

ПОИСКОВЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУР ГИБРИДНОГО ПОЛИМЕРНОГО МЕТАЛЛОКОМПОЗИТА

© 2023

- В. И. Халиулин** доктор технических наук, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов;
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева;
pla.kai@mail.ru
- П. А. Петров** инженер Центра композитных технологий;
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева;
13petrof@mail.ru
- В. А. Костин** доктор технических наук, заведующий кафедрой прочности конструкций;
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева;
VAKostin@kai.ru
- Н. В. Левшонков** кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов;
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева;
n-levshonkov@mail.ru

Представлены результаты исследований в области разработки технологии изготовления гибридных композитов по схеме направленной укладки волокна. Армирование осуществлено совмещением углеродных волокон и металлической проволоки, пропитка полимерным связующим методом инфузии. Приведены результаты экспериментальной оценки прочности композитов на растяжение, армированных только проволокой, а также гибридных образцов с разным процентным соотношением углеродного и металлического волокна. Установлена существенная зависимость прочности гибридного композита от соотношений объёмов армирующих материалов и технологических факторов. Сформулированы конструктивные и технологические рекомендации, направленные на повышение функциональных параметров гибридного композита.

Гибридные композиты; программируемое армирование; параметры преформы; прочность; металлополимер

Цитирование: Халиулин В.И., Петров П.А., Костин В.А., Левшонков Н.В. Поисковый анализ структур гибридного полимерного металлокомпозита // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 3. С. 160-175. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-3-160-175

Введение

Совершенствование силовых конструкций и методов их проектирования ведётся в двух основных направлениях. Первое связано с использованием топологической оптимизации с опорой на аддитивные технологии изготовления деталей фактически любой сложности. Второе направление рассматривает задачи выбора (проектирования) внутренней структуры материала под определённые цели. Оба эти тренда подробно обсуждаются в концептуальных статьях [1; 2].

С практической точки зрения представляется также актуальным создание методов проектирования конструкций, в которых металлические элементы гармонично интегрированы в композитную часть изделия с целью более полной реализации положительных качеств полимерных композитов и металлов [3].

Наибольшее развитие в этом направлении получила тема слоистых материалов, состоящих из чередующихся слоёв металла и композита. Такие структуры, в зависимости от исходных компонентов, получили обозначения GLER, TIGR, ARALL, СИАЛ, АЛОП [4 – 6].

В соответствии со слоистой структурой сопряжение между металлом и композитом реализуется по контактирующей поверхности. Можно предположить, что с увеличением степени проникновения разнородных материалов друг в друга и соответственно площади их сопряжения гибридная конструкция будет обладать более высокими эксплуатационными характеристиками. Этих результатов можно добиться путём объединения углеродных и металлических армирующих компонентов, представленных в виде волокон. Предполагается, что такая конструкция может состоять из трёх зон (рис. 1): 1 – углепластик, армированный ровингом; 2 – гибридный участок, включающий металлические и углеродные волокна, равномерно распределённые по сечению; 3 – участок, армированный металлическими волокнами. Матрицей для всех трёх участков может служить полимер. При другом варианте проволока на участке 3 может быть консолидирована в монолит методами сварки или с помощью металлической матрицы [7].

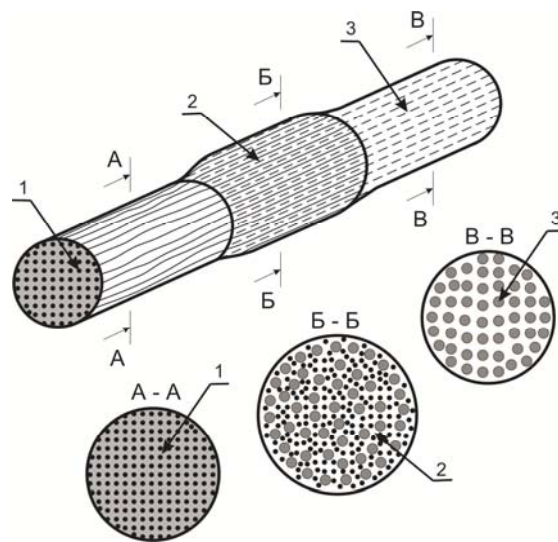


Рис. 1. Схема сопряжения углеродных и металлических армирующих волокон в гибридной конструкции

Ключевой задачей является разработка технологических схем, позволяющих совместить металлические и углеродные волокна в единой преформе. Под термином «углеродное волокно» подразумевается пучок подготовленных однонаправленных нитей. Очевидно, что армирующую преформу проще изготовить из сухих волокон и проволоки. Для решения такой задачи можно рассматривать следующие четыре схемы: направленная укладка волокна – TFP (Tailored Fibre Placement) [8], плетение [9], трансверсальная прошивка (Tafting) [10], вязание [11]. Все эти методы в той или иной степени можно отнести к технологиям программируемого армирования. Отметим, что использование пропитанных волокон не позволяет реализовать перечисленные четыре технологические схемы.

В настоящей работе исследуется возможность изготовления гибридных преформ из углеродного волокна, совмещённого с металлической проволокой, методом направленной укладки волокна (TFP) и влияние параметров преформ на механические характеристики композита. Для пропитки и формования в данной работе использовался метод вакуумной инфузии.

Подготовка преформ гибридного композита

Схема изготовления преформы методом TFP показана на рис 2. На подложку 1 одновременно подаются углеродные волокна 2 (углеродные, стеклянные и т.п.) и металлические волокна 3. Подача осуществляется с катушек. Положение разнородных волокон фиксируется на подложке пристёгиванием технологической нитью 4 с шагом S . Первостепенным достоинством TFP является возможность реализации программируемого армирования по заданным траекториям, например по линиям главных напряжений, для оптимального восприятия нагрузки [12].

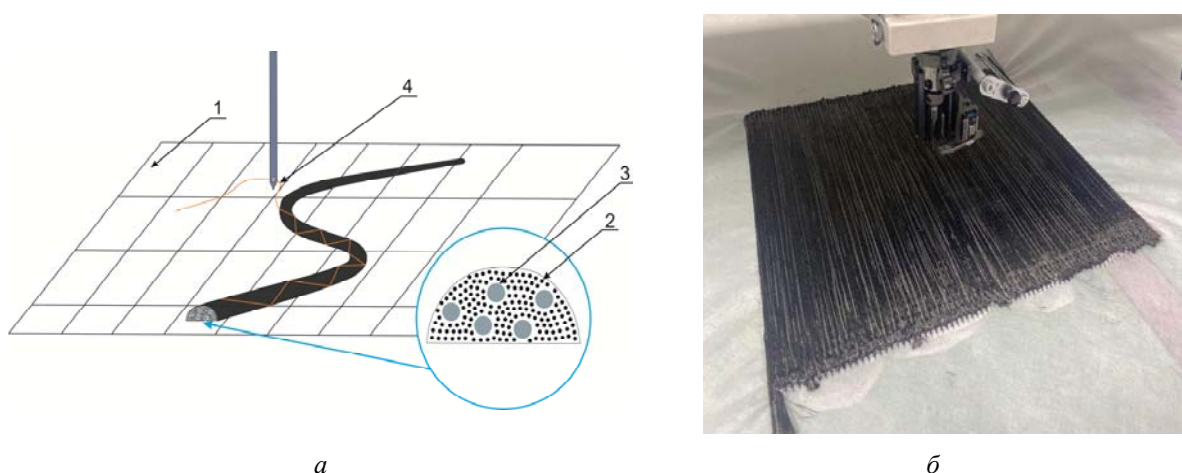


Рис. 2. Схема метода TFP:
а – схема укладки разнородных волокон на подложку по заданной траектории;
б – процесс изготовления преформы

Большинство технологических процессов создания преформ в некоторой мере снижают заявленную прочность арматуры, то есть прочностные характеристики в изделии ниже, чем указано в паспортных данных [13]. В частности, для метода TFP на прочность могут оказать влияние следующие факторы:

- отклонение волокна от заданной траектории при его укладке на подложку. При этом следует учесть, что диаметры углеродных и металлических волокон могут отличаться в 30-50 раз, а упругие характеристики – на порядки;
- процесс пристёгивания волокон к подложке сопровождается повреждением последних иглой, что отрицательно влияет на прочность композита;
- металлическая проволока может неравномерно распределяться по сечению преформы, т.к. стандартные укладчики машины адаптированы под податливое углеродное волокно.

Технологию TFP можно отнести к новому поколению методов переработки композитов [14]. Особенности влияния её режимов и параметров на конечный результат до конца не изучены. Поэтому на первом этапе необходимо выбрать подходы к изготовлению образцов для испытаний, чтобы минимизировать ошибки в оценке прочности композита.

Таким образом, актуальным является рассмотрение влияния способов подготовки преформы и обработки заготовок под испытываемые образцы на конечные механические характеристики.

Влияние способа изготовления образцов с преформой TFR на прочность композита

Исследование влияния различных технологических параметров метода TFR на свойства композита осуществлялось экспериментально путём изготовления и испытания образцов. Для того, чтобы оценить влияние повреждения волокон в TFR преформе при механической обработке, испытываемые образцы изготавливались двумя методами. На рис. 3, *а* показаны образцы для испытаний, изготовленные из цельной пластины и из отдельной преформы (рис. 3, *б*).

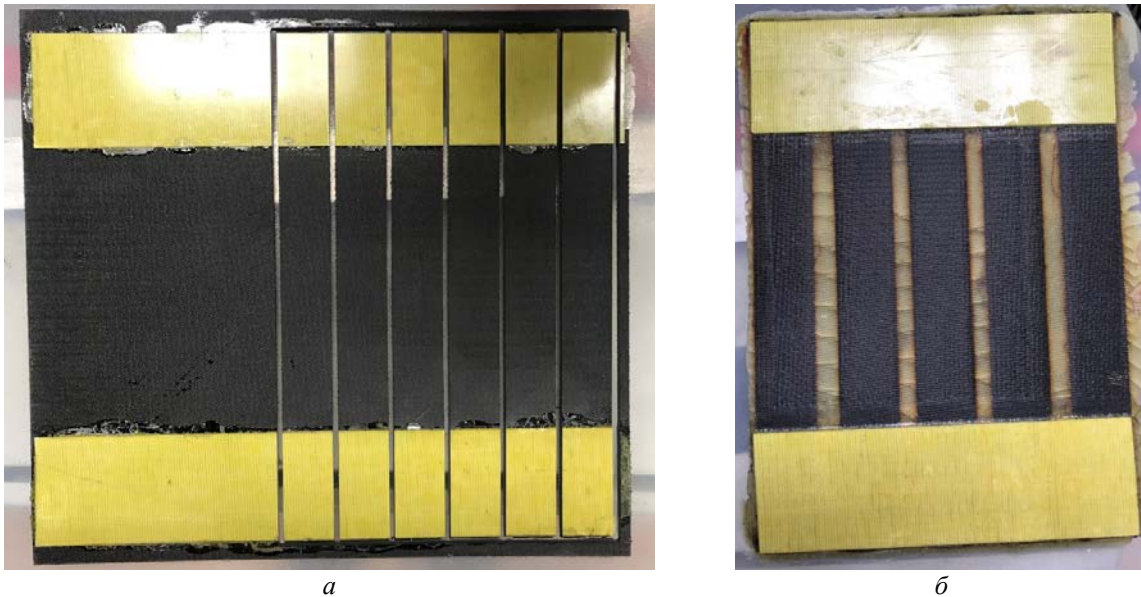


Рис. 3. Образцы для испытаний, изготовленные методом TFR:
а – раскроем из цельной пластины; *б* – формованием отдельных заготовок

Геометрические параметры образцов для проведения испытания подбирались согласно стандарту на растяжение ГОСТ Р 56785. Выкладка преформы осуществлялась в четыре слоя для обеспечения толщины образца равной 2 мм. Во всех образцах применялось углеродное волокно марки UMT49 с пределом прочности $\sigma_g = 3712$ МПа. В качестве связующего материала использовалась смола для трансферных методов формования Т-26 ($\sigma_g = 95$ МПа).

На рис. 4 показаны результаты испытаний. Диаграммы зависимости напряжений от деформаций имеют характерный для углепластиков вид. Как видно из гистограмм, механические параметры образцов, изготовленных из цельной пластины и по отдельности, близки и отличаются в среднем на 5%. Среднее значение предела прочности углепластика равно 1752 МПа. Коэффициент вариации (V) для образцов из цельной пластины составляет $V = 4,95$, для образцов из отдельных пластинок $V = 3,56$.

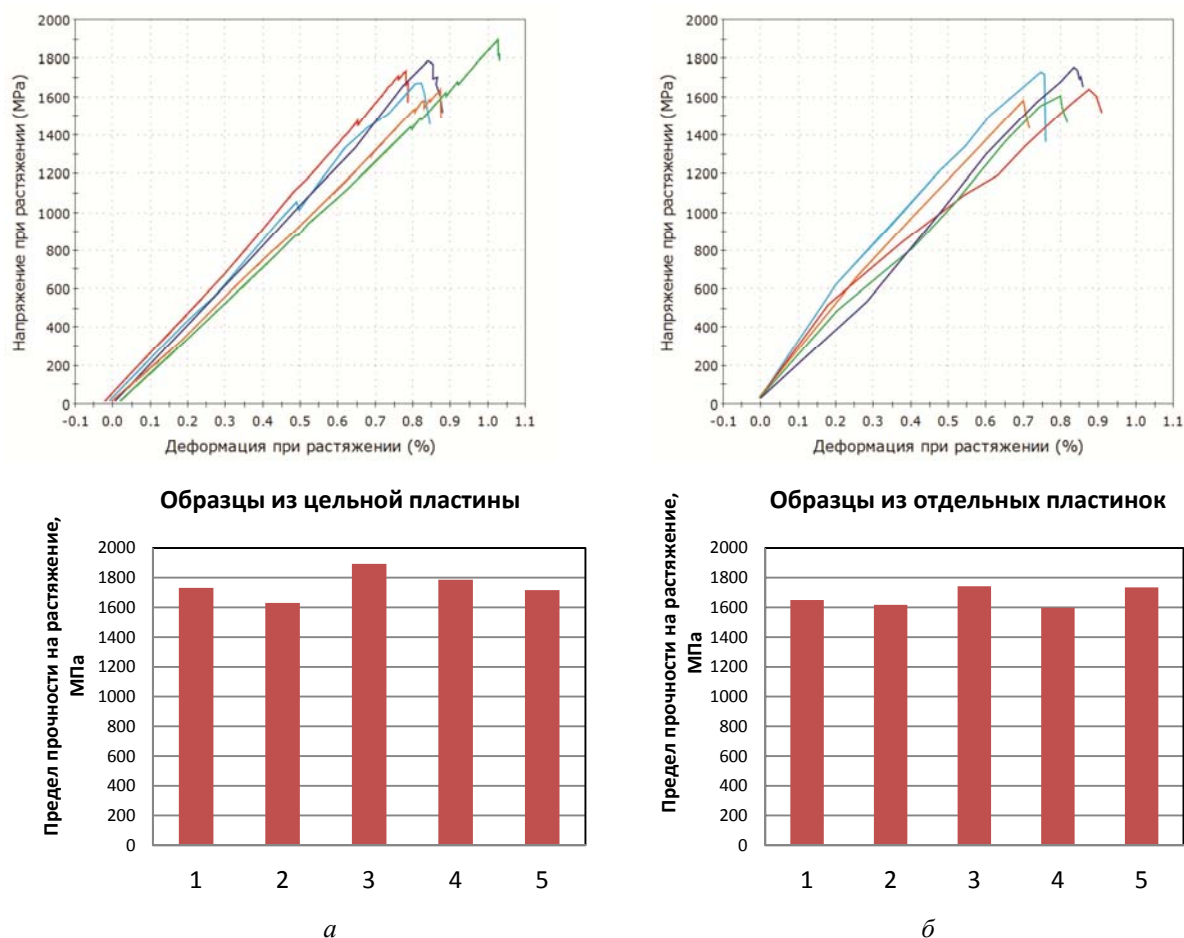


Рис. 4. Результаты испытаний образцов из углепластика: а – изготовленных из цельной пластины; б – изготовленных отдельно

Таким образом, для исследования можно использовать приёмы изготовления образцов как из цельной пластины, так и полученных раздельно. В дальнейшем в силу большей технологичности используется метод изготовления из цельной пластины.

Влияние параметров стежка на прочность композита

В методе TFP реализуется фиксация углеродного ровинга и проволоки на подложке путём пристёгивания технологической нитью. При этом наблюдается повреждение армирующего волокна. Чем меньше шаг стежка, тем точнее выдерживается траектория укладки ровинга. В то же время густая прошивка наносит больше повреждений. Как показывает опыт, повреждение ровинга прошивочной иглой может существенно снизить прочность углепластика. Это отмечается и в зарубежных исследованиях [15].

С целью определения рационального шага стежка были проведены экспериментальные исследования. Преформы изготавливались с однонаправленной схемой армирования 0° . Схема пристёгивания ровинга технологической нитью показана на рис. 5.

На рис. 6 показаны результаты испытаний углепластиковых образцов, преформы которых формировались с длиной шага стежков 3, 6, 12, 20 миллиметров.

Сравнительная характеристика образцов с разной длиной стежка представлена в табл. 1.

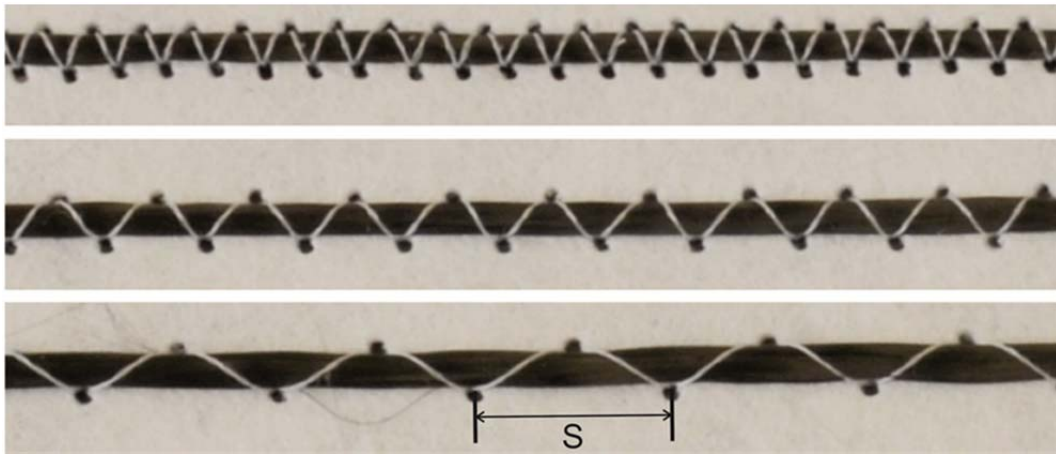


Рис. 5. Схема пристёгивания ровинга

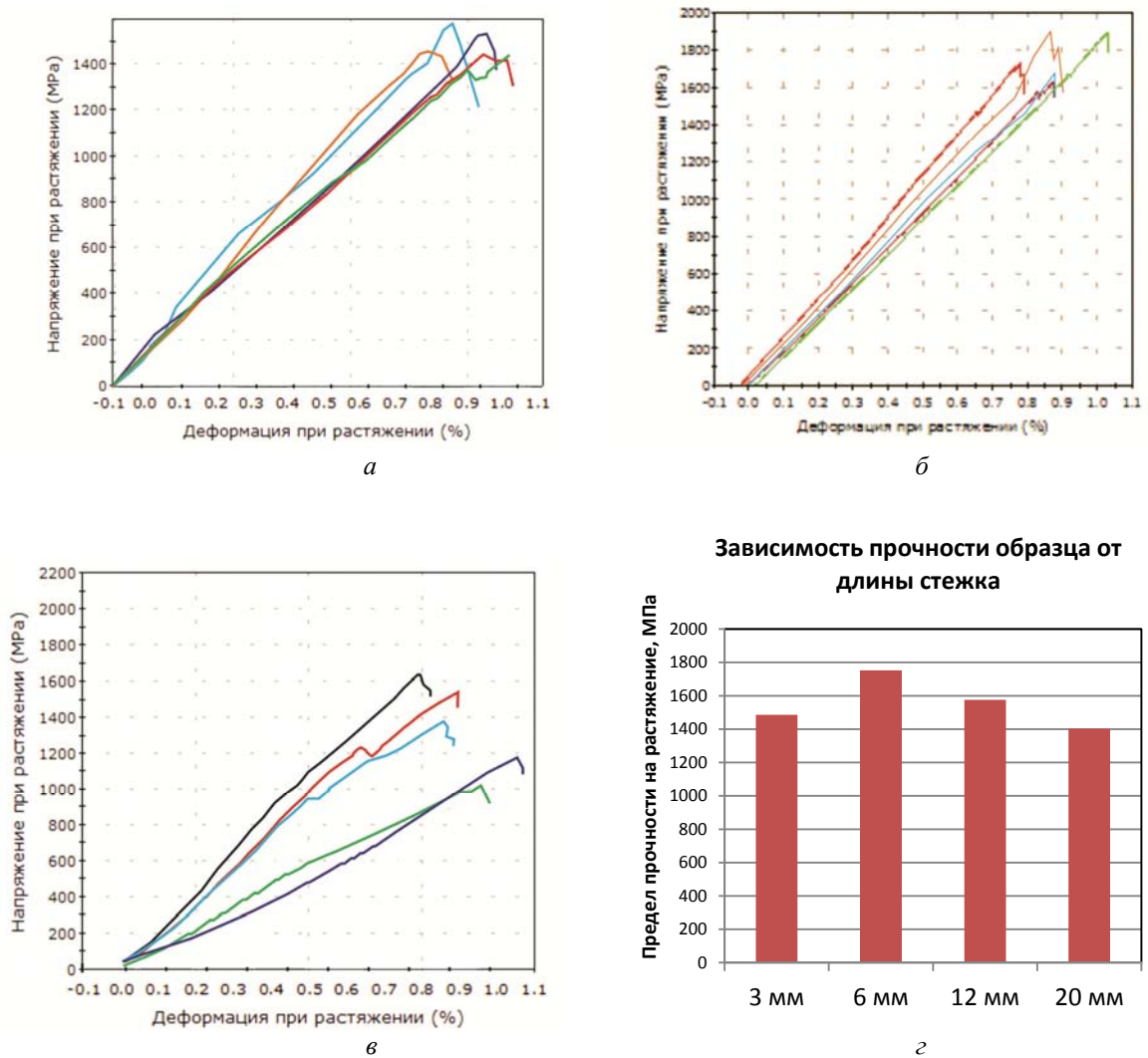


Рис. 6. Диаграмма нагружения образцов с преформами TFP с шагом стежков: а – 3 мм; б – 6 мм; в – 20 мм; г – сопоставительная диаграмма

Таблица 1. Сравнительная характеристика образцов

№	Шаг стежка, мм	Предел прочности, МПа
1	3	1486,5
2	6	1752,4
3	12	1576,1
4	20	1403,4

Как и следовало ожидать, с увеличением шага стежка прочность углепластика возрастает. При длине стежка 3 мм волокно подвергается многократному механическому повреждению. При длине стежка 6 мм этот эффект ослабевает и образец становится прочнее. Причём разница характеристик может составлять до 15%. Однако дальнейшее увеличение длины стежка до 20 мм является нецелесообразным, так как в процессе укладки волокно приобретает волнистость, т.е. отклоняется от прямолинейности. Также при криволинейной укладке волокон большой шаг не может обеспечить точного повторения заданной траектории. В данной работе при экспериментальных исследованиях в основном применялся шаг пристёгивания равный 6 мм.

Металло-полимерный композит

Представляет интерес поведение композита на основе полимерной матрицы, армированного только металлической проволокой [16]. При выборе армирующей проволоки возникает противоречие между прочностью конструкции и технологичностью. Предположительно высокопрочная проволока должна гармонично включаться в совместную работу с углеродным волокном. В то же время в силу большой упругости её сложно уложить по заданной траектории при реализации метода TFR. Проволока с малой прочностью более технологична и может быть использована в зонах композита, где не требуется высокой прочности на растяжение, но надо обеспечить другие свойства, например поднять уровень допустимых контактных напряжений, повысить ударостойкость, электро- или теплопроводность [17]. Поэтому оба варианта проволоки представляют интерес.

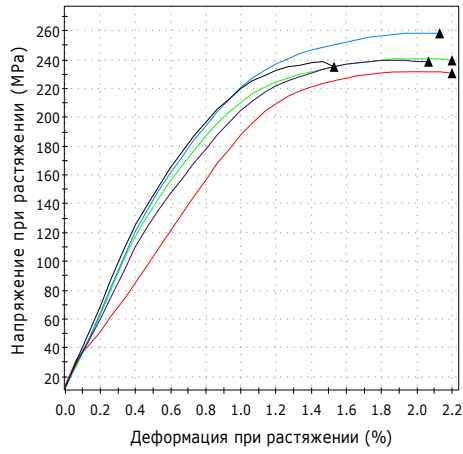
На первом этапе для оценки совместной работы металлической арматуры в полимерной матрице были изготовлены и испытаны образцы на основе двух вариантов низкопрочной проволоки «Gamma DR-3» (Ø 0,3 мм) (рис. 7) и проволоки 12X18H10T (Ø 0,25 мм) (рис. 8) с большим относительным удлинением.

По представленным на рис. 7, 8 диаграммам можно сделать следующие выводы:

- для композитов с низкопрочной проволокой диаграммы нагружений имеют характер, близкий к нагружению металлической проволоки и имеют выраженный участок с зоной пластических деформаций;

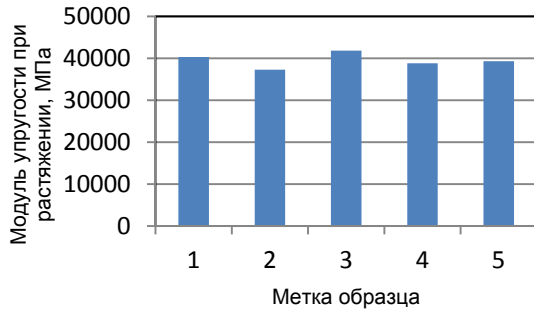
- предел прочности композитов, армированных проволокой, по отношению к прочности самой проволоки составляет 38% для материала «Gamma DR-3» и 27% для российского материала 12X18H10T при коэффициенте наполнения 32%.

Композиты, армирующим материалом которых выступает проволока, показывают механические характеристики значительно меньше ожидаемых. Напрашивается вывод о недостаточной адгезионной прочности на границе раздела двух фаз – арматуры и матрицы. В рамках изучения свойств гибридных металл-композиционных материалов актуальным будет вопрос оценки их адгезионной прочности, а также способы её повышения [18].



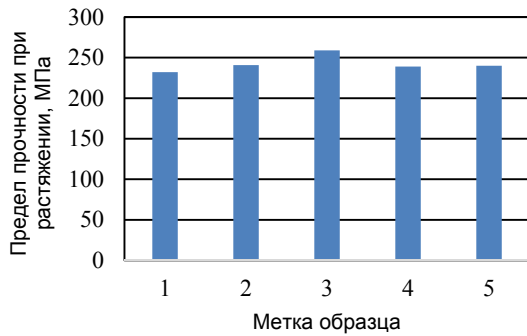
a

Gamma DR-3



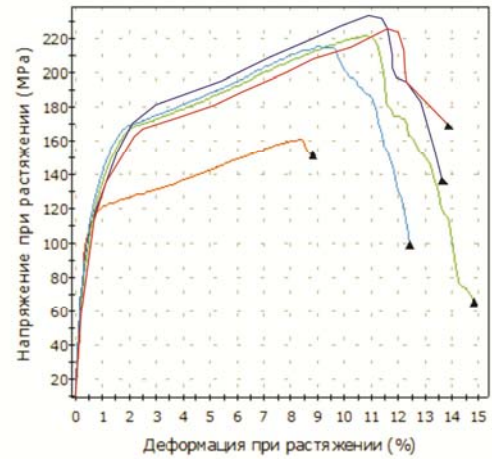
б

Gamma DR-3



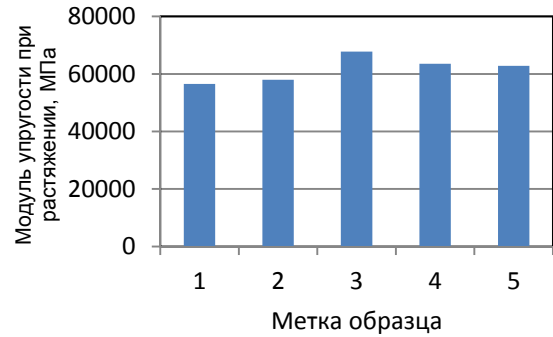
в

Рис. 7. Результаты испытания образцов, армированных проволокой марки «Gamma DR-3»: *a* – диаграмма нагружения образцов до разрушения; *б* – диаграмма распределения модуля упругости; *в* – диаграмма распределения предела прочности



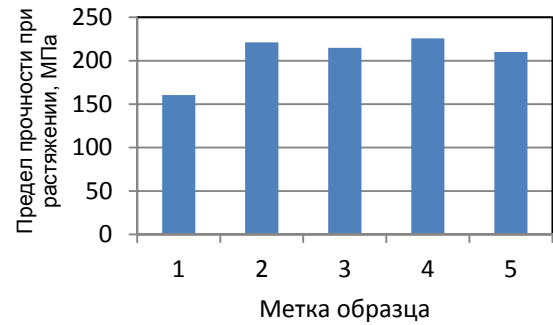
a

12X18H10T



б

12X18H10T



в

Рис. 8. Результаты испытания образцов на основе российской проволоки марки 12X18H10T: *a* – диаграмма нагружения образцов до разрушения; *б* – диаграмма распределения модуля упругости; *в* – диаграмма распределения предела прочности

Испытание образцов гибридного строения

В данном разделе рассматриваются вопросы совместной работы проволоки и углеродного волокна в составе гибридного композита с полимерной матрицей. Методом TFP изготовлены преформы образцов, в которых разнородные армирующие волокна представлены в разном процентном соотношении.

На первом этапе в качестве армирующих волокон были взяты низкопрочная проволока «Gamma DR-3» с пределом прочности $\sigma_g = 632$ МПа и углеровинг UMT49 с пределом прочности $\sigma_g = 3712$ МПа [7].

На рис. 9 изображены гистограммы и диаграммы распределения предела прочности при растяжении образцов на основе волокна UMT49 и проволоки «Gamma DR-3» при коэффициенте наполнения металлическими волокнами K_M и углеволокном K_C в общем объёме гибрида, соответственно: *a* – $K_M = 7,5\%$; $K_C = 42,5\%$; *б* – $K_M = 16,5\%$; $K_C = 33,5\%$.

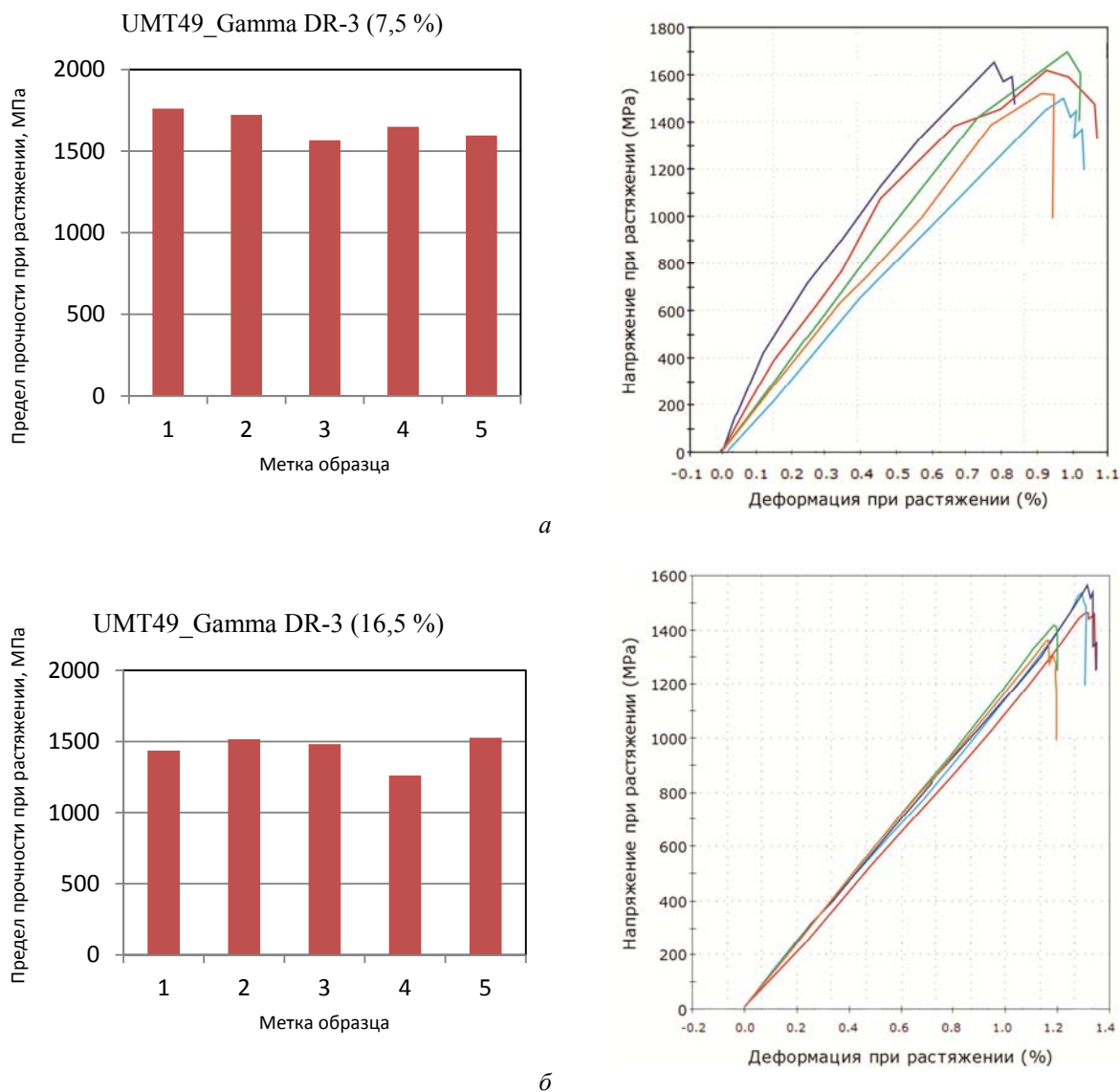


Рис. 9. Гистограммы и диаграммы испытаний гибридных образцов на основе низкопрочной проволоки с шагом стежка 6 мм и объёмным содержанием металла: *a* – 7,5%; *б* – 16,5%

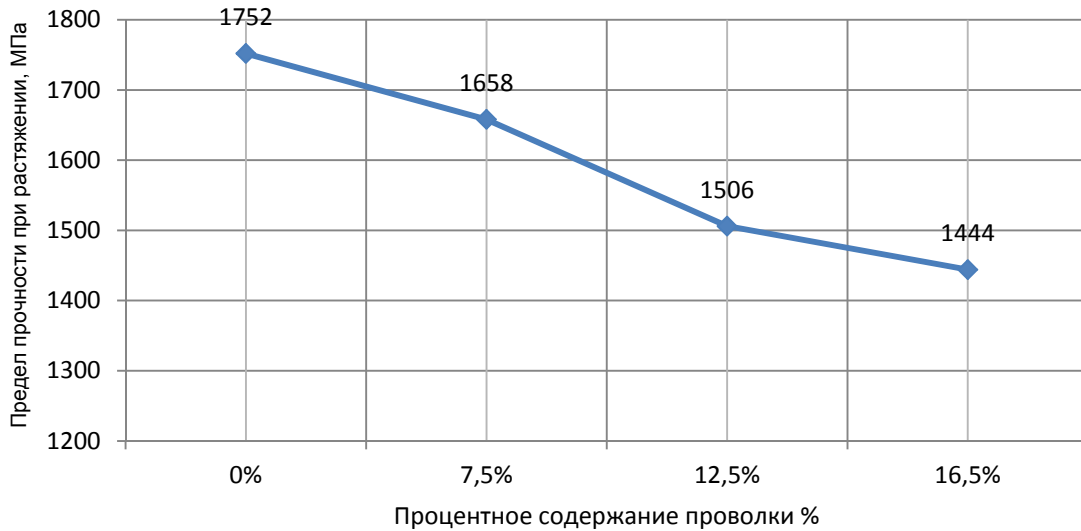


Рис. 10. Гистограмма сопоставления предельных напряжений для образцов с разным содержанием металла 0%; 7,5%; 12,5%; 16,5%

На рис. 10 представлена гистограмма зависимости предельных напряжений от содержания металла в гибридном образце с шагом стежка 6 мм.

На втором этапе в качестве металлической арматуры была использована проволока марки У9А (\varnothing 0,15 мм) с высокими механическими свойствами $\sigma_g = 3382$ МПа. Углеровинг использовался прежний. На рис. 11 представлены результаты испытаний образцов с минимальным и максимальным наполнением композита проволокой, а также гистограмма для разного процентного наполнения проволоки в объеме композита.

Анализ графиков, представленных на рис. 9; 10, показывает, что с увеличением объема низкопрочной проволоки прочность образцов падает. При этом наблюдается следующая закономерность: в среднем при увеличении процентного наполнения проволокой на 4% значение предела прочности композита уменьшается на 4,3% от нулевого наполнения проволоки. Диаграммы зависимости напряжений от деформаций имеют характерный для гибридных материалов вид. Для композитных образцов, армированных высокопрочной проволокой, зависимость прочности от соотношений между компонентами в армирующей композиции незначительна. Это можно объяснить тем, что в гибридной композиции использовались два соизмеримых по своим механическим характеристикам компонента – высокопрочная проволока и углеволокно.

Таким образом, замена одного высокопрочного компонента на другой не привела к существенным изменениям. Однако общий уровень прочности оказался несколько ниже, чем в гибриде с низкопрочной проволокой. Этот факт можно объяснить тем, что высокопрочная проволока в процессе намотки на транспортировочную бобину деформируется и при дальнейшей укладке на подложку в составе гибридного ровинга не сохраняет своей прямолинейности (рис. 12). В дальнейшей работе необходимо решить задачу сохранения прямолинейности высокопрочной проволоки при выкладке.

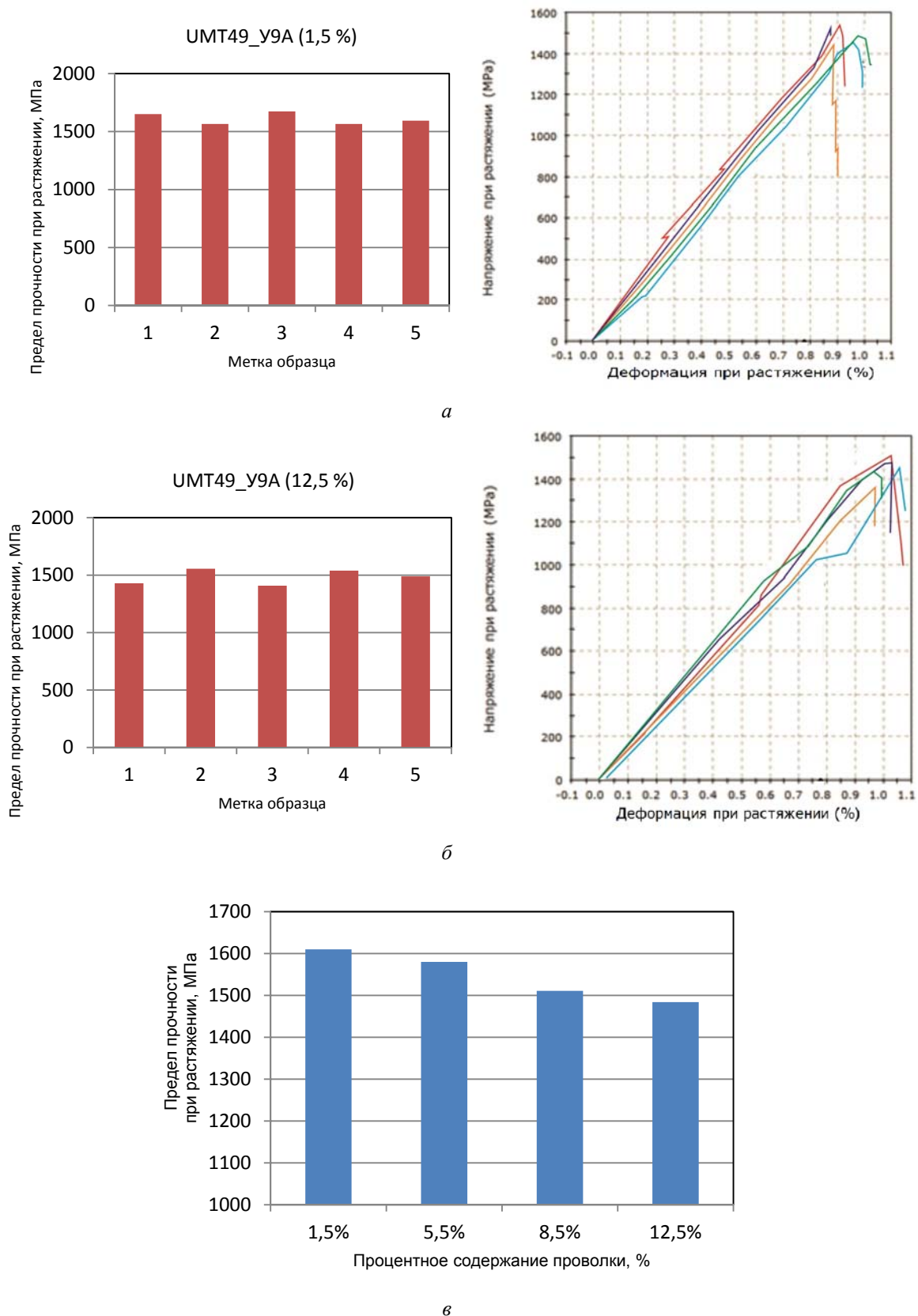


Рис. 11. Результаты испытания образцов на основе высокопрочной проволоки У9А с объёмным содержанием высокопрочного металла:
 а – 1,5%; б – 12,5%; в – гистограмма для разного процентного наполнения проволоки в объёме композита

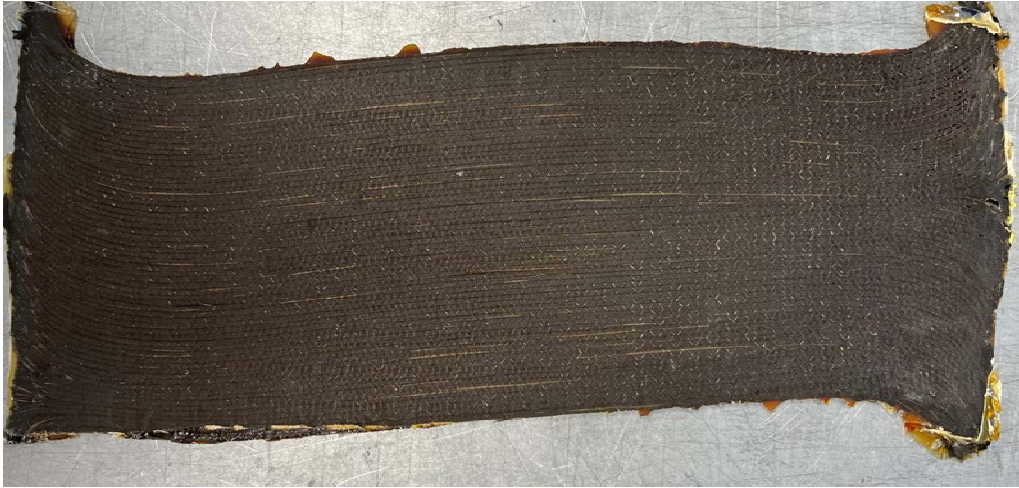


Рис. 12. Вид необработанной пластины с гибридным наполнением высокопрочной проволокой



a



б

Рис. 13. Характер поведения материала при разрушении:
a – образец с низким содержанием металла; *б* – образец с высоким содержанием металла

Схема взаимодействия разнородных волокон в композите малоизучена. Большая разница в упругих свойствах может иметь как отрицательный, так и положительный эффект. На рис. 13 видно, что образец с низким наполнением проволокой имеет схожий вид разрушения с образцами, выполненными только из углеродного волокна. Характерным является резкое падение несущей способности материала после разрушения углепластиковой основы материала. При дальнейшем увеличении наполнения проволокой образец разрушается не так катастрофически. Образцы с высоким содержанием металлической проволоки в некотором роде сохраняют свою кратковременную несущую способность.

Заключение

Из проведённых экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Проволока из низкопрочной стали более технологична. Её можно уложить на заданную траекторию с достаточной точностью. Высокопрочная проволока за счёт своей упругости воздействует на подложку. В результате траектория её укладки отклоняется от номинальной. Например, в случае подготовки преформы с укладкой 0° углеродные волокна прямолинейны, а металлические волокна имеют искривления. Как следствие – прочность гибридного материала снижается.

Можно предположить следующие пути решения проблемы:

- использовать высокопрочную проволоку сверхмалого диаметра: 0,03...0,1 мм;
- в качестве подложки в процессе укладки применять не ткань, а арамидную бумагу;
- модернизировать процесс вышивки и подавать проволоку не с катушек, а из устройства, обеспечивающего волокну прямолинейность.

2. Шаг пристёгивания волокна к подложке необходимо выбирать индивидуально, в зависимости от технологических свойств армирующих волокон. Короткий стежок приводит к значительному повреждению волокна. Длинный стежок не обеспечивает заданную траекторию укладки.

3. Образцы на базе преформы TFR, изготовленные отдельно и механической обработкой из пластины, показывают сопоставимые прочностные характеристики.

4. Композит на основе только металлического волокна в полимерной матрице показывает характеристики ниже ожидаемых. Предположительно это можно объяснить невысоким сцеплением между волокном и матрицей.

5. Исследования влияния объёмного содержания углеродного и металлического волокна на прочность показывают ожидаемые результаты – с увеличением количества металла механические характеристики композита на растяжение падают. Если учитывать удельные показатели, то снижение весовой эффективности будет ещё больше. С другой стороны, просматривается возможность применения волокнистых металлокомпозитов в конструкциях, которым необходимо обеспечить кратковременную живучесть за счёт иного механизма разрушения гибридного материала.

Исправление этих погрешностей является ключевой задачей совершенствования технологии TFR применительно к созданию гибридов. Существенно повлиять на ситуацию может применение металлических волокон сверхмалого диаметра, а также увеличение адгезионного сцепления арматуры и матрицы.

Снижение прочности гибрида в сравнении с углепластиком является ожидаемым, но на самом деле оценку эффективности необходимо проводить при сопоставлении с существующими соединениями металл – углепластик с дискретной границей раздела между ними.

Принципиально метод направленной укладки волокна позволяет создавать преформы гибридного типа, включающие углеродные и металлические волокна, в автоматическом режиме с минимумом ручных операций. Метод инфузии подходит для пропитки и формования композита на основе гибридной преформы.

Таким образом, появляется перспектива создания композитных конструкций с обеспечением высокого сопротивления контактными напряжениями, то есть с зонами, удобными для выполнения соединений, с ожидаемыми высокими показателями ударостойкости, электро- и теплопроводности.

Библиографический список

1. Комаров В.А. Проектирование силовых аддитивных конструкций: теоретические основы // *Онтология проектирования*. 2017. Т. 7, № 2 (24). С. 191-206. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-2-191-206
2. Комаров В.А. Конструкция и материал // *Онтология проектирования*. 2023. Т. 13, № 2 (48). С. 175-191. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-175-191
3. Шабалин Л.П., Савинов Д.В., Пузырецкий Е.А., Марескин И.В. Разработка методики расчёта напряжённо-деформированного состояния, оптимизации и экспериментального исследования гибридной конструкции композит-металлической лопасти тягового винта // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2022. № 2. С. 35-42.
4. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В. Исследование пожаростойкости слоистых гибридных алюмокомпозитов класса СИАЛ // *Труды ВИАМ*. 2013. № 3.
5. Постнова М.В., Постнов В.И. Роль структур МПКМ и их влияние на виброусталостные характеристики конструктивных элементов ГТД // *Труды ВИАМ*. 2017. № 1 (49). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-7-7
6. Халиулин В.И., Батраков В.В., Петров П.А. Постановка задачи и исследование армирующих компонентов для создания композитных гибридных конструкций // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника* 2022. № 4. С. 184-193.
7. Benedict A.V. An experimental investigation of GLARE and restructured fiber metal laminates. Master's thesis. Daytona Beach, 2012. 103 p.
8. Unal P.G. 3D woven fabrics // *Woven Fabrics*. 2012. P. 91-120. DOI: 10.5772/37492
9. Carvelli V., Ventura G., Poggi C. 3D reinforcement of composite materials. Master's thesis. Milan, 2011. 79 p.
10. Нелюб В.А., Гращенков Д.В., Коган Д.И., Соколов И.А. Применение прямых методов формования при производстве крупногабаритных деталей из стеклопластиков // *Химическая технология*. 2012. Т. 13, № 12. С. 735-739.
11. Чурсова Л.В., Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. Особенности технологии изготовления деталей из композиционных материалов методом пропитки под давлением // *Сб. тезисов докладов межотраслевой научно-технической конференции «Композиционные материалы в авиакосмическом материаловедении»* (17 февраля 2009 г., Москва). М.: ВИАМ, 2009. С. 17.
12. Gliesche K. Application of the tailored fibre placement (TFP) process for a local reinforcement on an «open-hole» tension plate from carbon/epoxy laminates // *Composites Science and Technology*. 2003. V. 63, Iss. 1. P. 81-88. DOI: 10.1016/s0266-3538(02)00178-1
13. Карташова Е.Д., Муйземнек А.Ю. Технологические дефекты полимерных слоистых композиционных материалов // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2017. № 2 (42). С. 79-89. DOI: 10.21685/2072-3059-2017-2-7
14. Coppola A.M., Huelskamp S.R., Tanner C., Rapping D., Ricchi R.D. Application of tailored fiber placement to fabricate automotive composite components with complex geometries // *Composite Structures*. 2023. V. 313. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.116855
15. Spickenheuer A., Leippranda A., Bittricha L., Uhlig K., Richtera E., Heinricha G. Process-dependent material properties for structural simulation of composites made by tailored fibre placement // *Proceedings of the ECCM16-16th European conference on composite materials* (June, 22-26, 2014, Seville, Spain).
16. Makhkamov N.Y., Yusupov G.U. Properties of metal-based and nonmetal-based composite materials // *Theoretical & Applied Science*. 2020. V. 86, Iss. 6. P. 629-634. DOI: 10.15863/tas.2020.06.86.115

17. Bigg D.M. Mechanical, thermal, and electrical properties of metal fiber-filled polymer composites // *Polymer Engineering & Science*. 1979. V. 19, Iss. 16. P. 1188-1192. DOI: 10.1002/pen.760191610

18. Carbas R.J.C., Palmares M.P., da Silva L.F.M. Experimental and FE study of hybrid laminates aluminium carbon-fibre joints with different lay-up configurations // *Manufacturing Review*. 2020. V. 7. DOI: 10.1051/mfreview/2019027

EXPLORATORY ANALYSIS OF HYBRID POLYMER METAL-COMPOSITE STRUCTURES

© 2023

V. I. Khaliulin Doctor of Science (Engineering), Head of the Department of Aircraft Production;
Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev, Kazan, Russian Federation;
pla.kai@mail.ru

P. A. Petrov Engineer; Center of Composite Technologies;
Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev, Kazan, Russian Federation;
13petrof@mail.ru

V. A. Kostin Doctor of Science (Engineering), Head of the Department of Structural Strength;
Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev, Kazan, Russian Federation;
VAKostin@kai.ru

N. V. Levshonkov Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Aircraft Construction and Design;
Kazan National Research Technical University
named after A. N. Tupolev, Kazan, Russian Federation;
n-levshonkov@mail.ru

The results of research in the field of development of technology for the manufacture of hybrid composites according to the scheme of directional fiber netting are presented. Reinforcement is carried out by combining carbon fibers and metal wire, impregnation with a polymer binder by infusion. The results of experimental evaluation of the tensile strength of composites reinforced only with wire, as well as hybrid samples with different percentages of carbon and metal fibers are presented. A significant dependence of the strength of the hybrid composite on the volume ratios of reinforcing materials and technological factors has been established. Design and technology recommendations aimed at improving the functional parameters of the hybrid composite are formulated.

Hybrid composites; programmable reinforcement; preform parameters; strength; metal-polymer

Citation: Khaliulin V.I., Petrov P.A., Kostin V.A., Levshonkov N.V. Exploratory analysis of hybrid polymer metal-composite structures. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2023. V. 22, no. 3. P. 160-175. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-3-160-175

References

1. Komarov V.A. Theoretical basis for design of load-bearing structures produced using additive technologies. *Ontology of Designing*. 2017. V. 7, no. 2 (24). P. 191-206. (In Russ.). DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-2-191-206

2. Komarov V.A. Design and material. *Ontology of Designing*. 2023. V. 13, no. 2 (48). P. 175-191. (In Russ.). DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-175-191

3. Shabalin L.P., Savinov D.V., Puzyretskii E.A., Mareskin I.V. A technique for stress-strain state analysis, optimization and experimental study of a hybrid composite-metal

propeller blade. *Russian Aeronautics*. 2022. V. 65, Iss. 2. P. 260-267. DOI: 10.3103/S1068799822020052

4. Antipov V.V., Senatorova O.G., Sidelnikov V.V. Investigation of fire resistance of hybrid aluminium-glassplastic SIAL laminates. *Trudy VIAM*. 2013. No. 3. (In Russ.)

5. Postnova M.V., Postnov V.I. Role of MPCM structures and their effect on vibration fatigue characteristics of gte constructive components. *Trudy VIAM*. 2017. No. 1 (49). (In Russ.). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-7-7

6. Khaliulin V.I., Batrakov V.V., Petrov P.A. Problem description and a study of reinforcement components to produce composite hybrid structures. *Russian Aeronautics*. 2022 V. 65, Iss. 4. P. 843-854. DOI: 10.3103/S1068799822040250

7. Benedict A.V. An experimental investigation of GLARE and restructured fiber metal laminates. Master's thesis. Daytona Beach, 2012. 103 p.

8. Unal P.G. 3D woven fabrics. *Woven Fabrics*. 2012. P. 91-120. DOI: 10.5772/37492

9. Carvelli V., Ventura G., Poggi C. 3D reinforcement of composite materials. Master's thesis. Milan, 2011. 79 p.

10. Nelyub V.A., Grashchenkov D.V., Kogan D.I., Sokolov I.A. Use experience of direct formation methods in case of production of big glass-reinforced plastic parts. *Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2012. V. 13, no. 12. P. 735-739. (In Russ.)

11. Chursova L.V., Dushin M.I., Khrul'kov A.V., Mukhametov R.R. Osobennosti tekhnologii izgotovleniya detaley iz kompozitsionnykh materialov metodom propitki pod davleniem. *Sb. tezisov dokladov mezhotraslevoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Kompozitsionnye Materialy v Aviakosmicheskom Materialovedenii» (February, 17, 2009, Moscow)*. Moscow: VIAM Publ., 2009. P. 17. (In Russ.)

12. Gliesche K. Application of the tailored fibre placement (TFP) process for a local reinforcement on an «open-hole» tension plate from carbon/epoxy laminates. *Composites Science and Technology*. 2003. V. 63, Iss. 1. P. 81-88. DOI: 10.1016/s0266-3538(02)00178-1

13. Kartashova E.D., Muzemnek A.Yu. Technological defects of polymeric layered composite materials. *University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences*. 2017. No. 2 (42). P. 79-89. (In Russ.). DOI: 10.21685/2072-3059-2017-2-7

14. Coppola A.M., Huelskamp S.R., Tanner C., Rapping D., Ricchi R.D. Application of tailored fiber placement to fabricate automotive composite components with complex geometries. *Composite Structures*. 2023. V. 313. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.116855

15. Spickenheuer A., Leippranda A., Bittricha L., Uhlige K., Richtera E., Heinricha G. Process-dependent material properties for structural simulation of composites made by tailored fibre placement. *Proceedings of the ECCM16-16th European conference on composite materials (June, 22-26, 2014, Seville, Spain)*.

16. Makhkamov N.Y., Yusupov G.U. Properties of metal-based and nonmetal-based composite materials. *Theoretical & Applied Science*. 2020. V. 86, Iss. 6. P. 629-634. DOI: 10.15863/tas.2020.06.86.115

17. Bigg D.M. Mechanical, thermal, and electrical properties of metal fiber-filled polymer composites. *Polymer Engineering & Science*. 1979. V. 19, Iss. 16. P. 1188-1192. DOI: 10.1002/pen.760191610

18. Carbas R.J.C., Palmares M.P., da Silva L.F.M. Experimental and FE study of hybrid laminates aluminium carbon-fibre joints with different lay-up configurations. *Manufacturing Review*. 2020. V. 7. DOI: 10.1051/mfreview/2019027