

УДК 678.83

Е.Н. Каблов¹, Г.С. Кулагина¹, Г.Ф. Железина¹, С.Л. Лонский¹, Е.В. Куршев¹

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО ОРГАНОПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ АРАМИДНЫХ ВОЛОКОН РУСАР-НТ И ЭПОКСИДНО-ПОЛИСУЛЬФОНОВОГО СВЯЗУЮЩЕГО

DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26

Исследован полимерный композиционный материал – однонаправленный органопластик на основе арамидного волокна Русар-НТ и расплавно-эпоксидно-полисульфонового связующего. Прочность при растяжении органопластика составляет 2060 МПа, модуль упругости 101 ГПа. Исследована микроструктура волокна и полимерной матрицы в образцах органопластика до и после испытаний при растяжении. Выявлены особенности формирования структуры связующего в зависимости от плотности упаковки волокон в органопластике. Изучен характер разрушения волокон и полимерной матрицы, вызванный одноосным растяжением.

Ключевые слова: однонаправленный органопластик, арамидное волокно Русар-НТ, расплавно-эпоксидное связующее, микроструктура.

Е.Н. Kablov¹, G.S. Kulagina¹, G.F. Zhelezina¹, S.L. Lonskii¹, E.V. Kurshev¹

MICROSTRUCTURE RESEARCH OF THE UNIDIRECTIONAL ORGANOPLASTIC BASED ON RUSAR-NT ARAMID FIBERS AND EPOXY-POLYSULFONE BINDER

This paper studies a polymer composite material – a unidirectional organoplastic based on Rusar-NT aramid fiber and a melt epoxy-polysulfone binder. Organoplastic has the following mechanical properties: tensile strength 2060 MPa, Young's modulus 101 GPa. The microstructure of the fiber and the polymer matrix in the organoplastic samples was studied before and after tensile tests. The features of the formation of the binder structure depending on the packing density of the fibers in organoplastics have been determined. The nature of the destruction of fibers and polymer matrix caused by the uniaxial tension has been studied.

Keywords: unidirectional organoplastic, aramid fibers Rusar-NT, melt binder, microstructure.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Конструкционные органопластики авиационного назначения – полимерные композиционные материалы, содержащие армирующий наполнитель из арамидных волокон и полимерное связующее [1–3]. В качестве армирующего наполнителя органопластиков используют арамидные ткани различной текстильной структуры, нити, жгуты из российских волокон марок СВМ и Руслан. Во ФГУП «ВИАМ» разработано более двадцати марок органопластиков (Органит 16Т, Органит 12Т(М)-Рус, Органит 11ТЛ, ВКО-19, ВКО-2ТБ, ВКО-22 и др.), преимуществами которых являются низкая плотность (1,35 г/см³), высокая прочность при растяжении, стойкость к ударным воздействиям и механическим по-

вреждениям. Основные тенденции развития современных органопластиков – это повышение их механических и эксплуатационных свойств благодаря армированию новыми устойчивыми к влаге арамидными волокнами (типа Русар-НТ), а также за счет применения расплавно-эпоксидной технологии изготовления препрегов. Использование расплавно-эпоксидных связующих позволяет снизить дефектность и пористость структуры полимерной матрицы по сравнению с растворными связующими [4–7].

Волокно Русар-НТ относится к третьему поколению российских арамидных волокон; оно характеризуется высокими физико-механическими свойствами (прочность нити в микропластике 5000–6000 МПа, модуль упругости 160–175 ГПа) и рекордно высокой

стойкостью к воздействию влаги среди арамидных волокон (водопоглощение в 2,5–5 раз меньше по сравнению с аналогичной характеристикой для серийно выпускаемых нитей марок СВМ и Руслан), имеет нейтральную реакцию водной вытяжки непосредственно после изготовления и не требует специальной стадии нейтрализации [8].

Для удовлетворения постоянно возрастающих требований к силовым элементам авиационных конструкций [9–13] и в соответствии с современными технологиями во ФГУП «ВИАМ» разработан новый однонаправленный органопластик на основе арамидных волокон Русар-НТ и расплавленного эпоксидного связующего, модифицированного термoplastичным модификатором – полисульфоном.

Отличительной особенностью однонаправленных арамидных органопластиков является высокая прочность при растяжении в направлении волокна – от 1300 до 2800 МПа в зависимости от технологии изготовления: сухая или мокрая намотка, выкладка однонаправленного препрега. Благодаря этому органопластики эффективно используются в конструкциях, испытывающих при эксплуатации критические растягивающие нагрузки: внешнее армирование сосудов высокого давления, корпуса авиационных ракет, сильно нагруженные детали вертолетов и самолетов и др. [2, 3, 14].

Для создания органопластиков, в которых максимально реализуются свойства компонентов, необходимым условием является обеспечение взаимодействия «арамидное волокно–полимерная матрица», а также принципиальное значение имеет структура полимерной матрицы.

В данной работе с целью получения информации о структурно-морфологической организации и для выявления особенностей характера разрушения однонаправленного органопластика на основе арамидного волокна Русар-НТ и полимерного эпоксидно-полисульфонового связующего детально исследовали микроструктуру волокна и полимерной матрицы до и после испытаний органопластика при растяжении.

Материалы и методы

Объектом исследования является однонаправленный органопластик на основе жгута из арамидного волокна российского производства Русар-НТ (ТУ2272-014-18059169–2015) и многокомпонентного связующего, в состав которого входят эпоксидные олигомеры, отвердитель, а также термoplastичный модификатор – полисульфон.

Использованный для армирования органопластика наполнитель представляет собой

жгут с линейной плотностью 600 текс (на основе неаппретированного волокна Русар-НТ), трощеный из десяти нитей, некрученный.

Многокомпонентное связующее имеет следующие характеристики [15, 16]:

Динамическая вязкость, Па·с, при температуре, °C:	
70	140
120	6
Температура реакции отверждения, °C	175
Температура стеклования отвержденного связующего, °C	185–190

Препрег шириной 1000 мм изготавливали на установке Coatema BL-2800 путем пропитки расплавом эпоксидного связующего параллельно расположенных жгутов из волокна Русар-НТ. Количество жгутов в препреге – в среднем 35 на 10 см. Массовая доля связующего в препреге составляет 37%, поверхностная плотность препрега 312 г/см².

Однонаправленный органопластик изготавливали при температуре 175 °C методом автоклавного формования (автоклав Magnabosco s.r.l.) пакета, собранного из 10 слоев препрега с укладкой 0 градусов. Из отформованных плит органопластика механической обработкой на отрезном станке с водяным охлаждением Brilliant 275 изготавливали образцы для проведения испытаний.

Испытания при растяжении образцов органопластика проводили в направлении армирования по ГОСТ Р 56785–2015 на испытательной машине LFM-250 (фирма Walter+Bai AG, Швейцария) при температуре 20±2 °C [17].

Микроструктуру поверхности исходного волокна Русар-НТ исследовали на образцах нити с линейной плотностью 58,8 текс, из которой формируется жгут.

Для проведения микроструктурных исследований образцы исходного органопластика расслаивали на две части. В результате получали две поверхности: одна – преимущественно со слоем матрицы, а вторая – со слоем наполнителя. Исследовали поверхности разрушения исходного органопластика и органопластика после испытаний при растяжении.

Для выявления тонкой структуры образцы подвергали ионно-плазменному травлению в течение 20 мин на установке JFC-1100 Fine Coat (фирма Jeol, Япония), после чего наносили слой золота толщиной 20 нм в вакуумной установке для магнетронного напыления Q150R ES.

Микроструктуру образцов исследовали методом сканирующей электронной микроскопии с помощью микроскопа VEGA3 XMU (фирма Tescan) в режиме вторичных электронов при увеличениях от ×200 до ×20000 по методике, описанной в работах [18–20]. Количественную обработку микроструктур

проводили на серии микрофотографий при различных увеличениях с применением программного обеспечения анализа изображений ImageScope Color (разработчик – ООО «Системы для микроскопии и анализа»).

Результаты и обсуждение

Свойства однонаправленного органопластика на основе жгутов из волокна Русар-НТ:

Показатель	Среднее значение показателя
Степень отверждения связующего в органопластике, %	98
Температура стеклования полимерной матрицы в органопластике, °С	190
Толщина монослоя, мм	0,22
Плотность органопластика, г/см ³	1,38
Предел прочности при растяжении σ_b , МПа	2060
Модуль упругости при растяжении E , ГПа	101
Относительное удлинение при растяжении δ , %	2,7
Коэффициент Пуассона	0,4

Показано, что материал обладает высокими упруго-прочностными характеристиками при растяжении, показатель относительной деформации 2,7%. По значениям прочности и модуля упругости органопластик на основе волокна Русар-НТ превосходит аналоги – однонаправленные материалы, изготовленные методом выкладки, такие как органопластик Органит 16В на основе волокна СВМ ($\sigma_b=1700$ МПа, $E=95$ ГПа) и органопластики на основе нитей Kevlar 149 ($\sigma_b=1400$ –1900 МПа, $E=78$ –93 ГПа) [14].

Исследуемый однонаправленный органопластик – это сложноорганизованный однонаправленный многокомпонентный матери-

ал, в состав которого входит полимерное связующее и арамидный наполнитель (волокно Русар-НТ в виде жгута). Связующее является безрастворным и представляет собой композицию эпоксидных смол и термопластичного модификатора – полисульфона. Следует отметить, что используемое арамидное волокно Русар-НТ не подвергалось дополнительной обработке аппретами и, следовательно, химический состав его поверхности соответствует волоконобразующему полимеру.

С точки зрения химической структуры волоконобразующий полимер представляет собой сополиамид, синтезируемый с использованием мономеров дихлорангидрида терефталевой кислоты, диаминобензимидазола и хлор-*л*-фенилендиамин. Надмолекулярная структура такого волокна традиционно представляет собой фибриллярные образования, выстроенные вдоль оси волокна [21, 22].

Микроструктура поверхности волокон Русар-НТ, образующих нити, представлена на рис. 1. Видно, что диаметр волокна составляет 16 мкм, некоторые волокна имеют отщепленные микрофибриллярные структуры. Поверхность волокна гладкая, представляет собой тонкую пленку, которая не подвергается ионно-плазменному травлению, однако в некоторых областях пленки имеются дефекты в виде микротрещин и отслаиваний. В местах разрушения пленки видна внутренняя структура волокон. Поскольку волокно не подвергалось аппретированию, то видно, что структура поверхностного слоя волокна и его внутренняя структура отличаются. Поверхностная структура волокна и расположение нитей относительно друг друга будут оказывать влияние на процесс пропитки наполнителя связующим, его смачиваемость и определять уровень взаимодействия на границе раздела фаз «волокно–полимерная матрица».

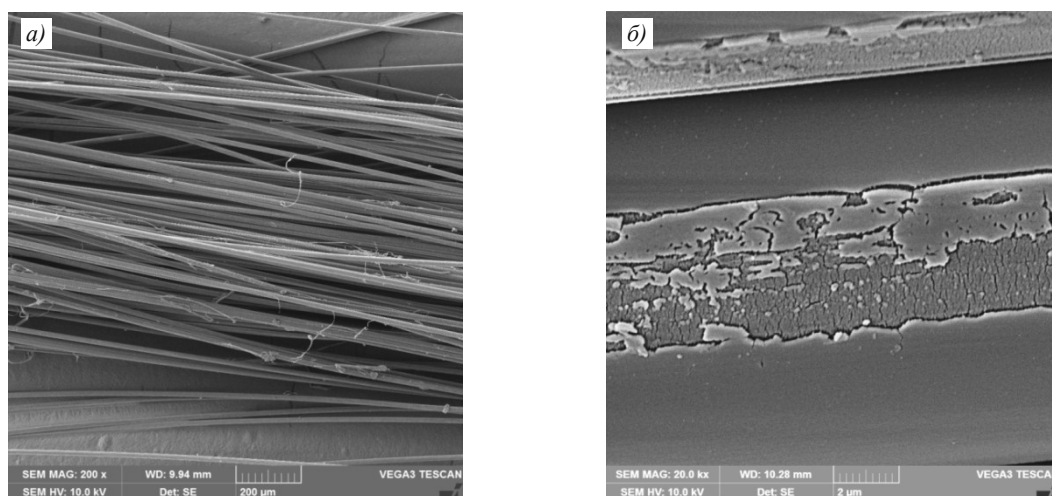


Рис. 1. Микроструктура ($a - \times 200$; $b - \times 20000$) поверхности арамидных волокон Русар-НТ

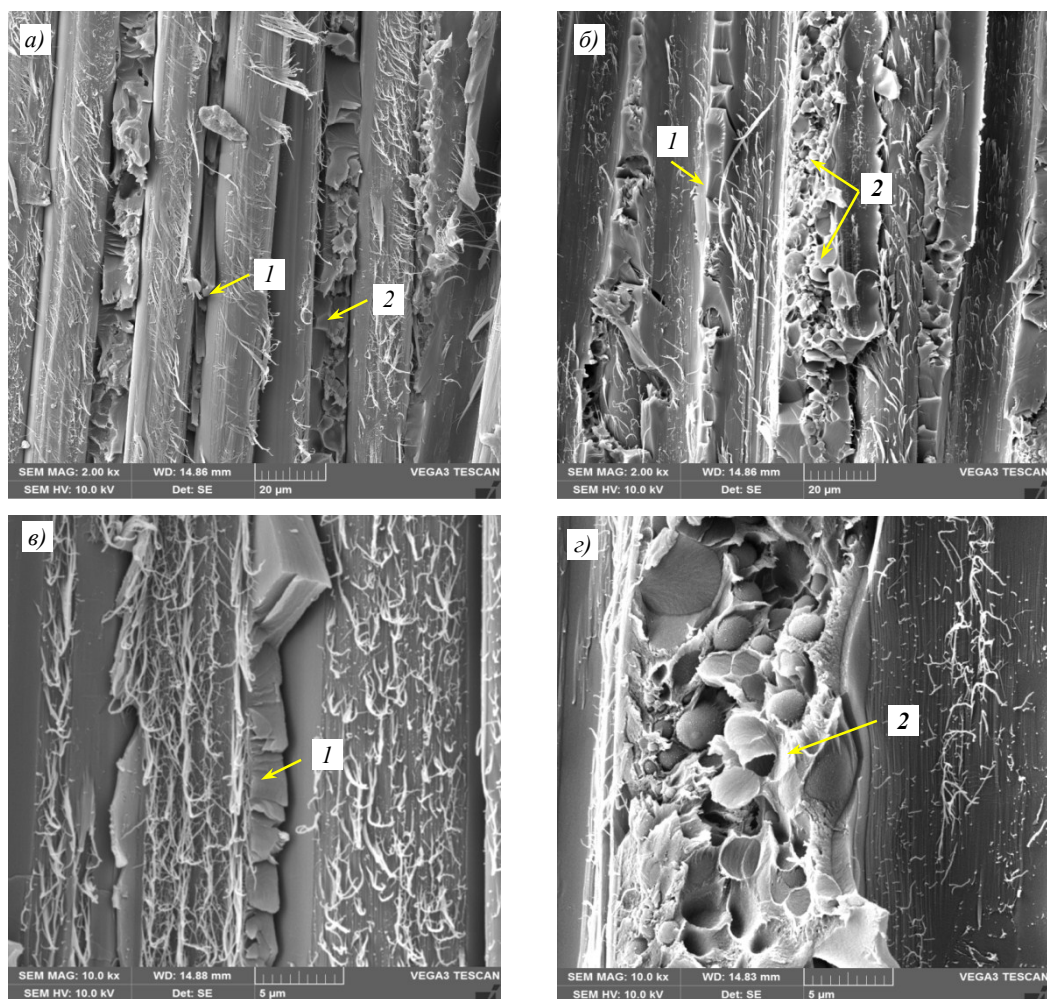


Рис. 2. Микроструктура (а, б – $\times 2000$; в, г – $\times 10000$) поверхности расслоения исходного однонаправленного органопластика на основе арамидного волокна Русар-НТ – структура полимерной матрицы в тонких 1–5 мкм (стрелка 1) и толстых 5–15 мкм (стрелка 2) прослойках между волокнами

Исследованы также особенности микроструктуры образцов из органопластика на основе волокна Русар-НТ. На рис. 2 представлены микрофотографии поверхностей расслоения исходного органопластика – по наполнителю и по матрице. Видно, что диаметр армирующих арамидных волокон в органопластике составляет 16 мкм. При расслоении материала на поверхности органических волокон наблюдается отщепление микрофибриллярных образований различной длины (рис. 2, а, в). При рассмотрении структуры матрицы под волокнами видно, что она имеет продольную ориентацию, при отслаивании в ней также остается большое количество микрофибриллярных образований, вырванных с поверхностей арамидных волокон при расслоении образцов (рис. 2, б, г). Это свидетельствует о том, что имеет место взаимодействие между поверхностью волокна и связующим с образованием межфазного слоя особой структуры на границе раздела «арамидное волокно–поли-

мерная матрица». Природа взаимодействия на межфазной границе требует дальнейшего исследования.

Между волокнами можно видеть прослойки связующего различного размера – от ~ 2 до 15 мкм. Неравномерность объемного распределения полимерной матрицы между арамидными волокнами обусловлена различной плотностью упаковки волокон в объеме органопластика вследствие технологических особенностей его изготовления. Жгуты, подвергаемые пропитке связующим при изготовлении препрега, состоят из отдельных нитей, которые в свою очередь состоят из волокон. Наибольшая плотность упаковки арамидных волокон наблюдается в нитях, в которых расстояние между элементарными волокнами составляет 1–5 мкм. Расстояние между волокнами в соседних нитях и жгутах достигает 15 мкм. Следовательно, процесс проникновения расплава связующего в межволоконное пространство при изготовлении препрега

зависит от расстояния между волокнами, поверхностной энергии волокна, а также от химической структуры, молекулярной массы, стерических параметров компонентов связующего, реологических свойств, параметров химических реакций, фазовых превращений, массопереноса в отверждающейся системе и т. п. Эти факторы в совокупности определяют условия формирования структуры полимерной матрицы в процессе ее отверждения в составе органопластика.

Структура полимерных прослоек между арамидными волокнами отличается в зависимости от плотности упаковки волокон. В случае, когда межволоконное пространство менее 5 мкм, формируется однородная структура отвержденного связующего, склонная к хрупкому разрушению (на рис. 2 показана стрелками 1). Выявление особенностей тонкой фазовой структуры требует более детальных исследований. В случае, когда межволоконное расстояние составляет от 5 до 15 мкм, отвержденная полимерная матрица в этой области имеет явно выраженную гетерогенную структуру с фазовыми частицами сферической формы размером от 1 до 4,5 мкм (на рис. 2 показана стрелками 2).

Можно предположить – это обусловлено тем, что исходный многокомпонентный состав связующего имеет либо изначально двухфазную структуру, либо на начальной стадии протекания химических реакций отверждения образуются две фазы, отличающиеся своим составом и трансляционной подвижностью. Фазовые равновесия и взаи-

модиффузия в системах «эпоксидные олигомеры–полисульфон» описаны в работах [23, 24]. До момента гелеобразования наиболее подвижная и низкомолекулярная фаза (вероятно, обогащенная эпоксидной составляющей) способна проникать в межволоконное пространство с расстоянием между элементарными волокнами 1–5 мкм, куда проникновение более высокомолекулярной и высоковязкой фазы затруднительно. В результате такого массопереноса состав, процесс структурообразования при отверждении связующего и конечная структура полимерной матрицы в тонких (1–5 мкм) и толстых (5–15 мкм) прослойках связующего между волокнами отличаются.

В процессе отверждения с ростом степени конверсии эпоксидных олигомеров в тонких прослойках, по-видимому, формируется сетка преимущественно эпоксидного полимера. В толстых прослойках процесс структурообразования сопровождается вторичным фазовым распадом с образованием сферических частиц среднего размера (~3 мкм). Небольшой размер частиц, вероятно, обусловлен фазовым распадом в условиях низкой трансляционной подвижности трехмерных макромолекул эпоксидного полимера.

Важно также отметить роль поверхности арамидного волокна Русар-НТ. На микрофотографии (рис. 3) показано, что вблизи поверхности волокна формируется слой толщиной 3–5 мкм, имеющий однородную плотную структуру, отличающуюся от структуры матрицы в объеме. В работе [25] показано, что

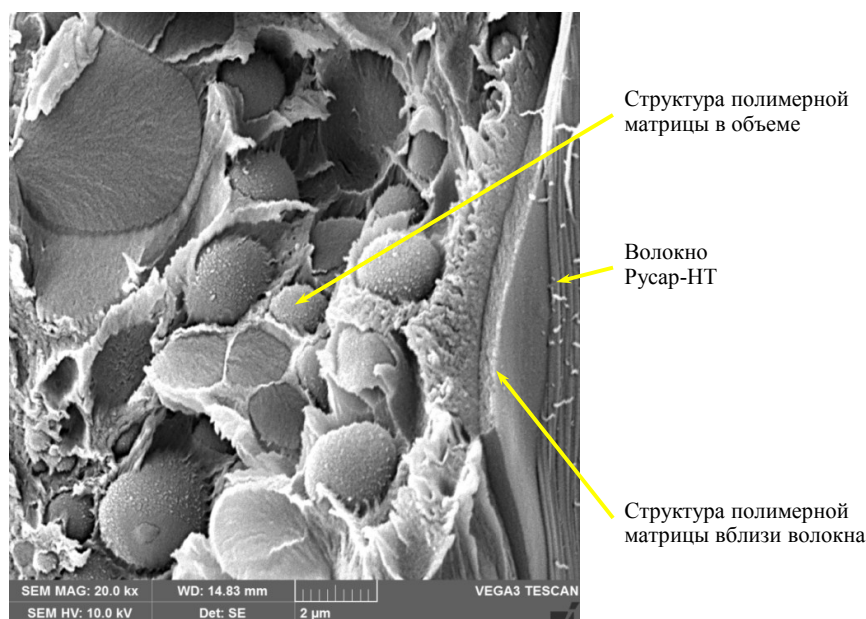


Рис. 3. Микроструктура ($\times 20000$) полимерной матрицы однонаправленного органопластика на основе арамидного волокна Русар-НТ вблизи волокна и в объеме матрицы

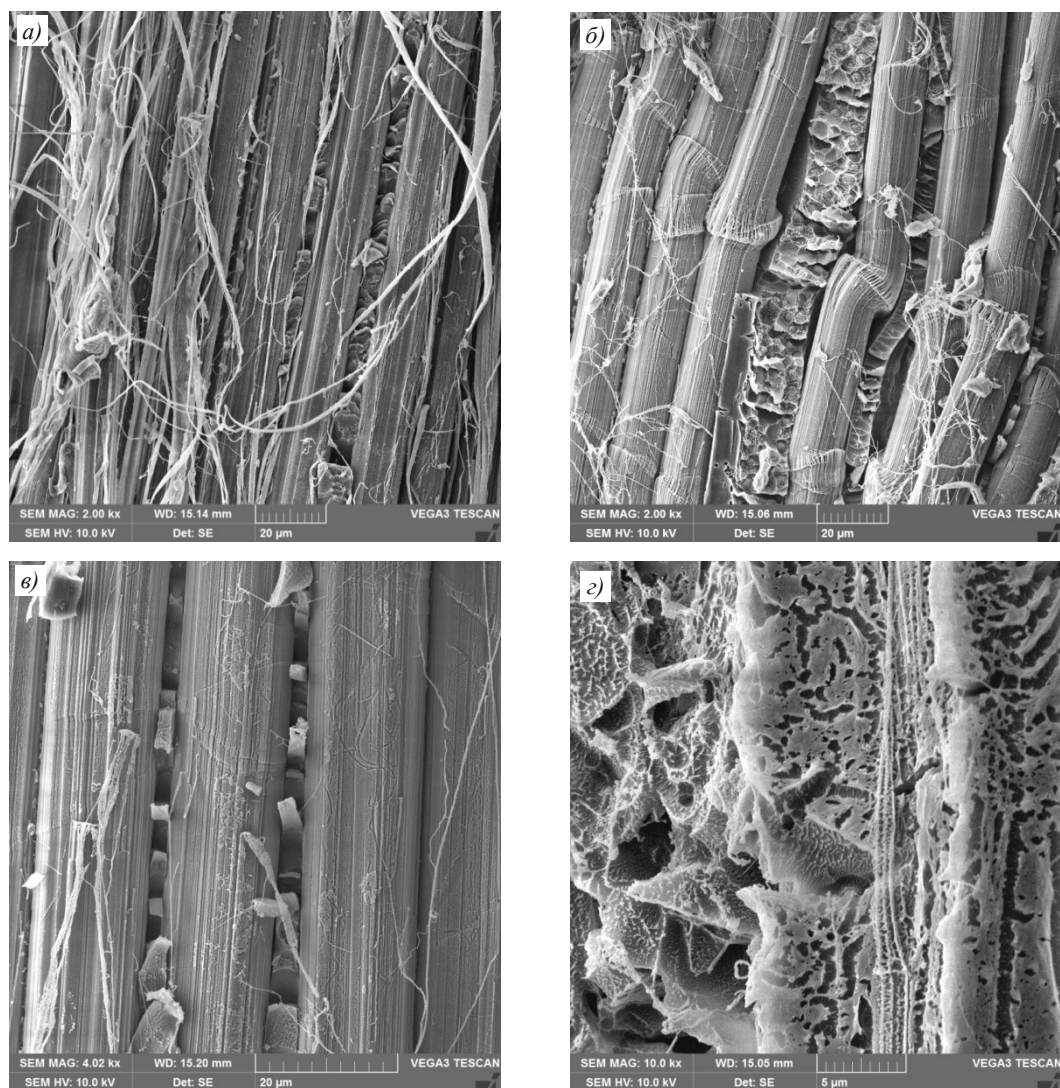


Рис. 4. Микроструктура поверхности разрушения однонаправленного органоупластика на основе арамидного волокна Русар-НТ после испытаний при растяжении:

а – расщепление волокон; *б, в* – расщепление волокон и структура полимерной матрицы между волокнами; *г* – полимерная матрица на границе раздела фаз «волокно–полимерная матрица»

полярная составляющая поверхностной энергии равна $16,1 \text{ мДж/м}^2$ и это предполагает хорошую смачиваемость волокна эпоксидными олигомерами. Вероятно, на начальных стадиях процесса структурообразования имеет место перераспределение фазы связующего, обогащенной эпоксидными компонентами, к высокоэнергетической поверхности волокна. В результате последующие процессы формирования структуры полимерной матрицы возле поверхности волокна и в объеме отличаются и происходят по механизму, описанному ранее.

На рис. 4 представлены микрофотографии структуры образцов однонаправленного органоупластика, подвергнутых разрушению при растяжении. Видно, что разрушение органоупластика при одноосном растяжении проис-

ходит с расщеплением арамидных волокон на пучки фибрилл, отслаиванием и обрывом волокон (рис. 4, *а*).

Более детально механизм разрушения можно видеть на рис. 4, *б*, где показаны участки волокон, не доведенные до полного разрушения. Установлено, что диаметр волокон при растяжении уменьшается на 1–3 мкм по сравнению с исходным диаметром. На поверхности разрушенных волокон в небольшом количестве видны оторванные микрофибриллы. Элементарное волокно в процессе растяжения подвергается деформированию, вероятно, в участках между фибриллярными структурами, соединенными проходными цепями. Можно предположить, что впоследствии продольные напряжения сдвига, возникающие в области начальной трещины, вызывают последовательное

отслоение пучков фибрилл, что при дальнейшем увеличении нагрузки приводит к расщеплению фибриллярных структур и их обрыву. На рис. 4, б на арамидном волокне видны «полосы сброса» со складчатыми участками. Такого типа дефекты волокна возникают, по-видимому, под влиянием ударной волны сжатия, возникающей при снятии напряжения. Одновременно при растяжении происходит деформация полимерной матрицы между волокнами с образованием трещин и частичным адгезионным отслаиванием на границе раздела фаз «волокно–полимерная матрица» в области деформации волокна (рис. 4, в).

Характер разрушения полимерной матрицы в толстых и тонких прослойках между волокнами отличается из-за различия их структуры (рис. 4, б, в). В первом случае наблюдается прорастание множества трещин и хрупкое разрушение. В толстых прослойках в большей степени происходит разрушение по границе раздела фаз в эпоксидно-полисульфоновой матрице.

При детальном рассмотрении структуры полимерной матрицы (рис. 4, г) под волокнами можно видеть неоднородный поверхностный слой, который представляет собой межфазную границу между волокном и полимерной матрицей. Вероятно, в процессе растяжения органопластика при столь высоких нагрузках (до 2060 МПа) и деформации волокна внутри композита происходит растрескивание межфазного слоя с нарушением его сплошности, чего не наблюдалось при рассмотрении поверхности матрицы органопластика, не подвергнутого испытанию при растяжении (рис. 1).

Заключения

Исследована микроструктура высокопрочного (прочность при растяжении 2060 МПа, модуль упругости 101 ГПа) однонаправленного органопластика на основе арамидного волокна Русар-НТ и многокомпонентного расплавленного связующего на основе эпоксидных олигомеров и полисульфона.

Исходя из анализа микроструктуры органопластика установлено, что на границе раз-

дела «арамидное волокно–полимерная матрица» происходит взаимодействие с образованием межфазного слоя, природа которого требует дальнейшего исследования.

Показана неравномерность объемного распределения полимерной матрицы в пространстве между арамидными волокнами, которая обусловлена различием плотности упаковки волокон. Выявлены два типа структуры полимерной матрицы между волокнами: в межволоконном пространстве менее 5 мкм формируются тонкие прослойки связующего с однородной структурой; в межволоконном пространстве размером от 5 до 15 мкм образуются толстые прослойки связующего, характеризующиеся явно выраженной гетерогенной структурой с включениями частиц сферической формы размером от 1 до 4,5 мкм. Показано отличие структуры полимерного связующего вблизи поверхности волокна и в объеме матрицы.

Исследование микроструктуры образцов органопластика после испытания при растяжении показало, что их разрушение при одноосном растяжении происходит с расщеплением волокон на пучки фибрилл, отслаиванием и обрывом арамидных волокон. Характер разрушения полимерной матрицы в тонких и толстых прослойках между волокнами отличается из-за различия их структуры. В первом случае наблюдается прорастание множества трещин и хрупкое разрушение, во втором – в большей степени характерно разрушение по границе раздела фаз в структуре матрицы.

Таким образом, проведенные в работе исследования показали особенности структурно-морфологической организации однонаправленного волокна Русар-НТ и модифицированного термопластом многокомпонентного связующего, а также возможности регулирования структуры на микроуровне за счет поверхностного взаимодействия на границе раздела «волокно–полимерная матрица» и управления процессом фазообразования в полимерной матрице.

Библиографический список

1. Авиационные материалы: справочник: в 13 т. / под ред. Е.Н. Каблова. 7-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. Т. 7: Полимерные композиционные материалы. 270 с.
2. Zhang S., Zhao D. Advances in materials science and engineering. Aerospace materials handbook. CRC Press, 2012. 781 p.
3. Wanhill R.J.H., Prasad N.E. Aerospace materials and material technologies. Vol. 2. Aerospace material technologies. Springer Nature, 2017. 557 p.
4. Железина Г.Ф. Конструкционные и функциональные органопластики нового поколения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2013. №6. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.10.2020).

5. Шульдешова П.М., Железина Г.Ф. Арамидный слоисто-тканый материал для защиты от баллистических и ударных воздействий // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2014. №9. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-6-6.
6. Железина Г.Ф., Гуляев И.Н., Соловьева Н.А. Арамидные органопластики нового поколения для авиационных конструкций // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 368–378. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-368-378.
7. Железина Г.Ф., Войнов С.И., Соловьева Н.А., Кулагина Г.С. Арамидные органотекстолиты для ударостойких элементов авиационных конструкций // Журнал прикладной химии. 2019. Т. 92. Вып. 3. С. 358–364. DOI: 10.1134/S0044461819030101.
8. Железина Г.Ф., Войнов С.И., Черных Т.Е., Черных К.Ю. Новые арамидные волокна Русар-НТ для армирования конструкционных органопластиков // Вопросы материаловедения. 2015. №1 (81). С. 60–70.
9. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тез. докл. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
10. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
11. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
12. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
13. Колобков А.С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2020. №6–7 (89). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
14. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 822 с.
15. Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2017. 472 с.
16. Петрова А.П., Мухаметов Р.Р., Шишимиров М.В., Павлюк Б.Ф., Старостина И.В. Методы испытаний и исследований термореактивных связующих для полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2018. №12 (72). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-62-70.
17. Гриневич Д.В., Яковлев Н.О., Славин А.В. Критерии разрушения полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №7 (79). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111.
18. Деев И.С., Кобец Л.П. Исследование микроструктуры и микрополей деформаций в полимерных композитах методом растровой электронной микроскопии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1999. Т. 65. №4. С. 27–34.
19. Деев И.С., Каблов Е.Н., Кобец Л.П., Чурсова Л.В. Исследование методом сканирующей электронной микроскопии деформации микрофазовой структуры полимерных матриц при механическом нагружении // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2014. №7. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-6-6.
20. Деев И.С., Железина Г.Ф., Лонский С.Л., Куршев Е.В. Особенности формирования микроструктуры полимерной матрицы в органопластике на основе многокомпонентного эпоксидного связующего // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №5 (77). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-22-31.
21. Перепелкин К.Е. Химические волокна: развитие производства, методы получения, свойства, перспективы. СПб.: СПГУТД, 2008. 354 с.
22. Кудрявцев Г.И., Варшавский В.Я., Щетинин А.М., Казаков М.Е. Армирующие химические волокна для композиционных материалов. М.: Химия, 1992. 236 с.
23. Будылин Н.Ю., Шапагин А.В., Чалых А.Е. Сравнительные исследования взаимодиффузии и фазовых состояний в смесях эпоксидных олигомеров с полисульфонами и полиэфирсульфонами // Сб. статей XIX Всерос. конф. «Структура и динамика молекулярных систем». М.: ИФХЭ РАН, 2012. Т. 2. С. 192–195.
24. Чалых А.Е., Герасимов В.К., Бухтеев А.Е. и др. Совместимость и эволюция фазовой структуры смесей полисульфон–отверждающиеся эпоксидные олигомеры // Высокомолекулярные соединения. Сер.: А. 2003. Т. 45. №7. С. 1148–1159.
25. Пахомов К.С., Антипов Ю.В., Чалых А.Е. и др. Энергетические параметры поверхности арамидных волокон // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. №1. С. 100–103.