

УДК 620.1:678.747.2

А.И. Гуляев¹, Н.О. Яковлев¹, Е.И. Орешко¹**ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ РОСТА МЕЖСЛОЕВОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ НАГРУЖЕНИИ УГЛЕПЛАСТИКА ПО РАЗЛИЧНЫМ МОДАМ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-99-108

Экспериментально определены характеристики межслоевой трещиностойкости в условиях нормального отрыва (мода I), поперечного сдвига (мода II) и комбинированного нагружения (при различных соотношениях отрыва и сдвига) однонаправленного эпоксиполисульфонового углепластика. На основании результатов фрактографического анализа выявлены характерные элементы микрорельефа излома и представлено изменение микростроения поверхностей разрушения при изменении условий нагружения. Предложена схема формирования микрорельефа сдвига для углепластика с сонепрерывной фазовой морфологией полимерной матрицы.

Ключевые слова: полимерный композит, трещиностойкость, смешанная мода I+II, механика разрушения, анализ причин разрушения, расслоение, фазовая морфология, фрактография.

A.I. Gulyaev¹, N.O. Yakovlev¹, E.I. Oreshko¹**FRACTOGRAPHY FEATURES OF INTERLAMINAR CRACK GROWTH IN CARBON FIBRE REINFORCED PLASTIC UNDER VARIOUS MODE LOADING**

The interlaminar fracture toughness characteristics were experimentally determined under conditions of opening (mode I), forward shear (mode II), and combined loading (at various opening and shear ratios) of unidirectional epoxy polysulfone carbon fiber reinforced plastic. Based on the results of fractographic analysis, the fracture microrelief characteristic elements are identified and the change in the microstructure of the fracture surfaces with changing loading conditions is presented. A scheme is proposed for the formation of a shear microrelief for carbon fiber polymer composite with a matrix continuous phase morphology.

Keywords: polymer composite, fracture toughness, mixed mode I+II, fracture mechanics, failure analysis, delamination, phase morphology, fractography.

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

С самого начала применения полимерных композитов в качестве конструкционных материалов их рассматривали как универсальную замену металлическим сплавам (концепция «черного металла»). Первое поколение углепластиков характеризовалось хрупкими полимерными матрицами и, ввиду еще только формировавшегося понимания взаимосвязи «состав–технология–структура–свойства», обладало различными дефектами и несовершенствами строения. Однако коренная причина проблем прочности и надежности конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) заключалась в неверном подходе к использованию уникальных свойств

композитов и попытках получить из анизотропного материала квазиизотропный. Согласно работе [1], современный уровень физико-механических свойств ПКМ не обеспечивает требуемую прочность силового набора планера с традиционными конструктивно-силовыми схемами на основе тонкостенных обшивочных панелей. Существующие полимерные матрицы не позволяют в полной мере реализовать рекордные удельные прочностные свойства углеродных волокон в конструкциях такого типа. Поэтому в настоящее время научно-исследовательские работы направлены, с одной стороны, на поиск альтернативных силовых конструктивных элементов, позволяющих в большей степени реализовать свойства углеродных волокон [1], с другой стороны, на разработку новых полимерных матриц с повышенными упруго-прочностными и диссипативно-релаксационными характеристиками и ПКМ на их основе [2–6]. Основная функция матрицы в непрерывно-волоконистых полимерных композитах – равномерно распределять нагрузку между армирующими волокнами. Однако при эксплуатации конструкции из ПКМ подвергаются механическим воздействиям, при которых важным условием сохранения их работоспособности является способность матрицы сопротивляться инициированию и распространению трещин [7].

Проблеме безопасной повреждаемости авиаконструкций из ПКМ, в частности вопросам накопления повреждений и разрушения композитов, в последние десятилетия уделяют особенное внимание [7, 8]. Сложность данных вопросов обусловлена разнообразием структур армирования ПКМ, что определяет различные типы разрушения волоконистых композитов [7, 8]. Даже в случае однонаправленных ПКМ резко выраженные ортогонально-анизотропная (ортотропная) и слоисто-гетерогенная структуры затрудняют обобщенный анализ нагружения и сопротивления росту произвольно расположенных трещин [8]. Межслоевая трещиностойкость слоистых ПКМ характеризуется наименьшими значениями по сравнению с другими видами трещиностойкости. В связи с этим именно межслоевые трещины считаются наиболее опасными, а показатели межслоевой трещиностойкости – наиболее критичными для работоспособности материала (особенно в поврежденном состоянии). Следует также отметить, что при нагружении материала в направлении армирования (например, на сжатие) его разрушение может произойти ввиду распространения межслоевых трещин.

Наряду с расположением макроплоскости трещины относительно осей ориентации волокон и плоскостей слоев определяющими для анализа накопления повреждений и разрушения ПКМ являются особенности перемещения берегов трещины. Принято выделять три основных типа полей напряжений в вершине трещины: I – нормальный отрыв, II – поперечный сдвиг и III – продольный сдвиг [8]. Во многих случаях произвольные поля напряжений и смещений в окрестности вершины трещины могут быть представлены в виде суммы полей напряжений и смещений типов I, II и III – такие трещины называют трещинами смешанного типа [8]. Для полимерных композитов на основе хрупких матриц показатели трещиностойкости по *моду* I значительно ниже таковых по *моду* II [9], поэтому для таких композитов наиболее критичными считают показатели трещиностойкости в условиях отрыва и полагают, что для любого типа раскрытия трещины вклад отрыва будет определяющим (за исключением случаев существенного вклада сдвиговой составляющей). Современные критерии разрушения учитывают тот факт, что в реальных условиях могут распространяться трещины смешанного типа без существенного преобладания какой-либо *моды*. В связи с этим большое внимание в настоящее время уделяется определению трещиностойкости по смешанной *моду* [9, 10].

Ввиду особого значения показателей межслоевой вязкости разрушения для безопасной эксплуатации конструкций из ПКМ научно-исследовательские работы направлены на разработку способов повышения межслоевой трещиностойкости. Задачу повышения межслоевой трещиностойкости ортотропно-армированных ПКМ решают преимущественно следующими способами:

- физическое, химическое и физико-химическое модифицирование связующего до его совмещения с армирующим наполнителем [11];
- трансверсальное упрочнение и аналогичные способы [12, 13];
- введение модификатора (в виде пленки, нетканого материала, порошка) между слоями заготовки ПКМ [14].

Одним из наиболее эффективных способов повышения диссипативно-релаксационных свойств полимерных матриц является модифицирование связующего термопластами в виде растворимых, ограниченно растворимых или нерастворимых добавок [15]. Для эффективного повышения трещиностойкости ПКМ необходимо выполнение следующих условий [16, 17]:

- выделение термопластичного модификатора в отдельную фазу с определенными параметрами (тип фазовой морфологии, объемная доля, размер и распределение по размерам частиц дисперсной фазы и др.);
- высокая адгезионная прочность связи «реактопласт–термопласт».

Распространение трещин в ПКМ является структурно-зависимым на разных уровнях организации структуры композита (на уровне структуры армирования, на уровне строения матрицы). Основные знания о процессах разрушения предоставляет фрактография: анализ поверхностей изломов в сочетании с информацией о структуре материала. Фрактографический анализ может предоставить ценную информацию при решении следующих задач:

- анализ качества материала и соблюдения технологии его изготовления: проявление на поверхностях изломов признаков дефектов в материале и существенных отклонений от технологических режимов;
- разработка и верификация методов механических испытаний стандартных и конструктивно-подобных образцов – установление по фрактографическим признакам соответствия схемы нагружения ожидаемым условиям деформирования и разрушения;
- установление микромеханизмов разрушения и разработка физически обоснованных критериев разрушения;
- экспертиза эксплуатационных разрушений.

Основные особенности фрактографического анализа композиционных материалов, армированных непрерывными волокнами, состоят в следующем [18]:

- разнообразие видов разрушения – в направлении армирования, трансслоевое, межслоевое и различные их комбинации в сочетании с разными *модами* разрушения;
- вторичные разрушения – энергия при нагружении поглощается преимущественно не в процессе пластической деформации, а посредством формирования вторичных трещин.

Вследствие данных особенностей характерным является существенно неоднородный излом, при этом обычно трудно установить последовательность стадий разрушения. При межслоевом разрушении ПКМ фрактографическая картина дополнительно усложняется существованием областей преимущественного разрушения по матрице (Matrix-Dominated Fracture Surfaces [18]) и по границе раздела «волокно–матрица» (Fibre-Dominated Fracture Surfaces [18]). Поэтому актуальной задачей является выявление фрактографических признаков прохождения определенных микромеханических процессов в регламентированных условиях нагружения с целью применения характерных элементов микрорельефа изломов в качестве диагностических признаков эксплуатационных разрушений конструкций из ПКМ.

Цель данной работы – систематизировать информативные элементы микрорельефа, формирующегося при межслоевом разрушении углепластиков с сонепрерывной фазовой морфологией (морфологией двух непрерывных фаз) полимерной матрицы, а также поставить в соответствие изменению условий нагружения формоизменение элементов микрорельефа.

Для достижения цели работы решены следующие задачи:

- экспериментально определены характеристики межслоевой трещиностойкости углепластика в условиях нормального отрыва, поперечного сдвига и комбинированного нагружения (при различных соотношениях отрыва и сдвига);
- проведен фрактографический анализ испытанных образцов с соотнесением морфологии изломов с условиями и направлением распространения межслоевой трещины;
- систематизированы элементы микрорельефа с учетом информации о структуре углепластика;
- описаны микромеханические процессы формирования микрорельефа изломов.

Работа выполнена в рамках реализации научных направлений 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» и 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Объектом исследования в данной работе являлся однонаправленный углепластик на основе высокопрочных волокон и эпоксидного связующего, модифицированного полисульфоном.

Межслоевую вязкость разрушения углепластика в условиях нормального отрыва (*мода I*) определяли по методу DCB (Double cantilever beam) на образцах в виде двухконсольной балки прямоугольного сечения. Межслоевую вязкость разрушения углепластика в условиях поперечного сдвига (*мода II*) определяли по методу ENF (End Notched Flexure) на образцах в виде балки прямоугольного сечения с торцевым расслоением. Межслоевую вязкость разрушения углепластика по смешанной *моде I+II* в условиях комбинированного нагружения (при соотношении вкладов нормального отрыва и поперечного сдвига, %: 70/30 и 40/60) определяли методом ММВ (Mixed Mode Bending). Испытания проводили на универсальных электродинамических испытательных машинах Instron ElectroPuls E10000 и Zwick/Roell Z050.

Фрактографические исследования проводили с применением метода растровой электронной микроскопии. На исследуемую поверхность изломов углепластика наносили токопроводящий слой (слой платины толщиной 10–15 нм) на установке для ионного напыления JFC-1600. Исследование проводили на растровом электронном микроскопе при ускоряющем напряжении 15 кВ. Получены изображения поверхностей разрушения углепластиков в режиме вторичных электронов при увеличениях от $\times 200$ до $\times 10000$. На всех представленных в работе фотографиях изломов направление распространения межслоевой трещины – слева направо.

Результаты и обсуждение

В таблице приведены экспериментально определенные характеристики межслоевой трещиностойкости в условиях нормального отрыва, поперечного сдвига и комбинированного нагружения углепластика.

Характеристики межслоевой трещиностойкости

| по <i>моде I</i> , G_{Ic} | Вязкость разрушения, кДж/м ² по смешанной <i>моде</i> , $G_{(I+II)c}$ | | по <i>моде II</i> , G_{IIc} |
|-----------------------------|---|--------------------|-------------------------------|
| | I (70%) + II (30%) | I (40%) + II (60%) | |
| 0,49 (5,5%)* | 0,48 (4,0%) | 0,40 (8,3%) | 0,86 (6,3%) |

* В скобках указан коэффициент вариации.

Отношение удельных работ расслоения по *модам I* и *II* (G_{IIc}/G_{Ic}) составляет 1,76, что характерно для однонаправленных ПКМ с термореактивными матрицами ($G_{IIc} \approx 2G_{Ic}$). Показатели трещиностойкости по смешанной *моде* находятся на уровне или

даже уступают таковым по *моде* I, что не может быть объяснено в рамках макромеханического подхода (по крайней мере с применением однофазных моделей – например, модели Гриффитса–Ирвина).

Рассмотрение особенностей деформирования и разрушения углепластика с межслоевой трещиной целесообразно начать с анализа напряженно-деформированного состояния в окрестностях вершины трещины в зависимости от *моды* нагружения. При комбинированном нагружении образца по методу ММВ рост трещины происходит под действием растягивающих напряжений, направленных нормально к макроплоскости трещины, и сдвиговых напряжений, смещающих поверхности (берега) трещины в направлении, перпендикулярном ее фронту. Распространению магистральной трещины предшествует процесс накопления дефектов (микротрещин) с последующим их ростом и слиянием [19]. На рис. 1 приведено поле напряжений в области, окружающей микротрещину, сформировавшуюся перед фронтом магистральной трещины. В зависимости от соотношения нормальных (σ_I) и сдвиговых (τ_{II}) напряжений, что определяется вкладом нормального отрыва и поперечного сдвига при комбинированном нагружении, плоскость микротрещины может располагаться под различным углом φ к макроплоскости магистральной трещины, при этом ее раскрытие будет осуществляться результирующими растягивающими напряжениями σ_R . При нагружении по *моде* I плоскость микротрещины будет совпадать с макроплоскостью магистральной трещины ($\varphi=0$ градусов). При нагружении по *моде* II угол φ между плоскостью микротрещины и макроплоскостью межслоевой трещины равен 45 градусам. При комбинированном нагружении нормальным отрывом и поперечным сдвигом угол φ будет принимать промежуточные значения, а морфология поверхностей разрушения будет сочетать фрактографические признаки роста трещины по *модам* I и II [9, 18].

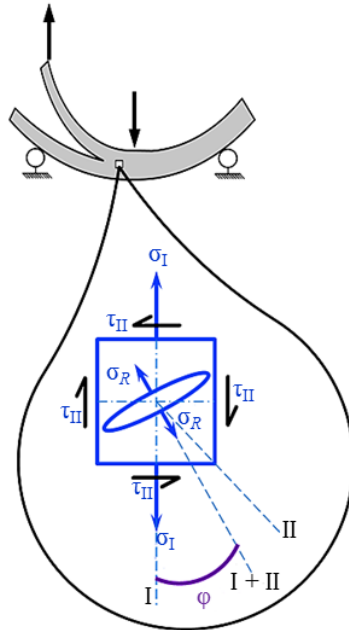


Рис. 1. Напряженно-деформированное состояние в окрестностях вершины межслоевой трещины при нагружении по смешанной *моде* I+II

На рис. 2 приведены изображения общего вида изломов, полученных при различных *модах* раскрытия трещин. Поверхности разрушения при значительной доле нормального отрыва (*моды* I и I+II (70%/30%)) характеризуются сравнительно гладким микрорельефом полимерной матрицы в межволоконном пространстве. Поверхности разрушения при значительной доле поперечного сдвига (*моды* II и I+II (40%/60%)) характеризуются шероховатым рельефом межволоконного пространства. На поверхностях

разрушения по *модe* I и по смешанной *модe* при 70%-ном вкладе нормального отрыва характерными элементами излома являются отслоившиеся волокна, лежащие в произвольных направлениях относительно направления армирования. Наличие данного фрактографического признака свидетельствует о прохождении микромеханического процесса скрепления берегов трещины волокнами с их последующим разрывом. На основании анализа научно-технической литературы можно предположить, что данный микромеханизм реализуется при условии, что прочность волокна на срез выше адгезионной прочности «волокно–матрица» и волокно способно изгибаться без разрушения [18].

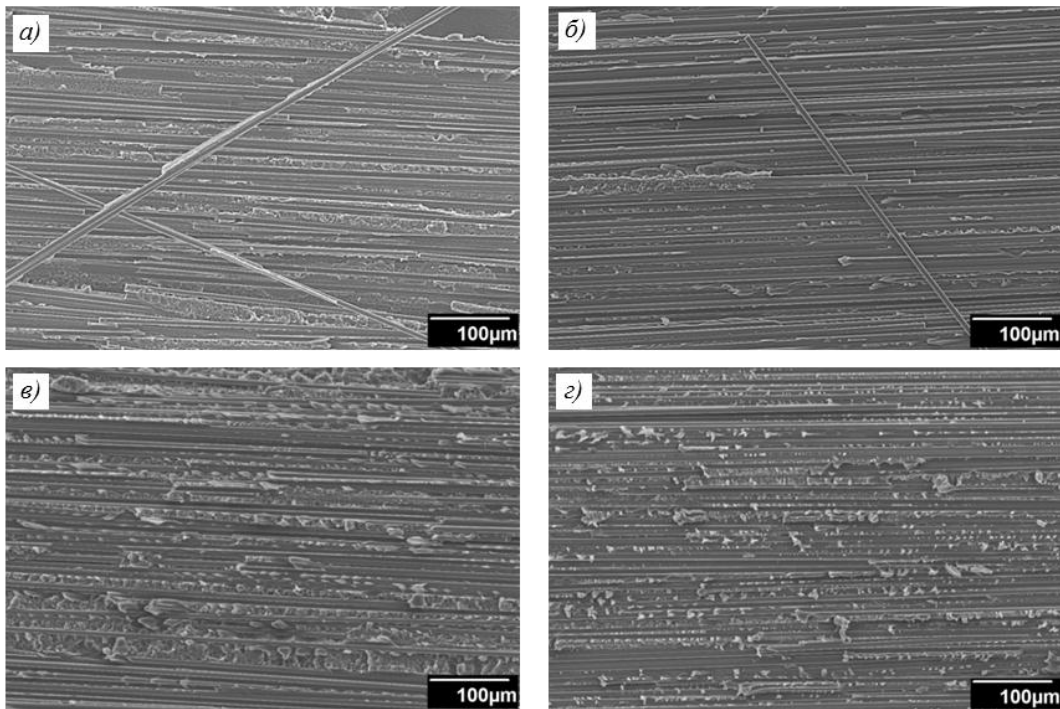


Рис. 2. Изменение общего вида изломов при изменении условий нагружения ($\times 200$):
a – *мода* I; *б* – *мода* I+II (70%/30%); *в* – *мода* I+II (40%/60%); *г* – *мода* II

По результатам фрактографического анализа выявлены характерные элементы микрорельефа изломов и представлена их трансформация при изменении условий роста межслоевой трещины: нормальный отрыв \rightarrow комбинированное нагружение \rightarrow поперечный сдвиг. В работе [20] описаны характерные фрактографические признаки раскрытия трещины по *модам* I и II в углепластике с сонепрерывной фазовой морфологией полимерной матрицы. Распространенной структурно-морфологической особенностью ПКМ с гетерогенной структурой матрицы, сформировавшейся в результате фазового распада на уровне «реактопласт–термопласт», является наличие обедненного термопластом слоя вокруг волокон армирующего наполнителя [21–23]. Строение излома ПКМ с такой микроструктурой матрицы является выражено структурно-зависимым. Микрорельеф излома в зоне непрерывной фазы эпоксидного реактопласта и в зоне непрерывной фазы термопласта со сферическими эпоксидными доменами существенно различается [20]. Ввиду наличия обедненного термопластом слоя вокруг волокон на изломе в межволоконном пространстве обычно наблюдаются фрактографические признаки деформирования и разрушения терморепактивной структурной составляющей. В зонах, обогащенных полимерной матрицей, характерным является микрорельеф, сформировавшийся в результате деформирования и разрушения непрерывной фазы термопласта, включающей сферические эпоксидные домены. На рис. 3 представлено изменение морфологии информативных элементов излома в межволоконном пространстве при изменении условий

нагрузки. Плато отрыва в межволоконном пространстве (рис. 3, *а*) переходят в зоны с ручьистым рельефом (рис. 3, *б*) при 70%-ном вкладе отрыва, затем в гребни с фрагментированной подошвой (рис. 3, *в*) при 40%-ном вкладе отрыва и, наконец, становятся гребнями чистого сдвига (рис. 3, *г*).

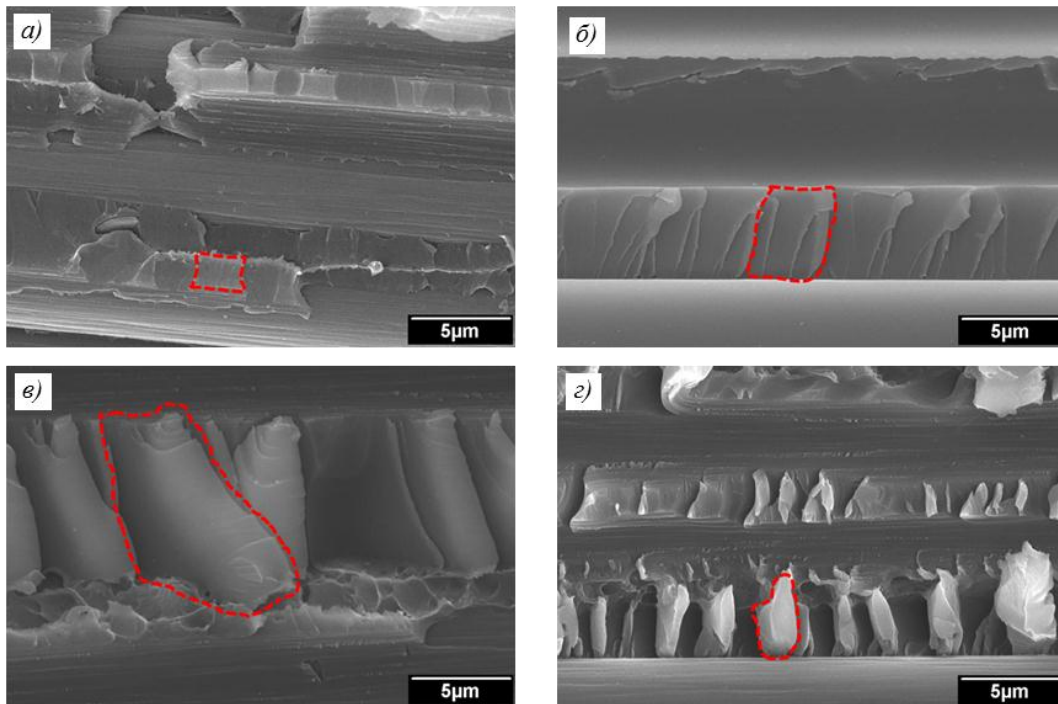


Рис. 3. Изменение микростроения изломов в межволоконном пространстве при изменении условий нагружения ($\times 5000$, информативные элементы излома оконтурены):
а – мода I; *б* – мода I+II (70%/30%); *в* – мода I+II (40%/60%); *г* – мода II

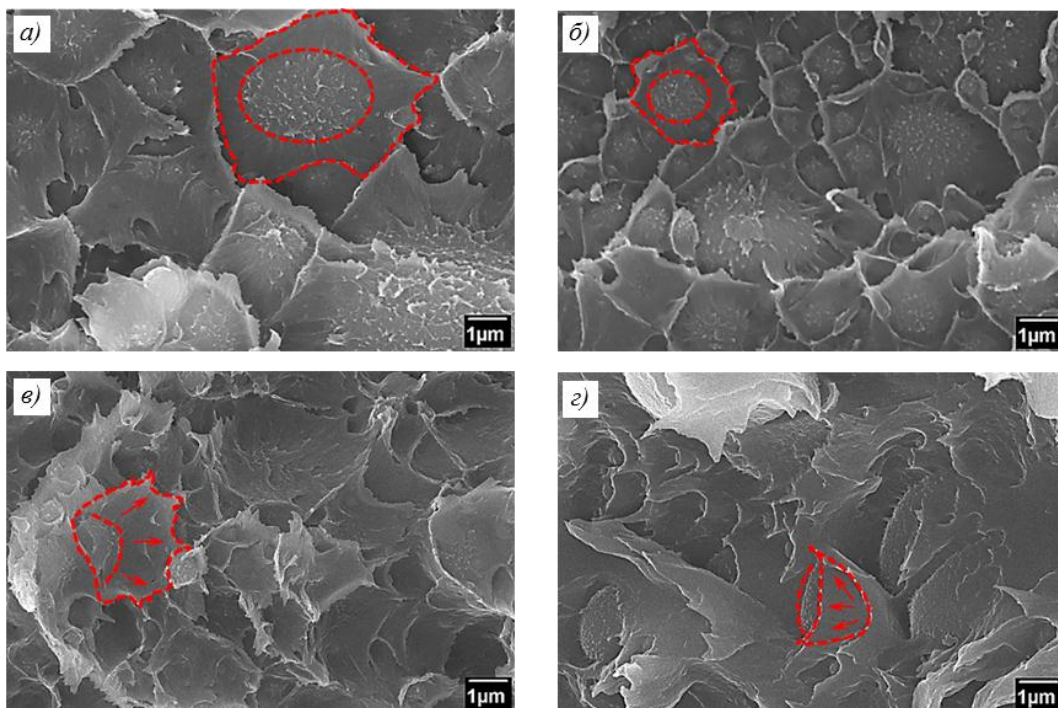


Рис. 4. Изменение микростроения изломов в зоне непрерывной фазы термопласта при изменении условий нагружения ($\times 10000$, информативные элементы излома оконтурены):
а – мода I; *б* – мода I+II (70%/30%); *в* – мода I+II (40%/60%); *г* – мода II

В зоне непрерывной фазы термопласта с повышением вклада сдвига в условия раскрытия трещины проявляется все увеличивающийся эффект наволакивания пластичной фазы полисульфона на сравнительно жесткие эпоксидные домены (рис. 4). Микрорельеф поверхностей разрушения в данной зоне предоставляет информацию не только об условиях нагружения, но и об уровне адгезионной прочности связи «реактопласт–термопласт». В случае пониженной адгезионной прочности поверхность эпоксидных доменов гладкая (на ней отсутствует слой термопласта) [20]. Для исследуемых образцов углепластика можно предположить высокий уровень адгезионной прочности связи «реактопласт–термопласт», на что указывают выявленные тяжи термопласта между поверхностью эпоксидных доменов и непрерывной фазой термопласта.

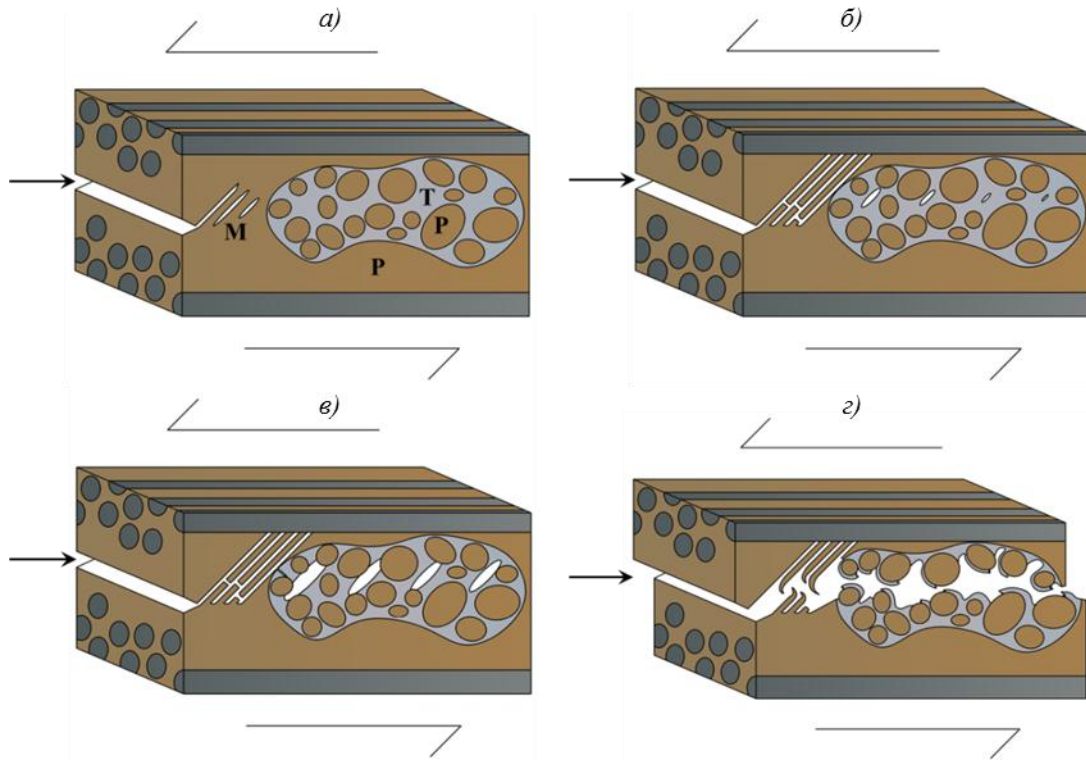


Рис. 5. Формирование микрорельефа сдвига в углепластике с сонепрерывной морфологией полимерной матрицы (М – микротрещины; Р – фаза реактопласта; Т – фаза термопласта; → – направление роста магистральной трещины; ↙ и ↘ – направление перемещения соответствующей части образца): а–г – стадии 1–4

В монографии [18] описан алгоритм определения направления роста межслоевой трещины в условиях поперечного сдвига при нагружении ПКМ с гомогенной терморективной матрицей. Согласно работе [18], в первую очередь требуется определить сторону излома (поверхность межслоевой трещины) с преимущественным разрушением по границе раздела «волокно–матрица»: в данной части образца действовали сжимающие (вдоль осей волокон) напряжения. Направление наклона гребней сдвига на поверхности разрушения данной (сжатой) части образца будет совпадать с ее направлением перемещения и будет противоположно направлению распространения межслоевой трещины [18]. В ПКМ с сонепрерывной фазовой морфологией матрицы (и тем более в случае морфологии с обращением фаз) такой информативный элемент микрорельефа, как гребни сдвига, может не проявляться (или проявляться в степени, недостаточной для точного определения направления). Информативным элементом микрорельефа излома таких ПКМ может выступать наволакивание термопластичной составляющей

на эпоксидные домены. На сжатой стороне излома направление наволакивания совпадает с направлением роста трещины, на растянутой – направление наволакивания противоположно направлению роста трещины. На основании данных фрактографического анализа и условий нагружения предложена схема и последовательность стадий формирования выявленных элементов микрорельефа. На первой стадии (рис. 5, а) в фазе реактопласта в поле напряжений сдвига формируются микротрещины (микрополости), которые начинают расти в условиях растягивающих напряжений, действующих под углом 45 градусов к макроплоскости трещины. На второй стадии (рис. 5, б) в терморективной составляющей формируются характерные гребни сдвига, а в термопластичной фазе начинают формироваться микрополости, рост которых продолжается на третьей стадии (рис. 5, в) до момента достижения поверхностей эпоксидных доменов. На последней стадии (рис. 5, г) формируются поверхности разрушения с характерным микрорельефом наволакивания ввиду перемещения берегов трещины в противоположных направлениях.

Заключения

Наименьшие значения межслоевой трещиностойкости исследуемого углепластика определены при нагружении по смешанной *моде* I+II (при 40%-ном вкладе нормального отрыва). Данный результат подчеркивает необходимость исследования трещиностойкости не только в условиях нагружения нормальным отрывом (*мода* I) и поперечным сдвигом (*мода* II), но и при комбинированном нагружении для более корректного анализа критических и допустимых повреждений конструкций из ПКМ. Изменению условий нагружения углепластика с межслоевой трещиной поставлено в соответствие формоизменение характерных элементов микрорельефа поверхностей разрушения. Увеличение вклада поперечного сдвига в условия нагружения характеризуется следующими фрактографическими признаками:

– уменьшается количество отслоившихся волокон, лежащих на поверхностях разрушения в произвольных направлениях относительно направления армирования (фрактографический признак скрепления берегов трещины частично отслоившимися волокнами);

– в межволоконном пространстве плато отрыва, характерные для раскрытия трещины по *моду* I, переходят в зоны с ручьистым рельефом при 70%-ном вкладе отрыва, затем в гребни с фрагментированной подошвой при 40%-ном вкладе отрыва и, наконец, становятся гребнями чистого сдвига, характерными для раскрытия трещины по *моду* II;

– в зонах непрерывной фазы термопласта проявляется все увеличивающийся эффект наволакивания полисульфона на сравнительно жесткие эпоксидные домены.

Полученные фрактографические данные могут применяться как диагностические признаки условий разрушения при разработке методик испытания материалов и экспертизе эксплуатационных разрушений.

Предложена схема формирования микрорельефа сдвига в углепластике с сонепрерывной фазовой морфологией полимерной матрицы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зиченков М.Ч., Кондаков И.О., Шаныгин А.Н. Новый подход к созданию легких и надежных силовых композитных авиаконструкций // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. №6. С. 127–136.
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. Композиты: сегодня и завтра // *Металлы Евразии*. 2015. №1. С. 36–39.
4. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
5. 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.
6. 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. №2. С. 37–42.
7. Ушаков А.Е. Общая постановка и схема решения задачи обеспечения безопасности авиаконструкций из ПКМ с учетом их повреждаемости // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. №4. С. 339–347.
8. Бабаевский П.Г., Кулик С.Г. Трещиностойкость отвержденных полимерных композиций. М.: Химия, 1991. 336 с.
9. Greenhalgh E.S. Characterisation of mixed-mode delamination growth in carbon-fibre composites: thesis, PhD. London: Imperial College, 1998. 306 p.
10. Charalambous G., Allegri G., Hallett S.R. Temperature effects on mixed mode I/II delamination under quasi-static and fatigue loading of a carbon/epoxy composite // *Composites: Part A*. 2015. Vol. 77. P. 75–86.
11. Панина Н.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Гребенева Т.А., Гуревич Я.М. Основные способы модификации эпоксидных полимерных материалов в России // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2014. №9. С. 10–17.
12. Mouritz A.P., Chang P., Cox B.N. Flexural properties of z-pinned laminates // *Composites Part A*. 2007. Vol. 38. P. 244–251.
13. Платонов А.А. Полимерные композиционные материалы на основе прошитого наполнителя с повышенной ударостойкостью // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №4. С. 43–47.
14. Lin S., Cai Q., Ji J. et. al. Electrospun nanofiber reinforced and toughened composites through in situ nano-interface formation // *Composite Science and Technology*. 2008. Vol. 68. P. 3322–3329.
15. Лобанов М.В., Гуляев А.И., Бабин А.Н. Повышение ударо- и трещиностойкости эпоксидных реактопластов и композитов на их основе с помощью добавок термопластов как модификаторов // *Высокомолекулярные соединения. Сер. Б*. 2016. №1. С. 3–15.
16. Mimura K., Ito H., Fujioka H. Improvement of thermal and mechanical properties by control of morphologies in PES-modified epoxy resins // *Polymer*. 2000. Vol. 41. P. 4451–4459.
17. Pearson R.A., Yee A.F. Toughening mechanisms in thermoplastic-modified epoxies: 1. Modification using poly(phenylene oxide) // *Polymer*. 1993. Vol. 34. No. 17. P. 3658–3670.
18. Greenhalgh E.S. Failure analysis and fractography of polymer composites. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2009. 528 p.
19. Тамуж В.П., Куксенко В.С. Микромеханика разрушения полимерных материалов. Рига: Зинатне, 1978. 294 с.
20. Гуляев А.И., Яковлев Н.О., Крылов В.Д., Лашов О.А. Применение фрактографического анализа при исследовании межслоевого разрушения ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №3 (48). С. 65–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-65-73.
21. 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. №7. С. 1148–1159.
22. Горбаткина Ю.А., Иванова-Мумжиева В.Г., Куперман А.М. Адгезия модифицированных эпоксидных матриц к армирующим волокнам // *Высокомолекулярные соединения. Сер. А*. 2016. №5. С. 439–447.
23. Гуляев А.И., Яковлев Н.О., Шуртаков С.В., Лашов О.А. Влияние температуры и климатического воздействия на механизм межслоевого разрушения углепластика по моде I // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2017. №10. С. 23–30.