущ высокий коэффициент теплового расширения. Рассматриваемая полимерная оболочка имеет форму тела вращения и подлежит токарной обработке с элементами сверления и нарезания резьбы. Низкая плотность и относительно небольшая прочность на сдвиг и на срез у многих полимеров при точении требует приложения небольших сил резания на малой мощности. Точение производится из прутковой пресованной заготовки, закрепленной в цанговом креплении.

Режимы токарной обработки зависят от вида обрабатываемого материала и требований к качеству обрабатываемой поверхности. На шероховатость обрабатываемой по-

верхности существенное влияние оказывает радиус закругления вершины резца. С увеличением радиуса закругления повышается чистота поверхности. Важное значение для обеспечения качества обрабатываемой поверхности имеет глубина резания. Качество поверхности также зависит от характера и величины деформации материала в процессе обработки, что определяется силой и направлением резания, физическими свойствами материала и от геометрии режущего инструмента. Во избежание деформации тонкие детали необходимо зажимать равномерно по окружности.

Режим резания является определяющим при обработке полимеров, так как с увеличением скорости резания и подачи повышается температура в зоне обработки, что снижает качество обрабатываемой поверхности. Как уже было отмечено, режим обработки зависит от состава полимера, требований к качеству обрабатываемой поверхности и охлаждения, но также от стойкости режущего инструмента и от продолжительности непрерывной обработки. Для минимизации деформационных явлений в обрабатываемом материале, повышения точности и качества обработки необходимо выбрать передний угол, при котором направление равнодействующей силы резания совпадает с направлением резания.

При обработке полимеров режущая кромка инструмента должна быть острозаточенной, что обеспечивается большими значениями переднего и заднего углов, значения определяемы для различных материалов индивидуально и экспериментально по критериям: качество обрабатываемой поверхности и стойкость инструмента.

Еще одно преимущество применения корпусов с композитными вкладышами объясняется тем, что обработка полимеров без армирующих элементов почти не изнашивает режущий инструмент, а глубина резания не зависит от глубины залегания армирующих элементов, нарушение целостности которых снижает плотность композита и может привести к его расслаиванию. Шаг резания при обработке полимеров выбирается в пределах 0,2–0,5 мм.

Высокая механическая прочность композитов и герметичность готового изделия достигается применением метода упругого формования. Для изготовления композитного корпуса использован один из методов упругого формования – пленочное формование. При формировании композита пленочным методом используют прозрачную бесшовную пленку из поливинилового спирта по форме изделия в качестве чехла.

Приемлемая точность, прочность готовых изделий, формование глубоких профилей и поверхностей сложной конфигурации требует комбинации контактного давления упругого формования, создаваемого только за счет вакуума под чехлом, и формования автоклавным способом, что дает высокие прочностные характеристики и позволяет деталям выдерживать динамические нагрузки.

Герметичный упругий чехол, в который помещен формируемый композитный корпус, позволяет реализовать дополнительное давление на формируемое изделие за счет увеличения наружного давления на чехол, так как автоклав способен поддерживать не только заданный температурный режим, но и создаваемое высокое давление, которое уплотняет формируемое изделие.

Упругое формирование автоклавным методом состоит из следующих технологических этапов [22–23]:

- предварительное формование корпуса,
- вакуумирование композитной сборки,
- автоклавная опрессовка и отверждение композитной сборки.

Арамидный каркас, армированный углеродным волокном, интегрируется в полимерную оболочку, и устанавливаются пластины жесткости. Полости заполняются вакуумированным компаундом, полученная композитная заготовка помещается в герметичный чехол и вакуумируется, что удаляет пузырьки газа, препятствуя образованию каверн, и повышает качество пропитки армирующих элементов, улучшая герметичность и механические свойства готового изделия. Полученная вакуумированная заготовка композитного корпуса помещается в автоклав на 20–30 мин.



Рис. 5. Металлические пластины жесткости, интегрированные в верхнюю часть композитного корпуса

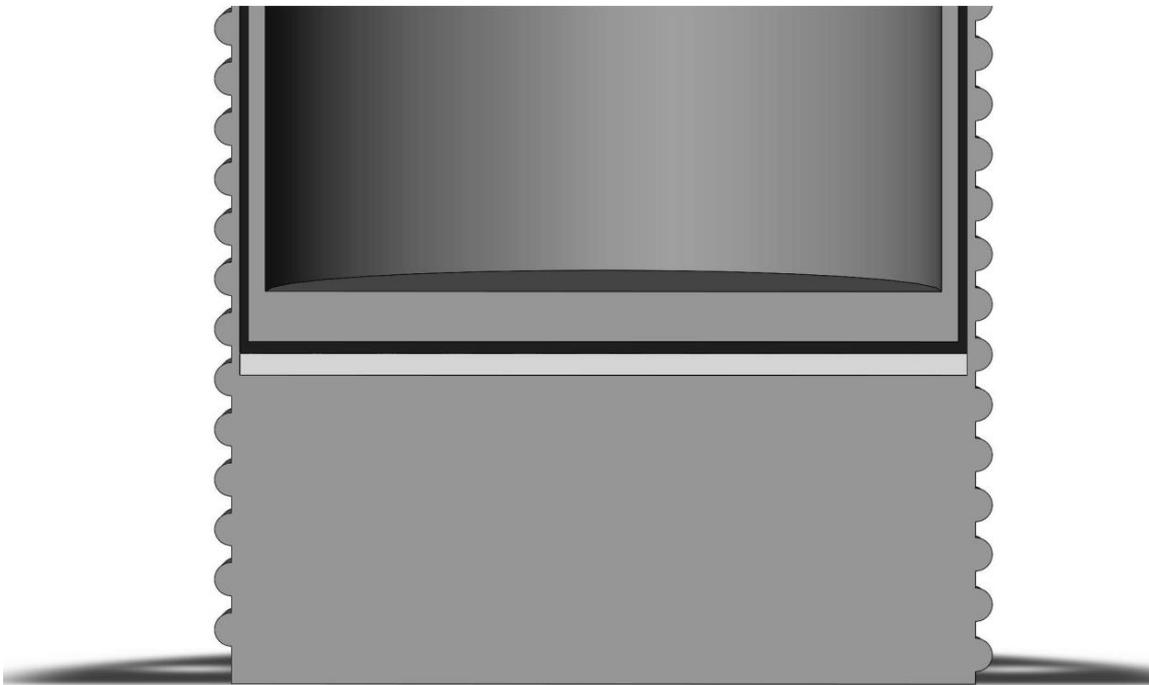


Рис. 6. Металлическая пластина жесткости, установленная в нижнюю часть композитного корпуса

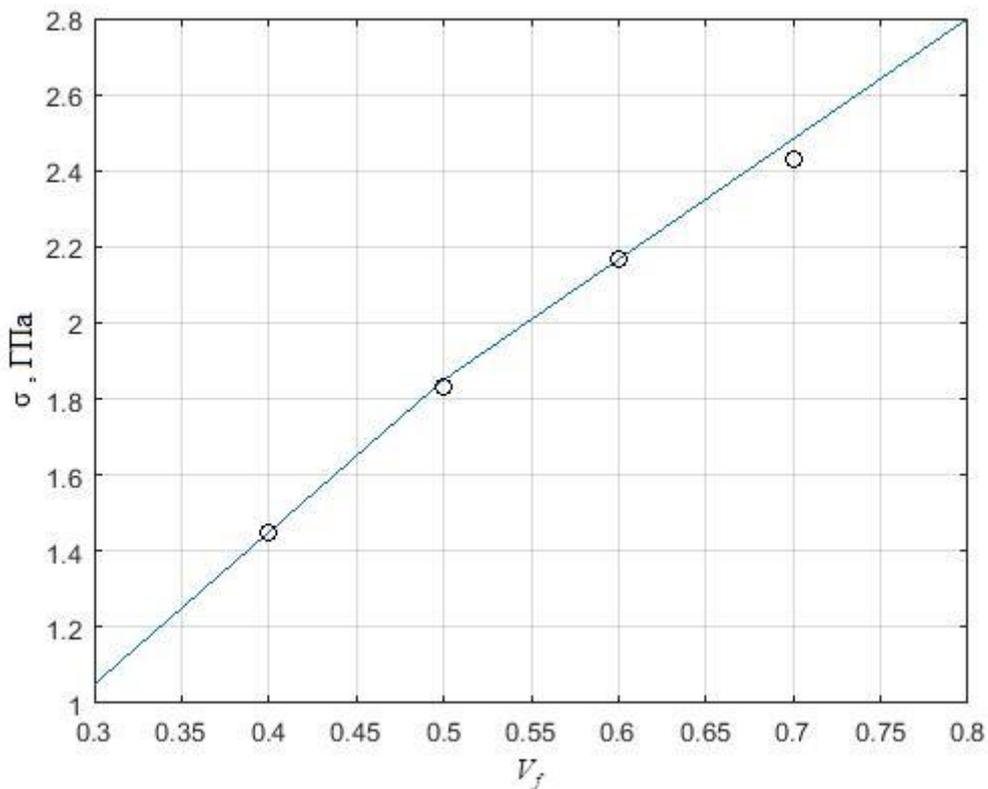


Рис. 7. Зависимость прочностных свойств композитного вкладыша σ от общей объемной доли армирующих волокон V_f

После истечения времени выдержки в вакууме давление медленно повышается до 1 атм., а впоследствии до заданного давления, которое выбирается индивидуально в зависимости от формы, толщины стенок, свойств армирующих элементов и компаунда, давление устанавливается в диапазоне 5–25 кГ/см². Композитный корпус выдерживается до отверждения компаунда.

Производство арамидного каркаса, образующего композитный вкладыш, возможно с применением промышленного текстильного оборудования с последующим армированием его углеродным волокном, выполняемым с учетом направления приложения рабочих нагрузок.

Полученный композитный корпус способен выдерживать высокие динамические нагрузки, обладая при этом небольшим весом, инертностью к различным агрессивным средам, магнитной проводимостью и электроизоляционными свойствами.

Изготовленный опытный образец магнито-реологического демпфера (запатентованной конструкции) [17] с рассматриваемым в

работе композитным корпусом (запатентованной конструкции) [24] прошел успешные испытания на стендах статического и динамического нагружения, показав приемлемую прочность многослойного корпуса с волокнистым композитным вкладышем. Полученная расчетная зависимость его прочностных свойств σ от общей объемной доли армирующих волокон V_f и результаты натурального эксперимента (рис. 7) имеют высокую степень совпадения и иллюстрируют наличие у разработанного многослойного волокнистого композита, при высоких значениях объемной доли армирующих волокон, большей прочности, чем у стали.

НОВИЗНА

Предложенное запатентованное техническое решение реализации композитного корпуса магнито-реологического демпфера является универсальной базовой конструкцией, отличающееся от ранее известных наличием композитного вкладыша, изготовленного из цельного арамидного воло-

на, дополнительно армированного цельным углеродным волокном и интеграцией композитного вкладыша в полимерную оболочку [24].

Техническое решение позволяет разнообразить компоновку магнитореологических устройств и производить установку блоков электромагнитного управления на корпус, что упрощает обслуживание и не требует герметизации блоков электромагнитного управления.

Данное решение выполнения композитного корпуса применимо для магнитореологического демпфера [17] оригинальной и запатентованной конструкции, что является логическим продолжением разработки конструкции магнитореологического демпфера нового поколения.

ВЫВОДЫ

Предложенная конструкция корпуса магнитореологического демпфирующего устройства с композитной вставкой позволяет достичь прочности корпуса, превышающей прочность многих сплавов металлов, к воздействию на него напряжений растяжения/сжатия.

Композитный материал пропускает электромагнитное поле, позволяя устанавливать блоки электромагнитного управления на корпус, что упрощает компоновку магнитореологических устройств.

Разработанный метод изготовления композитного корпуса магнитореологического демпфирующего устройства отличается низкой шероховатостью поверхностей, не требующих дополнительной обработки, высокой скоростью производства и низкой себестоимостью готового композитного изделия.

Созданная оригинальная запатентованная многослойная конструкция корпуса с волокнистым композитным вкладышем универсальна и применима в различных магнитореологических устройствах.

Композитный материал использован при изготовлении магнитореологического демпфера нового поколения.

Натурный эксперимент подтвердил высокую прочность композитного корпуса готового изделия, превосходящую прочность стали и многих металлических сплавов.

Сопоставление экспериментальных данных с результатами численного моделирования подтвердили достоверность ранее разработанной математической модели многослойного волокнистого композитного материала.

Разработанная структура композитного материала способна выдерживать разнонаправленные интенсивные динамические нагрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие технологической базы и создание новых материалов способствует становлению инновационных направлений в технике.

Достижимые за счет применения предложенного композитного материала результаты способствуют развитию магнитореологических систем, совершенствуют их конструкции, оптимизируют методы управления процессами во многих отраслях техники.

Работа поддержана ООО «Научно-производственным предприятием Авионика и Мехатроника».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Harris C. E. et. al. Emerging materials for revolutionary aerospace vehicle structures and propulsion systems. SAMPE J. Vol. 38. № 6. pp. 33–43, 2002.
2. Strong A. B. Plastics: materials and processing, 3ed Ed. Upper Saddle River. NJ: Prentice-Hall. Inc, 2006.
3. Warren C. D. Carbon fiber in future vehicles. SAMPE J. Vol. 37. № 2, 2001.
4. Driver. D. The composite engine. In meeting of Australian Aeronautical Society. Towards, 2000.
5. Burchenkov V. N. et. al. Magnitozhidkostnoye ustroystvo dlya gasheniya kolebaniy " MR device for vibration damping", RU Patent № 2145394, 2000.
6. Корчагин А. Б. и др. Регулируемый магнитореологический пневматический амортизатор: Патент РФ № 2449188, опубли. 27.04.2012 Бюл. № 12. [А. В. Korchagin et. al. "Adjustable magnetorheological pneumatic damper", RU Patent № 2449188, 2012.]
7. Гусев Е. П., Плотников А. М., Воеводов С. Ю. Магнитореологический амортизатор: Патент РФ № 2232316, опубли. 27.10.2003 Бюл. № 30. [Е. П. Gusev, А. М. Plotnikov, S. Yu. Voevodov "MR shock absorber", RU Patent № 2232316, 2003.]
8. Кудряков Ю. Б. и др. Магнитореологический виброгаситель: Патент РФ № № 2106551, опубли. 10.03.1998. [Yu. B. Kudryakov et. al. "MR vibration damper", RU Patent № 2106551, 1998.]
9. Яманин И. А. и др. Динамический гаситель: Патент РФ № 2354867, опубли. 10.05.2009 Бюл. № 13. [I. A. Yamanin et. al. "Dynamic absorber", RU Patent № 2354867, 2009.]

10. **Гордеев Б. А. и др.** Магнито-реологический амортизатор: Патент РФ № 2561610, опублик. 27.08.2015 Бюл. № 24. [В. А. Gordeev et. al. "MR damper", RU Patent № 2561610, 2015.]

11. **Дубовиков Е. А.** Многоуровневый алгоритм оценки перспективных конструктивно-силовых схем композитных авиаконструкций: Дисс. канд. техн. наук. Жуковский: ФГУП «ЦАГИ», 2017. 130 с. [Е. А. Dubovikov, "Multilevel algorithm for the evaluation of promising structural power schemes of composite aircraft constructions", Ph.D. Thesis, pp. 130, 2017.]

12. **Найгерт К. В., Редников С. Н.** Магнито-реологический привод прямого электромагнитного управления характеристиками потока верхнего контура гидравлической системы золотника: Патент РФ № 2634163, опублик. 24.10.2017 Бюл. № 30. [К. В. Naigert, S. N. Rednikov, "The magnetorheological drive for directly electromagnetically controlling flow characteristics of an upper contour of a hydraulic slide-valve system", RU Patent № 2634163, 2017.]

13. **Найгерт К. В., Редников С. Н.** Магнито-реологический привод прямого электромагнитного управления характеристиками потока верхнего контура гидравлической системы с гидравлическим мостиком: Патент РФ № 2634166, опублик. 24.10.2017 Бюл. № 30. [К. В. Naigert, S. N. Rednikov, "The magnetorheological drive for directly electromagnetically controlling flow characteristics of an upper contour of a hydraulic system which includes a hydraulic bridge", RU Patent № 2634166, 2017.]

14. **Naigert K. V.** The rotating magnetorheological fluid technologies in actuators of industrial automation systems. Innovations in modern science, Neftekamsk: Scientific Publishing Center «World of Science», Praha: Publishing house «Osvícení», pp. 102–113, 2017.

15. **Naigert K. V.** The realization principles of new generation magnetorheological systems. Modern science: current issues and development prospects, Neftekamsk: Scientific Publishing Center «World of Science», Sofia: Publishing house «SORoS», pp. 132–147, 2017.

16. **Найгерт К. В., Целищев В. А.** Расчет характеристик комбинированных магнито-реологических опор с учетом эффектов магнитной левитации и особенностей определения коэффициентов их элементов // Наука и технологии, Т. 1. Москва: РАН, 2018, С. 125–137. [К. В. Naigert, V. A. Tselishev, "Calculation of characteristics of combined magnetorheological supports by effects of magnetic levitation and peculiarities of determining coefficients of their elements", (in Russian), in *Nauka i tekhnologii*, vol. 1, pp. 125–137, 2018.]

17. **Найгерт К. В., Тутынин В. Т.** Адаптивный комбинированный реологический амортизатор: Патент РФ № 175044, опублик. 20.11.2017 Бюл. № 32. [К. В. Naigert, V. T. Tutynin, "The adaptive combined rheological damper", RU Patent 175044, 2017.]

18. **Lawrence C.** High Performance Textiles and Their Applications, Woodhead Publishing, 2014.

19. **Yang H. H.** Aromatic high-strength fibers. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1989.

20. **Horrocks A. R., Anand S. C.** Handbook of technical textiles, Woodhead Publishing, 2000.

21. **Симамура С.** Углеродные волокна. М.: Мир, 1987. 304 с. [С. Simamura, *Carbon fibers*, (in Russian). Moscow: Mir, 1987.]

22. **Берлина А. А.** Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.: Профессия, 2009. 560 с. [А. А. Berlina, *Polymeric composites: structure,*

properties, technology, (in Russian). St. Petersburg: Professiya, 2009.]

23. **Лютков А. Г., Закурдаева Е. А.** Анализ влияния автоклавных режимов формования многослойных конструкций на физико-механические свойства деталей. Автоматизация и управление технологическими и производственными процессами: мат. Всерос. науч. практ. конф. Уфа: УГАТУ, 2013. С. 254–258. [А. Г. Lutov, Е. А. Zakurdaeva, "Analysis of the impact of modes of autoclave molding of multilayer structures on the physical and mechanical properties of the parts", (in Russian), in *Avtomatizatsiya i upravleniye tekhnologicheskimi i proizvodstvennymi protsessami*, pp. 254–258, 2013.]

24. **Найгерт К. В., Тутынин В. Т.** Композитный корпус для магнито-реологического демпфера: Патент РФ № 185305, опублик. 29.11.2018 Бюл. № 34. [К. В. Naigert, V. T. Tutynin, "Composite housing for magnetorheological damper", RU Patent № 185305, 2018.]

ОБ АВТОРАХ

НАЙГЕРТ Катарина Валерьевна, канд. техн. наук, докторант кафедры «Автомобильный транспорт» ЮУрГУ.

ЦЕЛИЩЕВ Владимир Александрович, д-р техн. наук, проф., зав. каф. Прикладной гидромеханики УГАТУ.

METADATA

Title: Development of composite housing of magnetoreological devices.

Authors: K. V. Naigert¹, V. A. Tselishev²

Affiliation:

¹ South Ural State University (national research university) (SUSU (NRU)), Russia.

² Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹kathy_naigert@mail.ru, ²pgl.ugatu@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 22, no. 4 (82), pp. 19–29, 2018. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: In the last decade it has become popular variety magnetoreological devices but widely distribution of magnetoreological systems is limited by imperfections technological base. Specificity of working process requires the production of some elements of their constructions from non-magnetic and well-conducting electromagnetic fields of materials, which make the use of metals not permissible. Operation conditions of magnetorheological devices are associated with sharp differences in the wide range of pressures and temperatures; this raises the need to search for materials which are capable to withstanding high dynamic and thermal loads.

Key words: magnetoreological devices; composite materials; special-purpose hydraulic systems; constructional materials; housing of magnetorheological damping devices.

About authors:

NAIGERT, Katharina Valerevna, Ph.D., doctoral student, Department of Automobile Transport of South Ural State University.

TSELISCHEV, Vladimir Aleksandrovich, Doctor of Technics, Professor, Head of the Applied Hydromechanics Department of Ufa State Aviation Technical University.