

Научная статья

УДК 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-77-86

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ СВЯЗУЮЩЕГО В УГЛЕПЛАСТИКАХ НА ИХ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

С.И. Мишкин¹, Л.С. Жакова¹, О.Н. Клименко¹, Е.А. Васильчук¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований основных механических свойств конструкционных углепластиков на основе углеродного среднемодульного жгутового и углеродного тканого наполнителей и эпоксидной высокодеформативной полимерной матрицы в зависимости от массового содержания в них связующего, которое определяли методом травления. Установлено, что механическая характеристика одного и того же углепластика может изменяться до 20 %. Показано, что для исследуемых композиций оптимальным является содержание связующего на уровне 33–34 % (по массе).

Ключевые слова: углепластик, травление, углеродный наполнитель, содержание связующего в углепластике, механические характеристики, терморезактивное связующее, термопласт, автоклавное формование

Для цитирования: Мишкин С.И., Жакова Л.С., Клименко О.Н., Васильчук Е.А. Исследование влияния содержания связующего в углепластиках на их механические свойства // Труды ВИАМ. 2023. № 2 (120). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-77-86.

Scientific article

RESEARCH OF INFLUENCE OF THE CONTENTS RESIN IN CFRP ON THEIR MECHANICAL PROPERTIES

S.I. Mishkin¹, L.S. Zhakova¹, O.N. Klimenko¹, E.A. Vasilchuk¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Research results on definition of the main mechanical properties constructional CFRP based on the carbon medium-modulus carbon fillers and woven carbon fillers and epoxy polymeric matrix depending on the mass contents are provided to them resin which determined by etching method. It is established that the mechanical characteristic same CFRP can change to 20 %. It is shown that for investigated CFRP the optimum contents resin is 33–34 mass of %.

Keywords: CFRP, thermo-oxidative destruction, carbon filler, resin content in CFRP, mechanical properties, thermosetting resin, thermoplastic, autoclave formation

For citation: Mishkin S.I., Zhakova L.S., Klimenko O.N., Vasilchuk E.A. Research of influence of the contents resin in CFRP on their mechanical properties. *Trudy VIAM*, 2023, no. 2 (120), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-77-86.

Введение

В настоящее время в мире наблюдается увеличение производства углеродных волокон благодаря широкому использованию углепластиков при изготовлении различных

деталей самолетов, авиационных двигателей, спортивного инвентаря, автомобилей и других изделий [1–3]. Применение углепластиков в специальных отраслях промышленности связано с их уникальными свойствами. В первую очередь это небольшая масса и высокие прочностные характеристики, что позволяет композитам конкурировать с традиционными металлами. Высокие значения модуля упругости способствуют тому, что углепластик становится незаменимым материалом для изготовления многих конструкций. Преимуществом углепластиков также является их стойкость к климатическим воздействиям, агрессивным средам, вибрационным нагрузкам и истиранию в различных температурных условиях (в Арктике, условиях тропического климата) [3–5].

Свойства углепластиков, в том числе их механические характеристики, зависят не только от качества исходного связующего и углеродного наполнителя, но и от технологии изготовления препрега на пропиточной машине. Следует отметить: для полной пропитки углеродных филаментов в жгуте необходимо, чтобы связующее имело требуемую вязкость, а пропиточная машина равномерно его распределяла по всей ширине препрега [6, 7]. Однако этого сложно добиться не только из-за несовершенства элементов конструкции пропиточных установок, но и ввиду изменчивости вязкости расплава связующего в течение процесса пропитки, а также из-за отклонения значений поверхностной плотности наполнителя (которое может достигать 5 %) от номинального значения [7, 8]. Все указанные факторы приводят к тому, что производители препрегов вынуждены указывать в технических условиях (ТУ) на продукцию, что содержание связующего в препреге может изменяться до ± 4 % (по массе). Например, показатель 34 ± 4 % (по массе) означает, что содержание связующего внутри одного рулона препрега в разных местах может быть различным и отличаться на 8 % (по массе). Разным может быть и нанос связующего в сравнении с наносом в другом рулоне в одной и той же партии, и это будет соответствовать ТУ на материал. Несмотря на то что в результате происходит усреднение значений показателя по содержанию связующего при наборе слоев препрега, наблюдаются существенные различия в массе заготовок для формования углепластиков.

Следует также отметить, что при формовании углепластиков из препрегов необходимо знать о поведении связующего при различных температурах, поскольку это влияет на технологию изготовления композитов. Режим формования углепластика оказывает влияние на количество связующего, которое в нем останется от его исходного содержания в препреге. Неправильно выбранное время подачи давления или температура формования могут способствовать удалению связующего из препрега или получению углепластика ненадлежащего качества по уровню пористости, значениям плотности и монослоя, что повлияет на механические свойства композита [8, 9].

Определение количества полимерной матрицы в углеродных полимерных композиционных материалах является сложной задачей, в отличие от стеклопластиков, содержание связующего в которых определяют выжиганием. В статье [10] показано, что определение соотношения волокнистого наполнителя и полимерной части данным методом для углепластиков невозможно ввиду разрушения углеродного волокна под действием кислорода или из-за образования в среде инертного газа коксового остатка, который не позволяет сделать расчет. Самый простой метод определения количества связующего в углепластике – расчетный, но его точность дает возможность получать лишь приблизительные значения показателя.

Травление в сильных окислителях является наиболее достоверным и широко применяемым методом определения содержания связующего в углепластике. Под действием серной кислоты и перекиси водорода полимерная матрица подвергается химическому разложению без повреждения углеродного наполнителя [9]. Полученные

результаты травления позволяют путем расчета получить значение объемной доли пор в отформованном углепластике, что является показателем его качества. Для автоклавного формования данный показатель не должен превышать 1 % [8].

Основные механические свойства разрабатываемого углепластика можно задавать на стадии выбора углеродного наполнителя. Например, предел прочности и модуль упругости при растяжении данного композита в первую очередь зависят от механических характеристик применяемого углеродного наполнителя [8]. Принято считать, что оптимальным является соотношение системы «связующее/наполнитель» как 40/60 % (объемн.) [6]. Следует учитывать значения плотности углеродного волокна и связующего для расчета их массового соотношения. Для расчета теоретической прочности и модуля упругости углепластика используют «правило смеси», при котором пренебрегают вкладом связующего в прочность композита и учитывают только их соотношение в объеме [6].

Предел прочности при сжатии является комплексной характеристикой, значение которой в большей степени зависит от свойств углеродного наполнителя, однако и роль связующего при этом существенная. Влияние оказывают взаимодействие на границе фаз «волокно–связующее», содержание связующего в углепластике, наличие дефектов и др. [6, 11].

Предел прочности при межслойном сдвиге в основном зависит от взаимодействия на границе фаз «волокно–связующее». Важно средство аппрета углеродного волокна и полимерной матрицы при их оптимальном соотношении в углепластике [6, 12].

Цель данной работы – изучение зависимости основных механических свойств конструкционных углепластиков на основе жгутового и тканого наполнителей от содержания высокодеформативного расплавленного связующего в композитах, полученного методом травления, с определением их оптимального соотношения.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Материалы и методы

Аппаратура

Пропитку углеродного наполнителя производили на пропиточной машине с наносом связующего с двух его сторон.

Углепластики формовали автоклавным методом по ранее отработанному режиму. Метод автоклавного формования имеет широкое распространение при производстве ответственных деталей, в том числе в авиационной промышленности. При формовании по периметру углепластиковой заготовки устанавливали герметизирующий жгут для исключения вытекания связующего по бокам.

Объекты исследования

В работе в качестве объектов изучения использовали препреги углепластика:

– на основе среднемодульного углеродного жгутового наполнителя марки SYT55(S)-12K, свойства которого аналогичны свойствам волокна типа T-800, и эпоксидного связующего, в составе которого >25 % (по массе) термопласта;

– на основе углеродной равнопрочной ткани марки ВТкУ-2.200 (тип плетения – саржа), произведенной из высокопрочного волокна марки SYT45(S)-3K, свойства которого аналогичны свойствам волокна типа T-300, и эпоксидного связующего, в составе которого >25 % (по массе) термопласта. Поверхностная плотность ткани составляет 200 ± 10 г/м².

Методы исследования

Для определения количества наполнителя и полимерного связующего в составе углепластика использовали метод травления согласно ГОСТ Р 56682–2015 [12]. Масса образцов составляла от $0,9 \pm 0,1$ г.

Предел прочности и модуль упругости при растяжении определяли согласно ASTM D 3039 [13] при температуре 23 ± 3 °С и скорости приложения нагрузки 1 мм/мин. Толщина плит из однонаправленного жгутового углепластика составляла $1,0 \pm 0,2$ мм, а из углепластика на основе тканого наполнителя $2,6 \pm 0,2$ мм. В обоих случаях применяли укладку [0].

Предел прочности при сжатии определяли согласно ASTM D 6641 [14] при температуре 23 ± 3 °С и скорости приложения нагрузки 1 мм/мин. Толщина плит из жгутового углепластика составляла $2,3 \pm 0,2$ мм, использовали симметричную укладку [0/90]. Толщина плит из углепластика на основе тканого наполнителя составляла $2,6 \pm 0,2$ мм, использовали симметричную укладку [0].

Предел прочности при межслойном сдвиге определяли согласно ASTM D 2344 [15] при температуре 23 ± 3 °С и скорости приложения нагрузки 1 мм/мин. Толщина плит из однонаправленного жгутового углепластика составляла $2,5 \pm 0,2$ мм, а из углепластика на основе тканого наполнителя $2,6 \pm 0,2$ мм. В обоих случаях применяли укладку [0].

Результаты и обсуждение

Согласно методикам, представленным в стандартах ASTM, по определению механических характеристик углепластиков, из отформованных плит вырезали по 6 образцов для каждого испытания. Содержание связующего в углепластике определяли методом травления образцов, вырезанных из тех же плит композита, что и образцы для испытания. На рис. 1 приведены графики изменения предела прочности при растяжении каждого образца (синие точки показывают индивидуальные значения образца, красная кривая соединяет средние арифметические значения) для жгутового и тканого углепластиков.

На рис. 1, а показано, как предел прочности при растяжении образцов из жгутового углепластика изменяется при содержании связующего в диапазоне от 31 до 35,8 % (по массе). Значение данного параметра находится приблизительно на одном уровне с диапазоном значений в статистической погрешности. При формировании углепластика использование препрега с наносом $>36,5$ % (по массе) приводит к снижению значений предела прочности при растяжении на 15 %. Данную зависимость можно объяснить «правилом смеси». Поскольку в углепластике основные показатели прочности зависят от характеристик углеродного наполнителя, то прочностью полимерной матрицы можно пренебречь ввиду ее малых значений по сравнению с углеродным волокном. При увеличении содержания связующего в углепластике количество углеродного волокна уменьшается, что приводит к снижению прочности при одинаковых условиях формирования углепластика.

На рис. 1, б показано, что предел прочности при растяжении образцов из углепластика на основе равнопрочной ткани марки ВТкУ-2.200 с содержанием связующего в диапазоне от 32 до 37 % (по массе) практически линейно снижается. Это можно объяснить постепенным уменьшением содержания наполнителя в композите. Разница в значении предела прочности при растяжении в углепластике при формировании из препрега с наносом 32 и 37 % (по массе) может составлять >20 %, что необходимо учитывать при выходном контроле препрегов и при утверждении показателей в ТУ на материал.

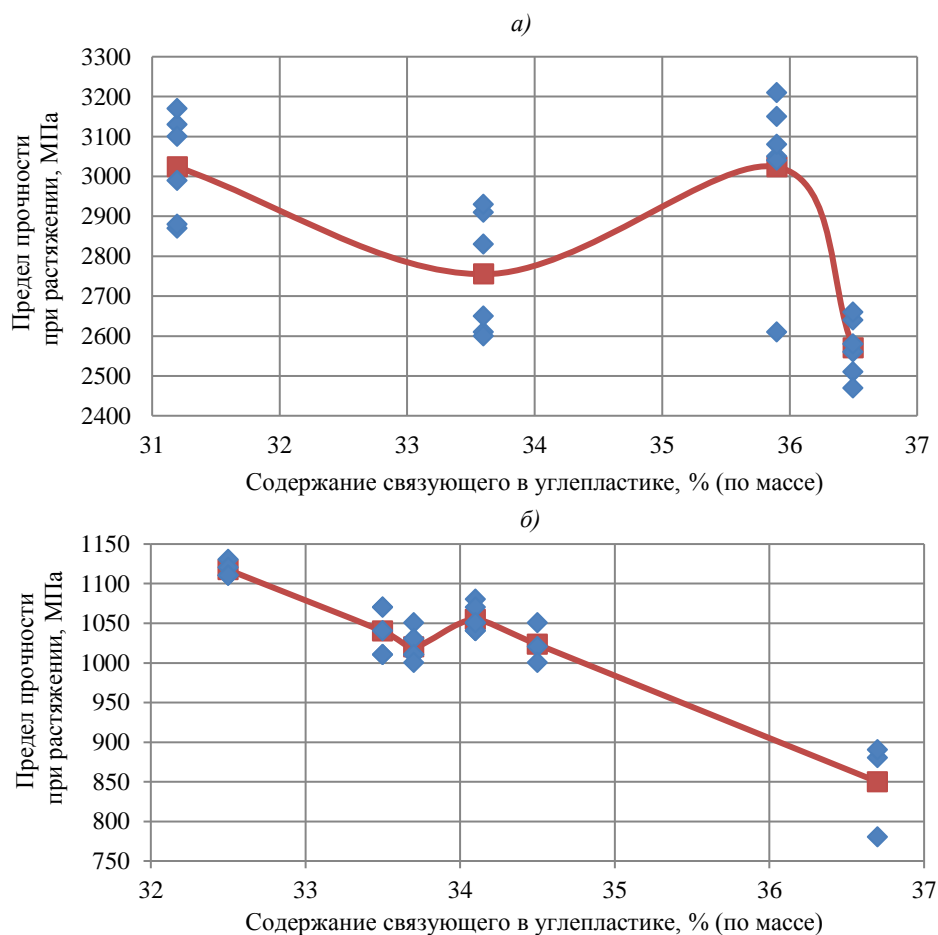
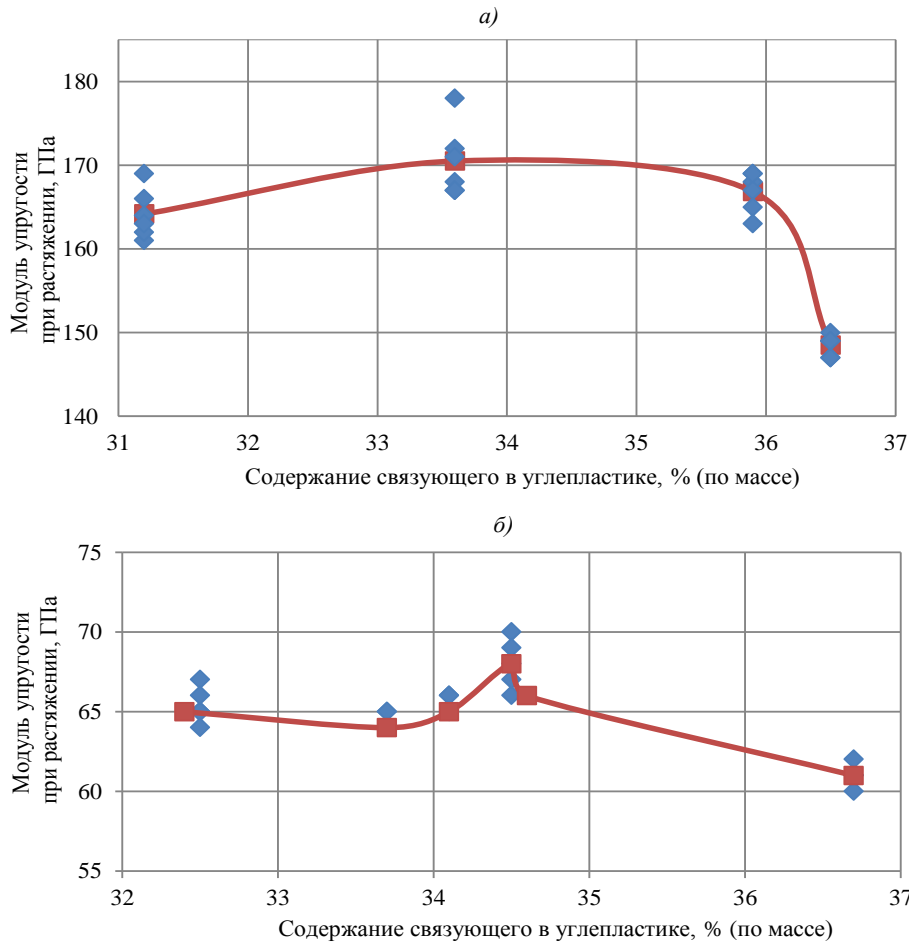


Рис. 1. Зависимость предела прочности при растяжении образцов из углепластика на основе жгутового наполнителя марки SYT55(S)-12K (а) и равнопрочной ткани марки BTkY-2.200 (б) от содержания связующего в композите

Таким образом, для однонаправленного жгутового материала характерно более резкое снижение значений предела прочности при растяжении при превышении некоего критического значения содержания связующего, а для углепластика на основе тканого наполнителя наблюдается постепенное уменьшение значений данного показателя.

Аналогичную зависимость от содержания связующего можно наблюдать у углепластиков и для такой характеристики, как модуль упругости при растяжении. На рис. 2, а показано, что модуль упругости при растяжении образцов из углепластика на основе углеродного среднемодульного волокна марки SYT55(S)-12K при содержании связующего в диапазоне от 31,0 до 35,8 % (по массе) находится приблизительно на одном уровне. При дальнейшем увеличении количества связующего в композите происходит снижение данного показателя на 15 %. Эту зависимость также можно объяснить «правилом смеси», поскольку значение модуля упругости исходного углеродного волокна на порядок больше, чем у полимерной матрицы.

На рис. 2, б показано, что модуль упругости при растяжении образцов из углепластика на основе равнопрочной ткани марки BTkY-2.200 демонстрирует постепенное снижение значений с увеличением содержания связующего в композите. Небольшие скачки значений модуля упругости находятся в допустимом диапазоне погрешности измерений, однако все же общее уменьшение показателей данного параметра может составить до 10 %.



связующего 33–34 % (по массе) наблюдаем максимальные значения данной характеристики, которые уменьшаются (до 10 %) с увеличением количества полимерной матрицы в материале, что подтверждает теоретический механизм разрушения углепластика, приведенный ранее.

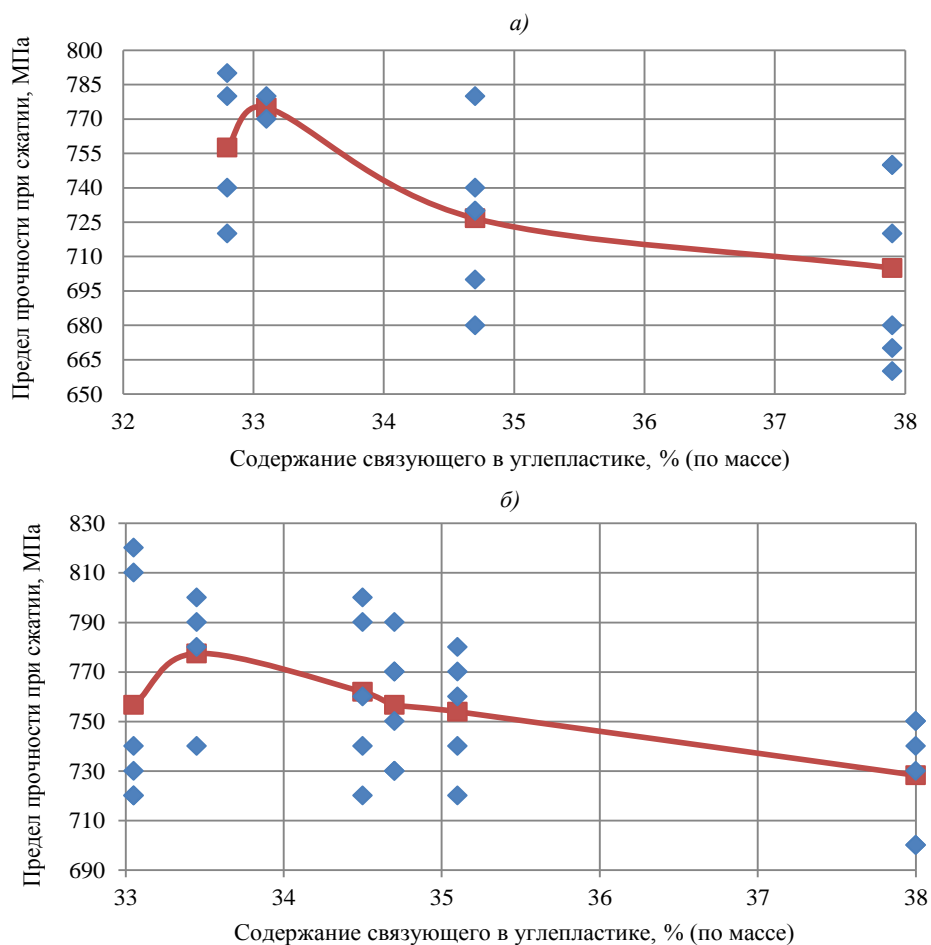


Рис. 3. Зависимость предела прочности при сжатии образцов из углепластика на основе жгутового наполнителя марки SYT55(S)-12K (а) и равнопрочной ткани марки ВТкУ-2.200 (б) от содержания связующего в композите

Еще одной характеристикой углепластика, зависимой от свойств матрицы, является предел прочности при межслойном сдвиге. Важно также найти оптимальное содержание связующего в композите. Участки углепластика, которые не пропитаны связующим, не будут образовывать межфазное взаимодействие «углеродное волокно–полимерное связующее», что приведет к уменьшению показателя межслойной прочности. Однако избыток связующего способствует увеличению расстояния между слоями препрегов и уменьшению межфазного взаимодействия.

На рис. 4 показана зависимость предела прочности при межслойной сдвиге от содержания связующего как для однонаправленного жгутового материала, так и для углепластика на основе тканого наполнителя, графики которой схожи с графиками по пределу прочности при сжатии. Для обоих углепластиков при содержании связующего 33–34 % (по массе) наблюдаются максимальные значения данной характеристики, а дальнейшее увеличение доли связующего в углепластике приводит к снижению значений данного параметра (до 5–7 %).

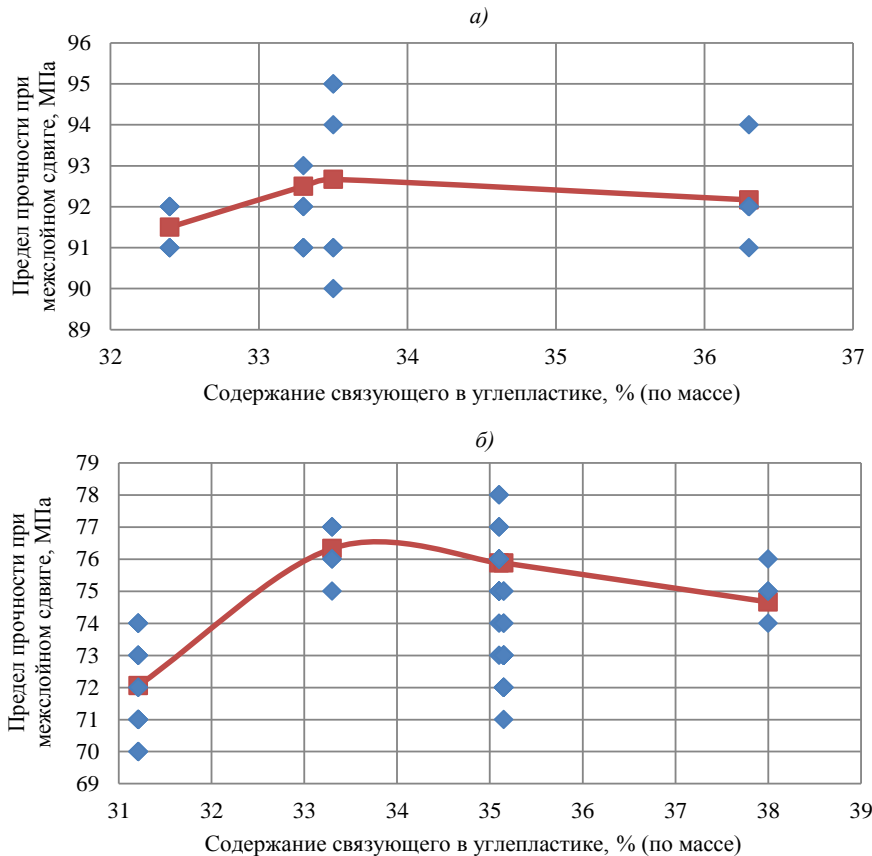


Рис. 4. Зависимость предела прочности при межслойном сдвиге образцов из углепластика на основе жгутового наполнителя марки SYT55(S)-12K (а) и равнопрочной ткани марки ВТкУ-2.200 (б) от содержания связующего в композите

Заключения

При производстве препрегов углепластиков допускается нанос связующего с отклонением до ± 4 % (по массе). Однако необходимо учитывать, что механические характеристики одного и того же углепластика могут изменяться в зависимости от содержания связующего в нем и соотношения компонентов в материале. Кроме того, важно контролировать содержание связующего не только в препреге, но и в углепластике, так как в зависимости от технологии формования может наблюдаться вытекание связующего, что изменит соотношение компонентов.

Исследования показали, что углепластик на основе углеродного среднемодульного волокна и углепластик на основе тканого наполнителя имеют схожие зависимости механических характеристик от содержания связующего. Значения предела прочности и модуля упругости при растяжении обоих углепластиков уменьшаются до 20 % при увеличении содержания связующего до >37 % (по массе).

Пределы прочности при сжатии и межслойном сдвиге имеют характерные максимальные значения свойств при содержании связующего 33–34 % (по массе) и показывают уменьшение данных механических показателей при недостатке связующего или его избытке (до 10 и 7 % соответственно).

Таким образом, проведенные исследования показали, что для достижения максимальных механических свойств рассмотренных в статье углепластиков требуется, чтобы содержание связующего в них составляло 33–34 % (по массе). Кроме того, при пропитке препрегов следует стремиться к нанесу связующего с меньшим отклонением по содержанию.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. № 5–6. С. 40–44.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2. № 2. С. 37–42.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
5. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
6. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы: учеб. пособие в 2 ч. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2013. Ч. 1. 118 с.
7. Колобков А.С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 6–7 (89). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
8. Гуняева А.Г., Сидорина А.И., Курносов А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porcher Ind. и Toho Tenax // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
9. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
10. Мишкин С.И., Малаховский С.С., Гуняева А.Г., Гуляев И.Н. Особенности определения содержания связующего в углепластиках на основе различных видов углеродных наполнителей методом выжигания // Труды ВИАМ. 2020. № 12 (94). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.07.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-59-66.
11. ГОСТ Р 56682–2015. Композиты полимерные и металлические. Методы определения объема матрицы, армирующего наполнителя и пустот. М.: Стандартиформ, 2016. 26 с.
12. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
13. ASTM D 3039 M-00. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM International, 2000. P. 1–13.
14. ASTM D 6641M-14. Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture. ASTM International, 2014. P. 1–9.
15. ASTM D 2344 M-16. Standard Test Method for Short Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates. ASTM International, 2016. P. 1–8.

References

1. Kablov E.N. Marketing of materials science, aircraft building and industry: present and future. *Direktor po marketingu i sbytu*, 2017, no. 5–6, pp. 40–44.
2. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Kablov E.N., Chursova L.V., Babin A.N., Mukhametov R.R., Panina N.N. Developments of FSUE "VIAM" in the field of melt binders for polymer composite materials. *Polimernye materialy i tehnologii*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 37–42.

4. Kablov E.N. Materials of a new generation and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
5. Grashchenkov D.V. Strategy of development of non-metallic materials, metal composite materials and heat-shielding. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
6. Bondaletova L.I., Bondaletov V.G. *Polymer composite materials: textbook at 2 parts*. Tomsk: Tomsk Publ. House Polytech. Univ., 2013, part 1, 118 p.
7. Kolobkov A.S. Polymer composite materials for various aircraft structures (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 12, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
8. Gunyaeva A.G., Sidorina A.I., Kurnosov A.O., Klimenko O.N. Polymeric composite materials of new generation on the basis of binder VSE-1212 and the filling agents alternative to ones of Porcher Ind. and Toho Tenax. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3 (52), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
9. Kondrashov S.V., Shashkeev K.A., Petrova G.N., Mekalina I.V. Constructional polymer composites with functional properties. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
10. Mishkin S.I., Malakhovskiy S.S., Gunyaeva A.G., Gulyaev I.N. Features of definition the resin content in carbon fiber reinforced plastics based on various types of carbon fillers by thermo-oxidative destruction method. *Trudy VIAM*, 2020, no. 12 (94), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 29, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-59-66.
11. State Standard R 56682–2015. *Polymer and metal composites. Methods for determining the volume of the matrix, reinforcing filler and voids*. Moscow: Standartinform, 2016, 26 p.
12. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
13. ASTM D 3039 M-00. *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. ASTM International, 2000, pp. 1–13.
14. ASTM D 6641M-14. *Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture*. ASTM International, 2014, pp. 1–9.
15. ASTM D 2344 M-16. *Standard Test Method for Short Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates*. ASTM International, 2016, pp. 1–8.

Информация об авторах

Мишкин Сергей Игоревич, старший научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Жакова Людмила Сергеевна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Клименко Оксана Николаевна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Васильчук Екатерина Александровна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Sergey I. Mishkin, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Lyudmila S. Zhakova, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Oksana N. Klimenko, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ekaterina A. Vasilchuk, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 18.08.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 24.08.2022.

The article was submitted 18.08.2022; approved and accepted for publication after reviewing 24.08.2022.