



Ожерелков Дмитрий Юрьевич

**ВЯЗКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ ФРИКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Специальность: 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Научный руководитель:

Сазонов Юрий Борисович

кандидат технических наук, доцент кафедры
Металловедения и физики прочности, заведующий
Межкафедральной лабораторией «Наноматериалы»
ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС»

Официальные оппоненты:

Терентьев Владимир Федорович,

доктор технических наук, профессор
главный научный сотрудник ИМЕТ РАН

Магнитский Илья Владимирович,

кандидат технических наук,
заместитель начальника отделения ОАО "Композит"

Ведущая организация:

Акционерное общество «Научно-исследовательский
институт конструкционных материалов на основе
графита «НИИГрафит» (АО «НИИГрафит»)

Защита состоится «31» мая 2018 г. в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета
Д 212.132.08 Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 6, стр. 2, в аудитории А-305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного
автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный
исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу:
<http://misis.ru/science/dissertations/2018/3383/>

Автореферат разослан «___» апреля 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.132.08
доктор физико-математических наук,
профессор



С.И. Мухин

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) благодаря высоким удельным механическим характеристикам, а также сохранению упругих и прочностных свойств до температур 2100-2400 °С, активно используются как жаропрочные и термостойкие материалы в химическом машиностроении, авиационной и ракетно-космической технике.

Одним из направлений применения УУКМ является их использование в конструкциях авиационных тормозных систем (АТС) в качестве материалов тормозных дисков. В настоящий момент около 70% всего производства УУКМ составляют материалы авиационных тормозных дисков. Такой выбор обусловлен сочетанием высоких прочностных характеристик, термопрочности и термостойкости, высокого и стабильного коэффициента трения, обеспечивающего эффективное поглощение кинетической энергии самолета, с малым удельным весом и возможностью существенного снижения массы конструкции.

Сейчас на мировом рынке представлены материалы, обладающие ресурсом до 4500 циклов «взлет-посадка». Для отечественных материалов наблюдается отставание по ресурсу работы тормозных дисков в АТС. Требуется совершенствование технологических схем и режимов изготовления композитов с учетом напряженно-деформированного состояния тормозных дисков в условиях эксплуатации, их адаптации к имеющейся сырьевой и производственной базе предприятий России. Для прочностных расчетов конструкции АТС необходима новая информация о характере поведения УУКМ в условиях воздействия эксплуатационных нагрузок.

УУКМ присущ ряд недостатков, одним из которых является невысокая вязкость разрушения. Единого подхода к оценке напряженного состояния у вершины трещины и методикам определения вязкости разрушения УУКМ нет, а стандартов испытаний на вязкость разрушения УУКМ не существует.

УУКМ работают в условиях меняющегося сложнапряженного состояния. В процессе эксплуатации композита происходит изменение его характеристик, накопление повреждений и изменение структуры под действием циклических нагрузок. Необходима разработка критериев, на основании которых можно было бы прогнозировать работоспособность УУКМ.

Цель работы

Выявление взаимосвязи между структурой, технологией изготовления, особенностями процессов деформирования и разрушения УУКМ фрикционного назначения для прогнозирования работоспособности в реальных условиях эксплуатации.

Задачи, решаемые в рамках поставленной цели

- Экспериментальная оценка напряженно-деформированного состояния у вершины трещины УУКМ;
- Выбор оптимальных критериев оценки вязкости разрушения УУКМ (K_{Ic} , J -интеграл, COD);
- Выявление взаимосвязи между структурой, дефектами структуры, технологией изготовления УУКМ и характеристиками вязкости разрушения;
- Оценка прочности на межслоевой сдвиг УУКМ фрикционного назначения, выявление влияния структуры на межслоевую прочность дискретно-армированных УУКМ;
- Исследование влияния циклического нагружения на вязкость разрушения и межслоевую прочность УУКМ фрикционного назначения;
- Формирование рекомендаций по уточнению методик прочностных расчетов конструкций из УУКМ с учетом характера напряженного состояния у вершины надреза.

Научная новизна работы

- Исследованы поля напряжений и деформаций у вершины трещины в углерод-углеродных композиционных материалах фрикционного назначения с использованием

современных оптических систем. Установлено, что у вершины трещины в УУКМ независимо от схемы армирования и типа армирующего наполнителя реализуется плоско-деформированное напряженное состояние;

- Экспериментально определены размеры зоны концентрации и уровень напряжений у вершины трещины в момент ее старта в УУКМ с различными схемами армирования;
- Показаны границы применимости критериев K_{Ic} , J_{Ic} , J_c , COD для оценки вязкости разрушения УУКМ фрикционного назначения с различными схемами армирования;
- Исследовано изменение вязкости разрушения и межслоевой сдвиговой прочности УУКМ фрикционного назначения типа ТЕРМАР в процессе циклического нагружения, имитирующего условия эксплуатации в АТС. Предложена модель связывающая изменение вязкости разрушения и межслоевой сдвиговой прочности с изменениями структуры в процессе циклического нагружения.

Практическая значимость

На основе результатов работы определены пути повышения вязкости разрушения УУКМ фрикционного назначения:

- Повышение эксплуатационных характеристик тормозных дисков из УУКМ возможно при использовании материалов с армирующими каркасами на основе углеродных тканей, обладающих наибольшими значениями вязкости разрушения;
- Для повышения сопротивления возникновению и развитию межслоевых трещин, в УУКМ с армирующими каркасами на основе тканей, наряду с созданием поперечных связей между слоями по иглопробивной технологии, необходимо использование напыления дискретных волокон на поверхность ткани при формировании каркаса и формирование первичной заготовки с использованием пеков с введенными в них дискретными волокнами;
- Контролируемое ослабление границы раздела «волокно-матрица», так как при реализации технологии ПКД в материале обеспечивается хорошее адгезионное взаимодействие между армирующими волокнами и матрицей, что наряду с повышением ряда упруго-прочностных характеристик приводит к снижению вязкости разрушения. В процессе движения, трещина разрушает волокно и матрицу как единое целое, энергия на разрушение границ не расходуется, не возникают условия рассеяния трещины на границах раздела «волокно-матрица», что приводит к снижению вязкости разрушения таких материалов;
- Контролируемое ослабление границ раздела «волокно-матрица» возможно при проведении тренировки дисков по специально подобранным программам на испытательном стенде;

Даны рекомендации по корректировке методик прочностного расчета тормозных дисков из УУКМ с учетом характера плоско-деформированного напряженного состояния, формы и размеров областей концентрации напряжений, действующих величин напряжений, в областях содержащих дефекты, с учетом их эволюции под действием эксплуатационных нагрузок. Соответствующий Акт прилагается в Приложении 1.

Положения, выносимые на защиту

- Результаты экспериментальной оценки характера напряженного состояния, размеров и конфигурации зоны концентрации напряжений у вершины трещины в УУКМ фрикционного назначения;
- Результаты экспериментальной оценки применимости критериев вязкости разрушения для УУКМ фрикционного назначения;
- Экспериментальная оценка влияния структуры, режимов термообработки и технологических дефектов на вязкость разрушения и межслоевую прочность УУКМ фрикционного назначения;
- Экспериментально обоснованная модель изменения вязкости разрушения и межслоевой сдвиговой прочности УУКМ под действием малоцикловых усталостных нагрузок;

- Способы повышения вязкости разрушения, межслоевой прочности и работоспособности УУКМ фрикционного назначения.

Достоверность результатов исследований

Достоверность результатов достигается за счет использования аттестованного и поверенного современного высокоточного исследовательского оборудования, средств измерений и методик, проведение испытаний на равноценных выборках образцов, обеспечивающих воспроизводимость полученных результатов, согласования полученных результатов с уже имеющимися в литературе данными. Использование различных методов исследования, в ряде случаев дополняющих друг друга, представление и обсуждение результатов на научных мероприятиях различного уровня, а также их опубликование в рецензируемых научных журналах повышает обоснованность сделанных выводов.

Личный вклад автора

Личный вклад автора в работу состоит в подборе и систематизации литературных данных по предлагаемой теме, постановке целей и задач работы, подготовке образцов для испытаний, планировании и проведении испытаний, анализе полученных результатов. Все результаты исследований получены лично автором в межкафедральной лаборатории «Наноматериалы», НИЦ «Композиционных материалов» и НИЛ «Гибридные наноструктурные материалы» НИТУ «МИСиС». В совместных публикациях личный вклад автора состоит в получении и описании основных экспериментальных результатов.

Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы представлены на следующих конференциях: V Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (г. Москва, 2013 г); VII-я Евразийская научно-практическая конференция «Прочность неоднородных структур» ПРОСТ 2014 (г. Москва, 2014 г); VI Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (г. Москва, 2015 г); VI Международная конференция «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов» (г. Москва, 2015 г); VIII-я Евразийская научно-практическая конференция «Прочность неоднородных структур» ПРОСТ 2016 (г. Москва, 2016 г); 10-я Международная конференция «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология» (г. Москва, 2016 г); VII Международная конференция «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов» (г. Москва, 2017 г); VII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (г. Москва, 2017 г).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 3 научные статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, и 13 тезисов докладов, опубликованных в сборниках трудов российских и международных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов и списка литературы. Материалы диссертационной работы изложены на 126 страницах, содержат 59 рисунков, 10 таблиц, 1 приложение. Библиографический список содержит 198 наименований.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулированы основные цели и задачи работы, определены новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен аналитический литературный обзор, посвященный технологии изготовления тормозных дисков АТС из УУКМ, структуре и свойствам УУКМ

фрикционного назначения. Произведен анализ напряженно-деформированного состояния тормозного диска УУКМ фрикционного назначения, возникающего в процессе эксплуатации.

Анализ условий работы тормозных дисков показал, что на работоспособность УУКМ в процессе торможения существенное влияние оказывают сжимающие и изгибающие напряжения, возникающие в процессе обжатия тормозного пакета системой гидравлических поршней в осевом направлении. В эксплуатации тормозные диски испытывают редкие, значительные перегрузки в окружном направлении в результате пиковых режимов работы, подчиняющиеся закономерностям малоциклового усталости при взаимодействии пазов дисков с металлическими крепежными деталями.

Анализ работ, посвященных вязкости разрушения УУКМ с различными схемами армирования, структурой и технологией получения, показывает, что в настоящее время единого подхода к оценке вязкости разрушения и напряженного состояния у вершины трещины в УУКМ нет, а также не существует единой методики определения вязкости разрушения для данного класса материалов. Значительная часть исследований посвящена изучению усталостного поведения УУКМ в условиях далеких от эксплуатационных. Исследований усталости УУКМ при сжатии и исследований влияния циклического нагружения на вязкость разрушения УУКМ недостаточно для построения моделей, позволяющих прогнозировать ресурс работы конструкций из таких материалов. В случае нагружения в окружном направлении тормозного диска или в случае присутствия структурных дефектов УУКМ, сдвиговые деформации могут приводить к межслоевому разрушению материала, которое очень опасно по причине низкой межслоевой прочности УУКМ.

На основе этого анализа в данной работе произведен выбор методик испытаний УУКМ, а также поставлены задачи исследования.

Во **второй главе** описываются материалы и методы исследования. В данной работе было исследовано четыре технологических варианта УУКМ фрикционного назначения: 2 серийных (ТЕРМАР-ДФ и ТЕРМАР-АДФ) и 2 экспериментальных (Графикит 2000 и Графикит 2400) Исследованные материалы относятся к классу дискретно-армированных, трансверсально-изотропных (монотропных) композиционных материалов.

В качестве армирующего наполнителя при изготовлении материала ТЕРМАР-ДФ использовано графитированное волокно ВПР-19с (ТУ-48-20-23-83), разрезанное на фрагменты; средняя длина филаментов в готовом материале 0,1-0,5 мм, армирующий каркас сформирован гидроосаждением дискретного волокна. Матрица сформирована на основе коксового остатка среднетемпературного пека через циклы «пропитка пеком – карбонизация при 900 °С». Финальная термическая обработка проходила при температуре 2000 °С в течение 1 часа.

В качестве армирующего наполнителя при изготовлении материала ТЕРМАР-АДФ использовано графитированное волокно ВПР-19с (ТУ-48-20-23-83), разрезанное на фрагменты; средняя длина филаментов в готовом материале 20 мм. Первичное формирование матрицы проведено на низкотемпературном пеке, дальнейшее формирование на среднетемпературном пеке через 2 цикла «пропитка – карбонизация под давлением». Финальная термическая обработка проходила при температуре 2000 °С в течение 1 часа.

В качестве армирующего наполнителя материалов Графикит 2000 и Графикит 2400 использована ткань на основе высокомодульных углеродных волокон из ПАН, разрезанная на фрагменты 30×30 мм. Разрезанные фрагменты равномерно-хаотично уложены в плоскости диска. Первичная матрица формировалась через циклы «пропитка среднетемпературным пеком – карбонизация» до плотности 0,9 г/см³. Полученная заготовка прошла дальнейшее формирование через 3 цикла «пропитка – карбонизация под давлением» в газостате. Финальная термическая обработка 2000 °С и 2400 °С в течение 1 часа соответственно для материалов Графикит 2000 и Графикит 2400.

Испытания образцов проводились в двух направлениях: осевом направлении OZ (перпендикулярно слоям укладки волокон тормозного диска) и радиальном направлении OR (параллельно слоям укладки волокон тормозного диска). Направления вырезки и испытаний образцов схематически приведены на рисунке 1.

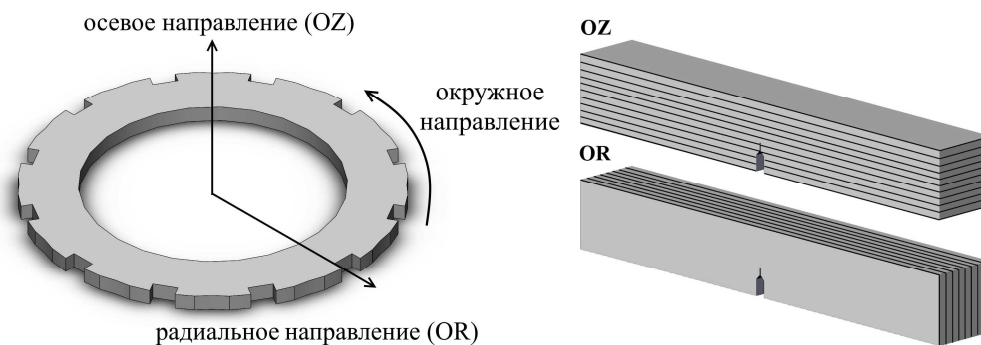


Рисунок 1 – Направление вырезки и испытаний образцов УУКМ.

Определение плотности (ρ) проводилось геометрическим методом и методом гидростатического взвешивания, открытая пористость (I) определялась по адсорбции гелия. Проводился отбор образцов по наличию дефектов структуры.

Испытания на сжатие проводились на призматических образцах размерами 20×10×10 мм. Определение предела прочности ($\sigma_{сж}$) и коэффициентов Пуассона (ν) проводилось со скоростью нагружения 2 мм/мин. Испытания на трехточечный изгиб проводились на призматических образцах 70×10×10 мм. Определение предела прочности ($\sigma_{изг}$) и модуля упругости ($E_{изг}$) проводилось со скоростью нагружения 2 мм/мин. Прочность на межслоевой сдвиг определялась по методике АО «НИИГрафит» при испытании на сжатие на образцах 18×10×10 мм с надрезами на противоположных гранях со скоростью нагружения 2 мм/мин.

Параметры вязкости разрушения определялись при трехточечном изгибе на образцах сечением 70×10×10 мм с концентратором со скоростью нагружения 0,5 мм/мин. Первичный надрез был получен с помощью фрезы толщиной 1 мм на глубину 1-3 мм, затем от его вершины лезвием была нанесена острая трещина – надрез толщиной 0,08 мм, глубиной 0,5-1 мм. Соотношение глубины надреза (l) к толщине образца (b) варьировалось в пределах 0,25-0,45. Расстояние между опорами при испытании составляло 60 мм. В процессе испытания записывались диаграммы «Нагрузка – Раскрытие трещины» с использованием датчика раскрытия трещины консольного типа.

Циклическое нагружение проводилось при сжатии в окружном направлении до нанесения концентраторов. В работе были использованы три уровня циклической нагрузки – 0,5, 0,7 и 0,8 от предела прочности на сжатие материала в радиальном направлении. Количество циклов нагружения 10, 100, 1000 с частотой 1 Гц.

Построение полей напряжений и деформаций у вершины трещины проводилось при помощи цифровой оптической системы VIC-3D фирмы Correlated Solutions, состоящей из двух монохромных цифровых камер и программного обеспечения. Запись сигналов акустической эмиссии и определение момента старта трещины проводилось с использованием измерительной системы на базе платформы PXI компании National Instruments. Фрактографические исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM-1000.

В **третьей главе** представлены результаты испытаний на вязкость разрушения УУКМ фрикционного назначения. В первой части главы представлены результаты статических испытаний на сжатие и трехточечный изгиб, результаты определения плотности и пористости образцов исследуемых материалов. Плотность и пористость определяли для разделения образцов в равноценные выборки, обеспечивающие воспроизводимость полученных результатов. Данные представлены в таблице 1, где приведены средние значения по 7-16 образцам на точку и их стандартные отклонения.

Значения предела прочности для материалов при сжатии в осевом направлении приведены в таблице 1. С уменьшением длины армирующего наполнителя и увеличением нелинейности укладки армирующих элементов в материале происходит снижение величины предела прочности. В радиальном направлении для всех материалов предел прочности составляет ~ 90 МПа. Это связано с особенностями армирования исследуемых УУКМ, где армирующий наполнитель преимущественно расположен в плоскости диска и при приложении

нагрузки на сжатие работает преимущественно углеродная матрица. Для материала ТЕРМАР-ДФ, структура которого близка к изотропной, а волокна расположены хаотично, пределы прочности при сжатии в разных направлениях практически совпадают.

Таблица 1. Характеристики исследуемых УУКМ

Характеристика	ТЕРМАР-ДФ	ТЕРМАР-АДФ	Графикит 2000	Графикит 2400
ρ , г/см ³	1,78±0,01	1,77±0,02	1,76±0,01	1,76±0,01
Π , %	11,4±1,21	7,6±1,10	8,0±0,80	8,2±0,60
ν^{OZ}	0,22±0,03	0,20±0,03	0,25±0,03	0,27±0,03
ν^{OR}	0,03±0,01	0,03±0,01	0,08±0,01	0,08±0,01
σ_{u3z}^{OZ} , МПа	69,8±4,1	102,2±15,2	117,2±18,9	145,6±28,7
σ_{u3z}^{OR} , МПа	73,3±6,2	124,5±13,4	237,9±9,8	219,1±19,6
E_{u3z}^{OZ} , ГПа	6,2±0,4	35,14±3,5	22,18±2,8	31,56±5,2
E_{u3z}^{OR} , ГПа	8,5±0,7	43,84±4,1	40,47±3,6	49,5±4,7
$\sigma_{сж}^{OZ}$, МПа	99,1±10	135,9±14,9	147,9±18,8	165,7±13,4
$\sigma_{сж}^{OR}$, МПа	92±10	95,9±7,1	87,5±17,6	83,1±6,3
$E_{сж}^{OZ}$, ГПа	7,0±0,7	5,4±0,7	5,1±0,3	4,4±0,2
$E_{сж}^{OR}$, ГПа	11,9±1,4	27,8±3,2	24,4±6,3	23,5±3,5
σ_B^{OR} , МПа	22,3±4,0	53,3±7,5	80,7±6,7	88,2±8,6
E_B^{OR} , ГПа	6,2±0,6	29,8±5,4	24,2±4,8	20,3±6,2
K_{Ic}^{OZ} , МПа√м	2,01±0,13	-	-	-
K_{Ic}^{OR} , МПа√м	2,61±0,16	-	-	-
J_{Ic}^{OZ} , кДж/м ²	0,66±0,095	1,40±0,21	3,61±0,85	5,02±0,91
J_{Ic}^{OR} , кДж/м ²	0,92±0,059	1,42±0,22	5,90±0,31	6,13±0,53
K_{Ic}^{OZ} из J_{Ic}^{OZ} , МПа√м	2,12±0,15	7,48±0,72	9,33±1,05	12,94±1,11
K_{Ic}^{OR} из J_{Ic}^{OR} , МПа√м	2,54±0,17	8,59±0,53	15,71±0,56	17,78±0,73
COD^{OZ} , мм	0,011±0,001	0,026±0,0003	0,052±0,004	0,061±0,005
COD^{OR} , мм	0,009±0,001	0,019±0,0002	0,031±0,0009	0,035±0,0006

Критические значения коэффициентов интенсивности напряжений, величины J -интеграла и критического раскрытия трещины COD определяли по следующим формулам:

Коэффициент интенсивности напряжений рассчитывали по формуле:

$$K_{Ic} = \frac{P_Q L}{Bb^{\frac{3}{2}}} Y \quad (1)$$

где P_Q – нагрузка в точке пересечения с 5 %-ной касательной, Н; L – расстояние между опорами, мм; l – длина нанесенной трещины, мм; B – ширина образца, мм; b – толщина образца, мм; Y – безразмерная гамма-функция отношения l/b .

Величина гамма-функции определялась по методике ASTM E1820:

$$Y = \frac{3\left(\frac{l}{b}\right)^{\frac{1}{2}}\left(1,99 - \frac{l}{b}\right)\left(1 - \frac{l}{b}\right) \cdot \left(2,15 - 3,93\left(\frac{l}{b}\right) + 2,7\left(\frac{l}{b}\right)^2\right)}{2\left(1 + \frac{2l}{b}\right)\left(1 - \frac{l}{b}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

При определении параметра K_{Ic} результаты считались недействительными, если значение максимальных напряжений на диаграмме $P_{max} > 1,1 \cdot P_Q$.

Параметр J_{Ic} определяли по диаграмме «Нагрузка – Раскрытие трещины», момент старта трещины (f_c) определяли по скачку количества событий на диаграмме акустической эмиссии, старт магистральной трещины всегда совпадал с моментом достижения максимальной нагрузки. До уровня нагрузки $0,8-0,9 \cdot P_{max}$ сигналы акустической эмиссии отсутствуют. По достижении

этого уровня нагрузки на акустической диаграмме появляются отдельные события, частота и интенсивность которых возрастает с ростом действующих напряжений. Работу раскрытия трещины, необходимую для расчета параметра J_{Ic} на упругом (A_{el}) и пластическом (A_{pl}) участках, определяли по площади под соответствующими участками кривой «Нагрузка – Раскрытие трещины». Сам же параметр был рассчитан по формуле:

$$J_{Ic} = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} + \frac{nA_{pl}}{Bb} \quad (3)$$

где K – коэффициент интенсивности напряжений; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга; B – ширина образца; b – толщина образца; A_{pl} – работа, затраченная на пластическое распространение трещины; n – безразмерная функция отношения l/b , определяемая по уравнению:

$$n = 3,785 - 3,101\left(\frac{l}{b}\right) + 2,018\left(\frac{l}{b}\right)^2 \quad (4)$$

Величины K_{Ic} и J_{Ic} связаны соотношением:

$$J_{Ic} = \frac{K_{Ic}^2(1-\nu^2)}{E} \quad (5)$$

где K – коэффициент интенсивности напряжений; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга.

Наличие такого соотношения позволяет рассчитать значение коэффициента интенсивности напряжений по результатам определения J -интеграла.

Параметр критического раскрытия трещины (COD) определялся в соответствии с ASTM E1820 по следующей формуле:

$$\delta = \frac{K^2 \cdot (1-\nu^2)}{2 \cdot \sigma_{ys} \cdot E} + \frac{r_p \cdot (b-l) \cdot A_{pl}}{r_p \cdot (b-l) + l + Z} \quad (6)$$

где K – коэффициент интенсивности напряжений; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга; σ_{ys} – предел текучести; r_p – коэффициент вращения = 0,44; A_{pl} – работа, затраченная на пластическое распространение трещины; z – начальное положение датчика; l – длина нанесенной трещины, b – толщина образца в месте надреза.

Разрушение УУКМ имеет псевдо-пластический характер (рисунок 2). Кривая нагрузки может быть поделена на 3 части: линейный рост нагрузки, нелинейный рост нагрузки и ступенчатое снижение нагрузки. Каждая часть соответствует этапу разрушения: упругая деформация композиционного материала, возникновение и развитие трещин в матрице, расслоение на границе «волокно-матрица», выдергивание и разрушение волокон.

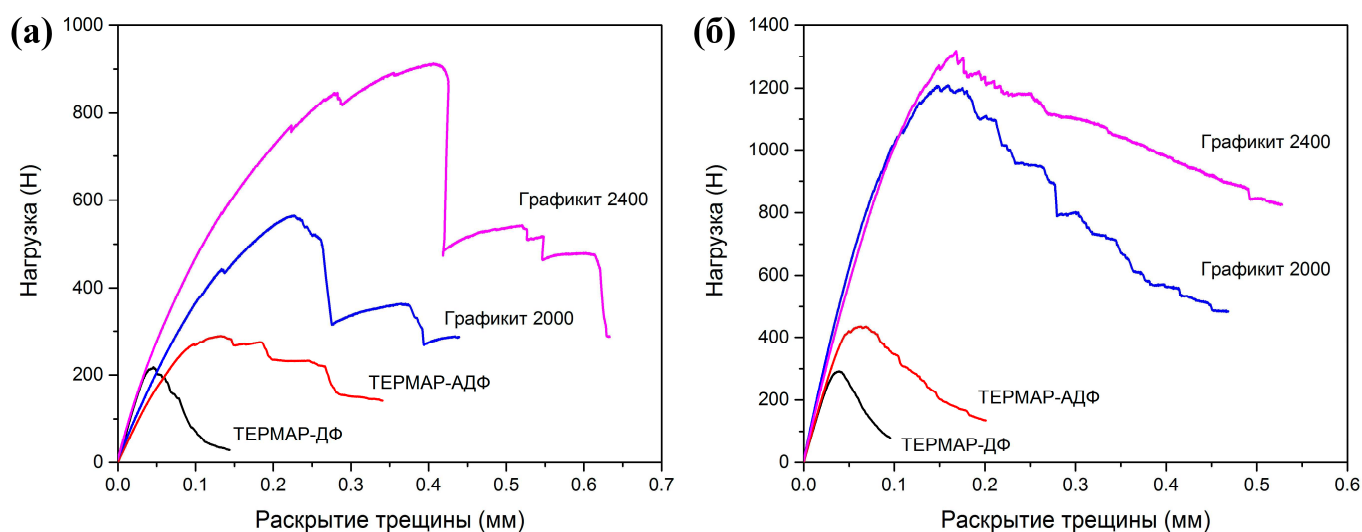


Рисунок 2 – Характерный вид диаграмм разрушения УУКМ: (а) – осевое направление (0Z), (б) – радиальное направление (0R).

При псевдо-пластическом разрушении образцы после достижения максимальной нагрузки и начала разрушения некоторое время сохраняют несущую способность.

Для материала ТЕРМАР-ДФ кривая линейна примерно до 95% предела прочности, для других материалов наблюдается высокая нелинейность диаграмм «Нагрузка-Раскрытие трещины». Рассчитать параметр K_{Ic} удалось лишь для материала ТЕРМАР-ДФ, армированного коротким дискретным волокном. Для всех образцов трех других материалов отношение $P_{max}/P_Q \geq 1,1$, что, следуя ASTM 1820, говорит о недопустимости применения параметров и подходов линейной упругой механики разрушения, а, следовательно, силовой коэффициент интенсивности напряжений (K_{Ic}) не может быть рассчитан корректно.

Для описания вязкости разрушения материалов ТЕРМАР-АДФ, Графикит 2000 и Графикит 2400 следует пользоваться параметрами упругопластической механики разрушения, а именно – J -интегралом. В данной работе необходимое условие упругопластической механики разрушения $b, l \geq 25 \cdot (J_{Ic}/\sigma_{ys})$ для УУКМ выполняется, значения J_{Ic} , приведенные в таблице 1 адекватны.

Результаты определения параметров вязкости разрушения приведены в таблице 1. Наибольшие значения вязкости разрушения наблюдаются для материала Графикит 2400, армированного тканями. При этом вязкость разрушения для всех материалов выше в радиальном направлении. Наименьшие значения вязкости разрушения демонстрирует материал ТЕРМАР-ДФ, армированный короткими волокнами.

Характер распространения трещин в материалах ТЕРМАР-АДФ, Графикит 2000 и Графикит 2400 отличается от нормального, а наблюдаемое при этом напряженное состояние у вершины трещины не соответствует моде I типа. Так как в процессе развития разрушения происходят остановки в развитии трещины и не наблюдается полного разрушения образцов, при расчете вязкости разрушения материала следует учитывать часть кривой «Нагрузка-Раскрытие трещины», расположенную после точки максимальной нагрузки P_{max} , а использование критерия J_{Ic} , при расчете которого учитывается лишь работа зарождения трещины до момента пиковой нагрузки, представляется не совсем корректным.

Таким образом, ни параметр K_{Ic} , ни параметр J_{Ic} не могут в полной мере описать вязкость разрушения данного материала. Поэтому для оценки вязкости разрушения УУКМ был использован метод, основанный на расчете скорости освобождения энергии при разрушении (J_c), учитывающий полную работу разрушения (A_{fr}) с использованием заданных значений раскрытия трещины (f) на кривых «Нагрузка-Раскрытие трещины» для образцов с различной длиной начальной трещины (l).

Значения A_{fr} рассчитывались как площадь под кривой от начала нагружения до выбранного набора значений раскрытия, в отличие от расчетов J_{Ic} , где работа A_{pl} рассчитывалась только до момента старта трещины (P_{max}). Работа разрушения уменьшается с ростом длины начальной нанесенной трещины. Расчет скорости освобождения энергии при разрушении (J_c) для заранее заданных значений раскрытия произведен по формуле:

$$J_c = \frac{-(\Delta A_{fr}/\Delta l)}{B} \quad (7)$$

где A_{fr} – полная работа разрушения, l – начальная длина трещины, B – ширина образца, $\Delta A_{fr}/\Delta l$ – наклон прямой линейной аппроксимации для графика $A_{fr}(l)$ для каждого из выбранных значений раскрытия трещины.

Выбранные значения раскрытия трещины были нормированы на среднее значение раскрытия (f_c) при максимальной нагрузке (P_{max}) для всех испытанных образцов с различными длинами начальных концентраторов (l). Для описания вязкости разрушения УУКМ построены графики зависимости значения J_c от нормированного раскрытия трещины (f/f_c) (рисунок 3).

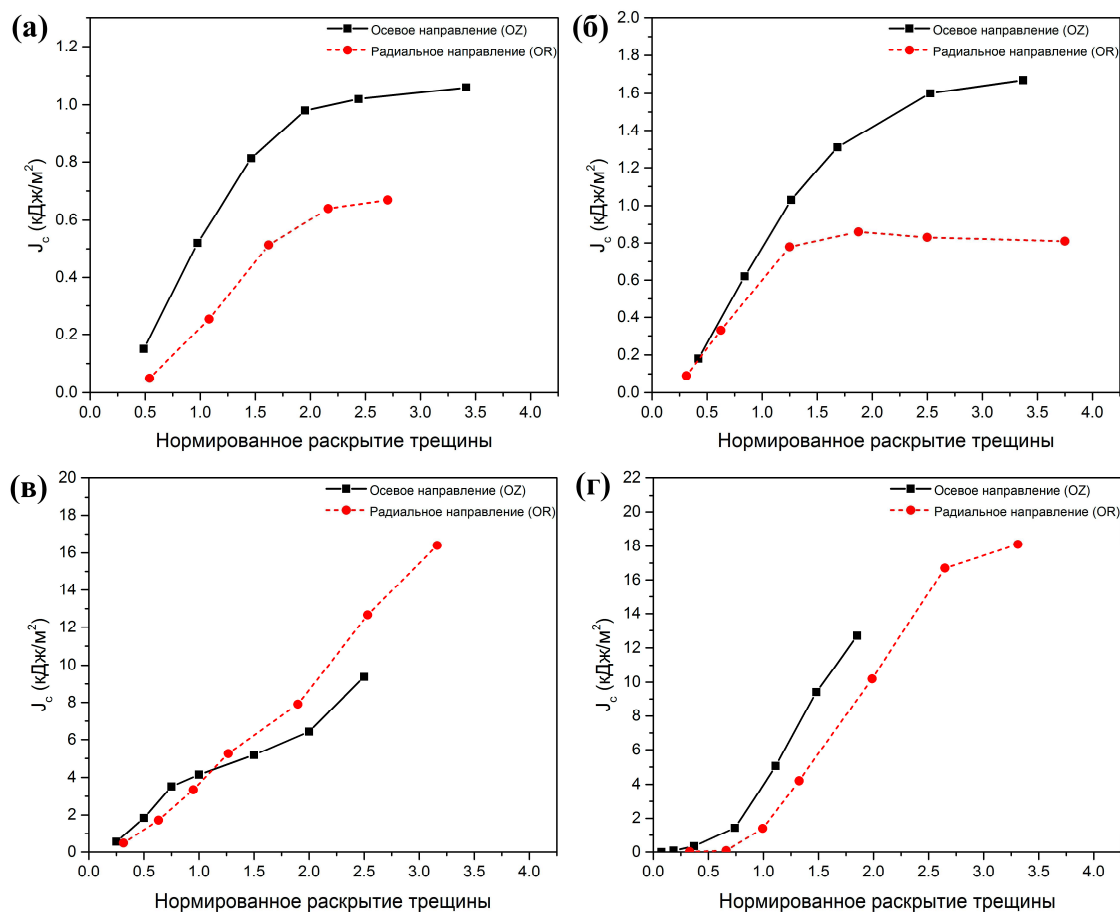


Рисунок 3 – Зависимость скорости освобождения энергии при разрушении (J_c) УУКМ от нормированных значений раскрытия трещины (f/c): (а) – ТЕРМАР-ДФ; (б) – ТЕРМАР-АДФ; (в) – Графikit 2000; (г) – Графikit 2400.

Значения J_c возрастают с увеличением нормированного значения раскрытия трещины. Для материалов, армированных дискретными волокнами, кривые возрастают вплоть до значений $J_c = 1,06$ кДж/м² для осевого направления, $J_c = 0,67$ кДж/м² для радиального направления материала ТЕРМАР-ДФ и $J_c = 1,7$ кДж/м² для осевого направления, $J_c = 0,9$ кДж/м² для радиального направления материала ТЕРМАР-АДФ, а затем выходят практически на горизонтальную прямую. Для материалов Графikit 2000 и Графikit 2400, армированных тканями, не наблюдается выхода значений вязкости разрушения на постоянный уровень с ростом величины нормированного раскрытия трещины. С ростом трещины увеличивается вязкость разрушения материала. Для материалов, армированных дискретными волокнами, значения в осевом направлении значительно выше значений, полученных для радиального направления. Решающую роль вносит большее отклонение трещины от распространения по моде I типа в осевом направлении и, следовательно, требуется большая работа, необходимая для ее продвижения. Для материалов, армированных тканями, значения скорости освобождения энергии при разрушении выше в радиальном направлении. Описанный параметр (J_c) является более предпочтительным для описания вязкости разрушения УУКМ.

Наличие в материале дефектов структуры, таких как включения хрупкой матрицы, перегибы волокон Z- и V-образной формы, снижает вязкость разрушения материала примерно в 2 раза. Разрушение происходит по поверхности дефекта.

При движении трещины в материале ТЕРМАР-ДФ происходит разрушение границы раздела и выдергивание элементарных волокон из матрицы (рисунок 4 (а)), а не их разрушение, что позволяет предполагать, что средняя длина армирующего наполнителя в композите меньше критической. То же характерно и для материала ТЕРМАР-АДФ (рисунок 4 (б)). Разрушение также происходит преимущественно путем выдергивания волокон.

Внутри жгутов материалов Графikit 2000 и Графikit 2400 сформирована плотная, связанная с волокном матрица. Жгуты объединяются в пространственные сетки. В результате

для распространения трещины необходимо не выдергивать и разрушать отдельные волокна из матрицы, а сперва разрушить матрицу в жгуте, а затем и сам жгут. Трещина склонна распространяться между слоями, а материал склонен к расслоению (рисунок 4 (в)). В материале наблюдается большое количество микропор, края которых связаны между собой элементарными волокнами. Наличие подобных микропор является фактором, способствующим увеличению вязкости разрушения.

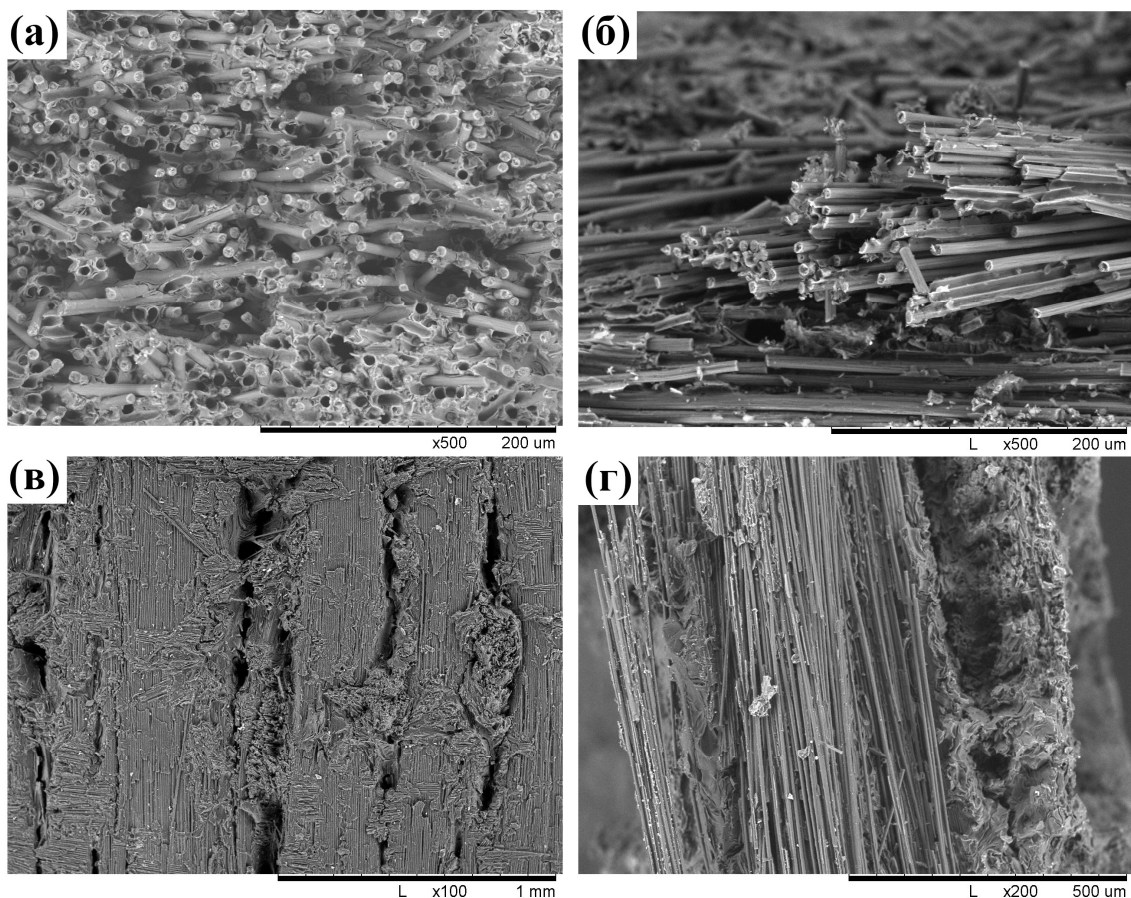


Рисунок 4 – Фрактография УУКМ после испытаний на вязкость разрушения: (а) - ТЕРМАР-ДФ, (б) - ТЕРМАР-АДФ, (в) – Графikit 2000, (г) – Графikit 2400.

Наибольшие значения вязкости разрушения показывают материалы, армированные фрагментированными тканями. При этом самые высокие значения наблюдаются у материала Графikit 2400 с температурой финальной термической обработки 2400 °С, т.к. в результате протекания графитации прочность материала матрицы и прочность границы раздела «волоконно-матрица» снижается. Самые низкие значения вязкости разрушения показывает материал ТЕРМАР-ДФ, армированный короткими дискретными волокнами и произведенный по отличной от трех других материалов технологии. Расслоение и выдергивание волокон, стягивание краев пор в материале элементарными волокнами увеличивает необходимую работу, затраченную на разрушение, и приводит к повышению вязкости разрушения материала.

В четвертой главе представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния с экспериментальной оценкой полей деформаций и напряжений у вершины трещины. В настоящее время единого подхода к оценке напряженного состояния у вершины трещины в УУКМ нет. Появление оптических и лазерных систем измерения деформации позволяет визуализировать поле деформаций, возникающих у вершины трещины, и уточнить характер напряженно-деформированного состояния в УУКМ.

В процессе испытаний на вязкость разрушения происходила регистрация полей напряжений и деформаций у вершины трещины при помощи цифровой оптической системы VIC-3D. Система позволяет определить поля деформаций и напряжений экспериментально, в процессе испытания.

Эволюция напряженно-деформированного состояния у вершины трещины в материале ТЕРМАР-ДФ представлена на рисунке 5. Область, в которой происходит локализация процесса повреждений в материале в зоне концентратора напряжений, показана на рисунке 5 (а). В то время как основная часть материала остается практически ненагруженной, в области радиусом 2-3 мм напряжения достигают значений, превышающих в 2,5-3 раза соответствующий предел прочности материала. Изменение напряженного состояния у вершины трещины в процессе нагружения образца представлено на рисунке 5 (б)-(к). При малых напряжениях (рисунок 5 (б)) концентрация напряжений у вершины трещины не проявляет себя, поле малых деформаций распространяется в образце параллельно нейтральному слою. С увеличением нагрузки начинается локализация напряжений в области концентратора (рисунок 5 (в), (г)). На рисунке 5 (д) показано поле напряжений непосредственно в момент перед стартом трещины. Развитие трещины происходит скачкообразно, продвижение трещины приводит к частичному снижению уровня напряжений перед ее вершиной (рисунок 5 (е)). При дальнейшем приложении нагрузки, по достижении критического уровня напряжений перед ее вершиной (рисунок 5 (ж)-(к)), происходит дальнейший рост трещины.

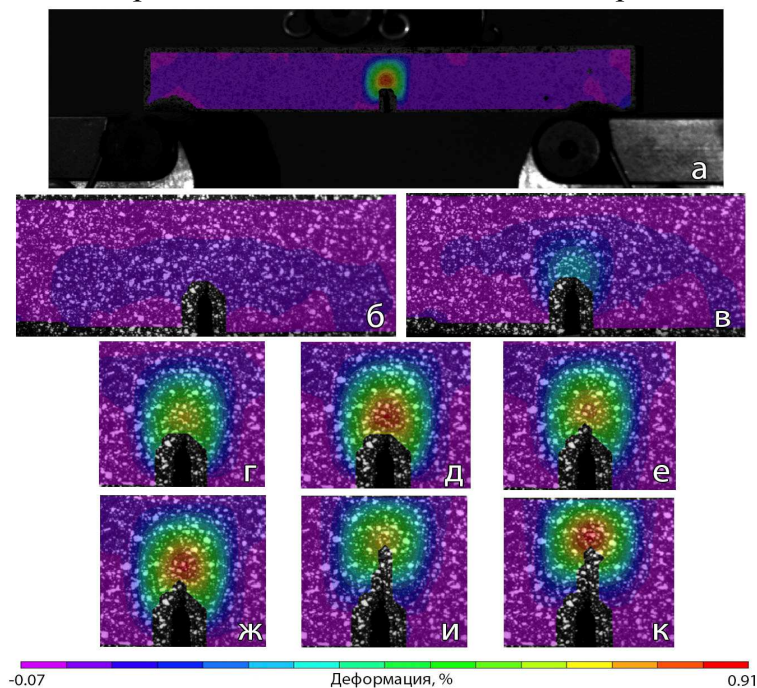


Рисунок 5 – Развитие напряженно-деформированного состояния материала ТЕРМАР-ДФ в процессе испытания образца с трещиной:

(а) – поле деформаций перед стартом трещины; (б) – поле деформаций при малых напряжениях; (в), (г) – начало локализации напряжений и их концентрация перед вершиной трещины соответственно; (д), (ж), (к) – поле напряжений перед стартом трещины; (е), (и) – после остановки роста трещины.

Рост трещины происходит скачкообразно и сопровождается остановками в ее развитии при снижении напряжений перед вершиной, что хорошо видно по данным цифровой оптической системы VIC-3D. Старт трещины происходит в момент, когда растягивающие напряжения у вершины трещины достигают значений 42-44 МПа, а на расстоянии 1,5 мм перед ее фронтом – 52-56 МПа. Дальнейшее развитие трещины останавливается при уменьшении напряжений у ее вершины до значений 30-35 МПа и максимальных напряжений перед фронтом трещины до 42-44 МПа. За один цикл развития трещина в среднем продвигается на 0,3-0,4 мм. Как видно из рисунка 5 (а), концентрация напряжений при действии на образец изгибающей нагрузки происходит в локальном объеме, диаметр которого составляет 6-7 мм, в остальном материале деформации практически отсутствуют. Максимальные деформации и соответствующие им максимальные напряжения возникают на расстоянии 1,5 мм от текущей вершины трещины.

Аналогичный механизм наблюдается для всех материалов, однако существуют некоторые особенности. Так для материала ТЕРМАР-АДФ максимальные деформации и соответствующие им максимальные напряжения, превышающие предел прочности материала примерно в 3 раза, возникают на расстоянии 1,5-3 мм от текущей вершины трещины. Для образцов, испытанных в осевом направлении, происходит отклонение от нормального распространения трещины, наблюдается ветвление трещины и локальное расслоение материала. Подобный характер распространения трещины увеличивает необходимую работу, затраченную на разрушение, и приводит к повышению вязкости разрушения материала.

Для материалов Графики 2000 и Графики 2400 стоит отметить существование довольно больших областей сжимающих напряжений под пуансоном. Благодаря использованию тканых наполнителей возникающие перед фронтом трещины напряжения распределяются на больший объем материала, в отличие от материалов ТЕРМАР-ДФ и ТЕРМАР-АДФ, в которых происходит локализация напряжений. Максимальные локальные напряжения в момент старта трещины соизмеримы с пределом прочности материала. Изменение напряжений в материале перед вершиной трещины в момент, предшествующий ее старту, показано на рисунке 6.

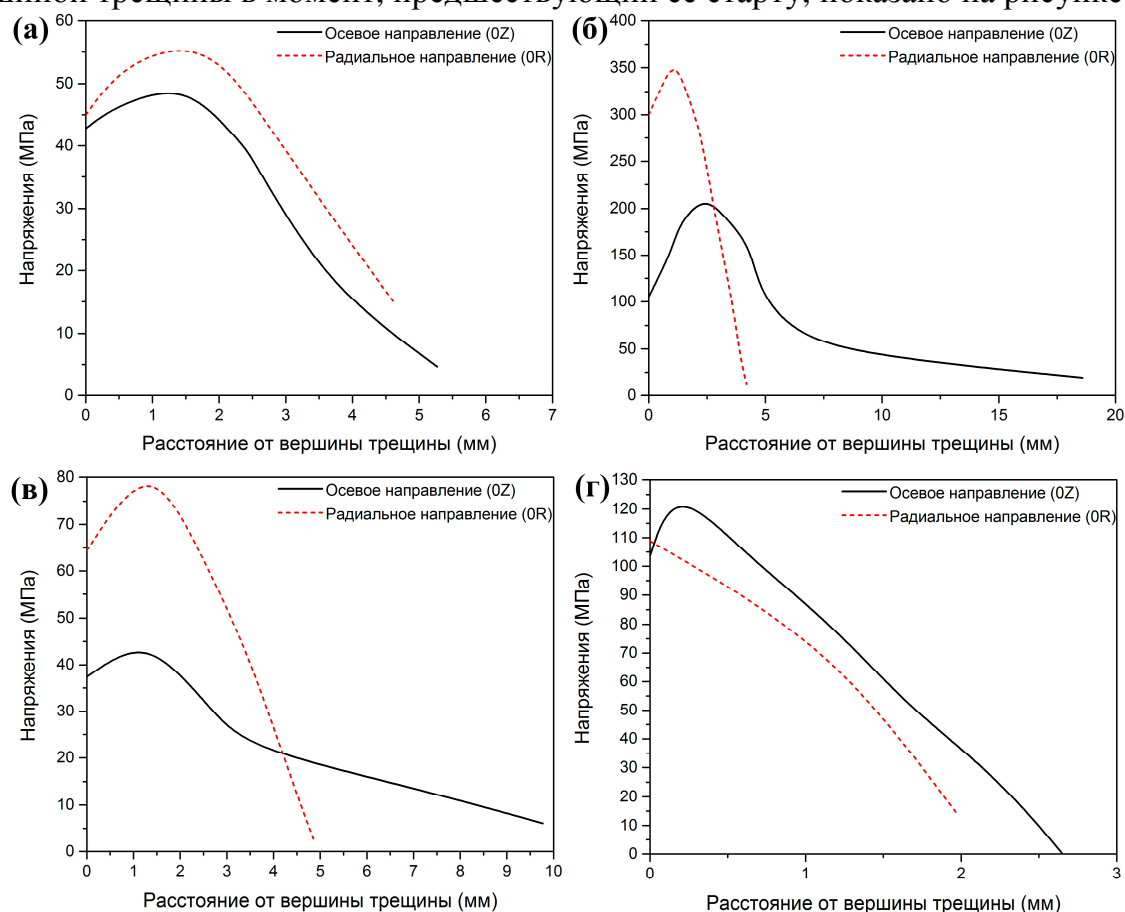


Рисунок 6 – Распределение напряжений в области перед вершиной трещины УУКМ в момент ее старта для осевого направления (0Z) и радиального направления (0R): (а) – ТЕРМАР-ДФ; (б) – ТЕРМАР-АДФ; (в) – Графики 2000; (г) – Графики 2400.

Наблюдаемый характер изменения напряжений показывает, что в УУКМ перед вершиной трещины реализуется плоско-деформированное напряженное состояние. В то время как большинство работ, посвященных изучению вязкости разрушения УУКМ, предполагают реализацию в них плоско-напряженного состояния и использование коэффициента интенсивности напряжений в качестве критерия вязкости разрушения. По графикам видно, что напряжения в материалах, армированных тканями меньше, чем в материалах, армированных дискретными волокнами, по причине их локализации в большем объеме образца.

Наблюдаемое напряженное состояние у вершины трещины материалов ТЕРМАР-АДФ, Графики 2000 и Графики 2400 не соответствует моде I типа и не позволяет описывать его вязкость разрушения в соответствии с линейной механикой разрушения, используя параметр K_{Ic} , в отличие от материала ТЕРМАР-ДФ, армированного короткими волокнами.

Для образцов с дефектами микроструктуры концентрация напряжений происходит не только в зоне надреза, но и в области, примыкающей к дефекту, а сами напряжения в момент старта трещины примерно в 2 раза ниже по сравнению с образцами без дефектов.

В пятой главе представлены результаты определения межслоевой прочности УУКМ и исследовано изменение вязкости разрушения и межслоевой прочности УУКМ под действием циклических нагрузок.

Сдвиговые деформации могут стать определяющими в процессе разрушения в случае нагружения перпендикулярно оси тормозного диска или в случае присутствия структурных дефектов УУКМ. Подобные деформации могут приводить к межслоевому разрушению материала, которое очень опасно по причине низкой межслоевой прочности УУКМ по сравнению с прочностью на сжатие и одноосное растяжение. Изучение процессов, происходящих при межслоевом разрушении, необходимо для получения представления о механизмах поведения УУКМ в условиях сложнапряженного состояния, приближенного к реальным условиям работы в конструкциях АТС.

Значения прочности межслоевого сдвига были определены по методике АО «НИИГрафит». Испытания на сжатие проводили на образцах размером 18×10×10 мм с надрезами на противоположных гранях. Скорость движения подвижной опоры в процессе испытания – 2 мм/мин. Межслоевая прочность рассчитывалась по формуле:

$$\sigma_{mn} = \frac{P_{max}}{LT}, \quad (8)$$

где σ_{mn} – межслоевая прочность, МПа; P_{max} – максимальная нагрузка, Н; L – расстояние между вырезами, мм; T – толщина образца, мм.

Во всех случаях разрушение происходило по плоскости между двумя надрезами образца.

Таблица 2. Межслоевая сдвиговая прочность УУКМ

Материал	σ_{mn} , МПа
ТЕРМАР-АДФ	9,95±1,96
ТЕРМАР-ДФ	19,66±1,11
Графикит 2000	6,58±0,71
Графикит 2400	5,72±2,56

Результаты испытаний представлены в таблице 2. Низкая межслоевая прочность материалов Графикит 2000 и Графикит 2400 связана с наличием в структуре, наряду со жгутами, внутри которых сформирована плотная, связанная с волокном матрица, прослойка хрупкой матрицы и наличием расслоений между этими типами структур (см. рисунок 7 (а)). Наличие этих включений, наряду с присутствием

«недопропитанных» пучков волокон (рисунок 7 (б)), и определяет низкую межслоевую прочность материала.

УУКМ в конструкциях АТС работают в области многоциклового усталости. Но в момент включения тормоза, под воздействием редких, значительных перегрузок в окружном направлении от тормозного момента, поведение материала подчиняется закономерностям малоциклового усталости.

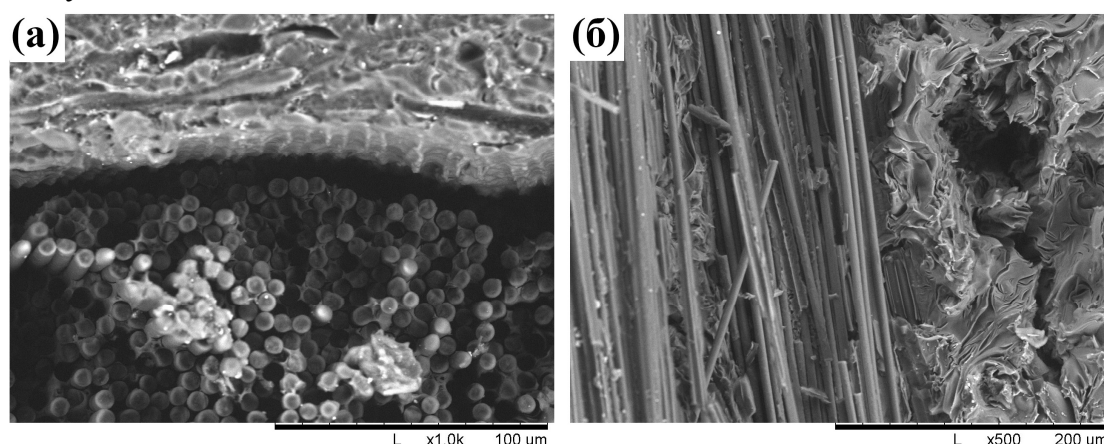


Рисунок 7 – Фрактография УУКМ после испытаний на межслоевую прочность: (а) – Графикит 2000. Расслоение на границе между жгутом и матрицей материала (б) – Графикит 2400. Волокна и слой хрупкой матрицы.

В связи с этим было исследовано влияние малоциклового усталостного нагружения на вязкость разрушения и межслоевую прочность УУКМ фрикционного назначения.

Перед проведением испытаний на вязкость разрушения и межслоевую прочность образцы подвергали предварительному циклическому воздействию в окружном направлении. Усталостное нагружение проводили до нанесения концентраторов с частотой 1 Гц. Количество

предварительных циклов составило 10, 100 и 1000 при уровне максимальных напряжений $0,5\sigma_{сж}$, $0,7\sigma_{сж}$ и $0,8\sigma_{сж}$.

Результаты определения J -интеграла материала ТЕРМАР-АДФ для исходных образцов и образцов после предварительного усталостного нагружения представлены в таблице 3.

Таблица 3. Характеристики УУКМ после воздействия циклических нагрузок

Предварительная усталостная нагрузка	Количество циклов	J_{Ic} , кДж/м ²		σ_{mn} , МПа	
		ТЕРМАР-АДФ (0Z)	ТЕРМАР-АДФ (0R)	ТЕРМАР-ДФ	ТЕРМАР-АДФ
Без предварительной нагрузки		1,40±0,21	1,42±0,22	19,66±1,11	9,95±1,96
0,5 $\sigma_{сж}$	10	1,27±0,13	1,39±0,07	19,83±1,03	9,42±3,11
	100	1,93±0,16	1,64±0,15	19,71±1,12	8,51±2,83
	1000	1,96±0,16	1,70±0,09	20,39±0,66	9,06±3,41
0,7 $\sigma_{сж}$	10	1,39±0,12	1,33±0,05	19,37±0,95	11,41±2,48
	100	1,50±0,09	1,36±0,12	18,14±0,55	7,41±3,04
	1000	1,52±0,14	1,39±0,08	16,60±1,02	6,18±2,67
0,8 $\sigma_{сж}$	10	1,61±0,16	1,36±0,13	20,65±0,94	11,32±2,39
	100	1,10±0,13	1,13±0,14	19,53±1,04	11,1±1,71
	1000	1,20±0,15	1,09±0,10	17,82±0,47	8,84±2,37

По полученным результатам были построены графики зависимости J -интеграла от параметров усталостного нагружения, которые представлены на рисунке 8.

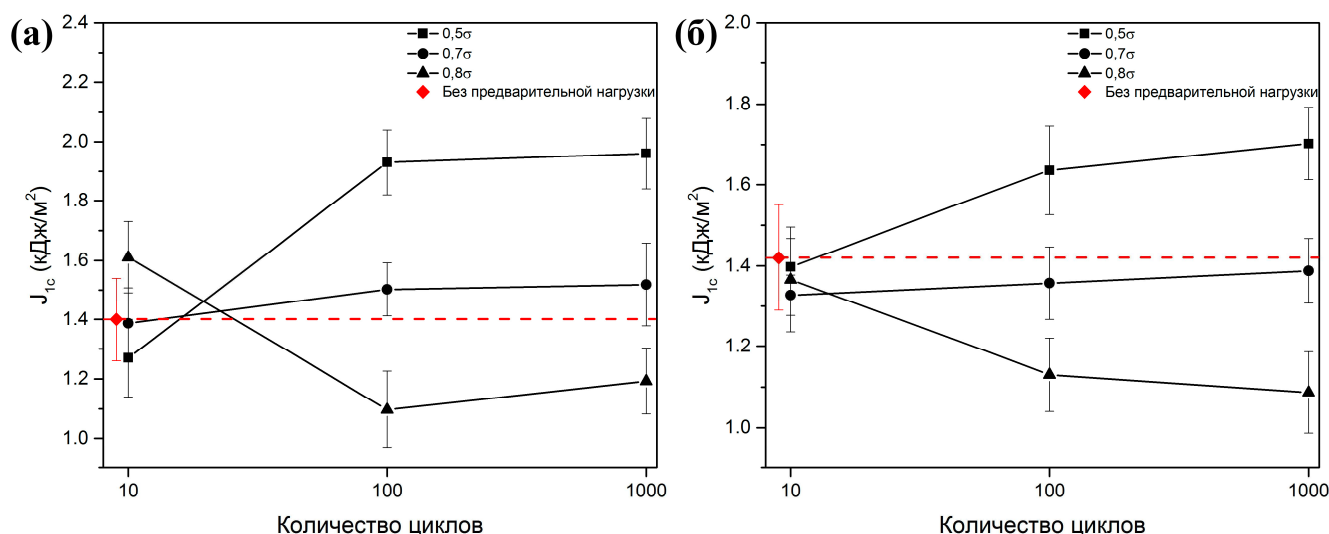


Рисунок 8 – Зависимость вязкости разрушения материала ТЕРМАР-АДФ от параметров усталостного нагружения: (а) – осевое направление (0Z); (б) – радиальное направление (0R).

Характер изменения J -интеграла от количества циклов и максимальных напряжений одинаков для образцов испытанных в осевом и радиальном направлениях (рисунок 8). В зависимости от величины максимальных напряжений цикла и происходящих при этом процессах накопления повреждений в материале происходит изменение поведения J -интеграла.

При циклическом нагружении в материале протекают процессы накопления микрповреждений в матрице, повреждения границ раздела «волокно-матрица», разрушения элементарных волокон, скорости которых по-разному изменяются с ростом максимальных напряжений цикла. Это обуславливает наблюдаемое изменение вязкости разрушения образцов.

При уровне напряжений цикла $0,5\sigma_{сж}$ в пределах первых 100 циклов значения J -интеграла возрастают на 27% для осевого направления и на 14% для радиального направления по сравнению с образцами без предварительного усталостного нагружения и показывают слабую тенденцию к росту с увеличением числа циклов до 1000. Такое увеличение можно объяснить появлением в материале локальных микроразрушений преимущественно на границе раздела

«волокну-матрица». В результате происходит торможение трещины на вновь образовавшихся дефектах, что способствует отклонению основной трещины и препятствует разрушению волокон материала.

При уровне напряжения цикла $0,8\sigma_{сж}$ с увеличением числа циклов значения J -интеграла уменьшаются на 21% для осевого направления и на 20% для радиального направления в течение первых 100 циклов нагружения и показывают тенденцию к уменьшению с увеличением числа циклов до 1000. Данная особенность поведения связана с протеканием преимущественно процессов разрушения отдельных элементарных волокон при усталостных испытаниях, что снижает эффективную длину волокна и приводит к уменьшению значений J -интеграла.

При уровне напряжений порядка $0,7\sigma_{сж}$ вязкость разрушения материала остается практически неизменной во всем интервале предварительного усталостного нагружения. В данном случае наблюдается равновесие между параллельно протекающими группами процессов разрушения, по-разному влияющими на изменение вязкости разрушения.

Основные структурные изменения УУКМ при всех уровнях нагрузки происходят в течение первых 100 циклов, незначительно изменяясь в дальнейшем. Фрактографические исследования, представленные на рисунке 9, показали различия в характере накопления повреждений и в характере разрушения в случае низкого ($0,5\sigma_{сж}$) и высокого ($0,8\sigma_{сж}$) уровня усталостных нагрузок.

При уровне нагрузки $0,5\sigma_{сж}$ после 100 циклов, как видно на рисунке 9 (а), происходит преимущественное разрушение границ раздела между волокном и матрицей в композите. Дополнительными препятствиями на пути распространения трещины являются поры в материале, края которых стягиваются элементарными углеродными волокнами. На поверхности излома наблюдается большое количество выдернутых из матрицы элементарных углеродных волокон (рисунок 9 (в)), что наряду с морфологией поверхности свидетельствует о псевдопластическом характере разрушения.

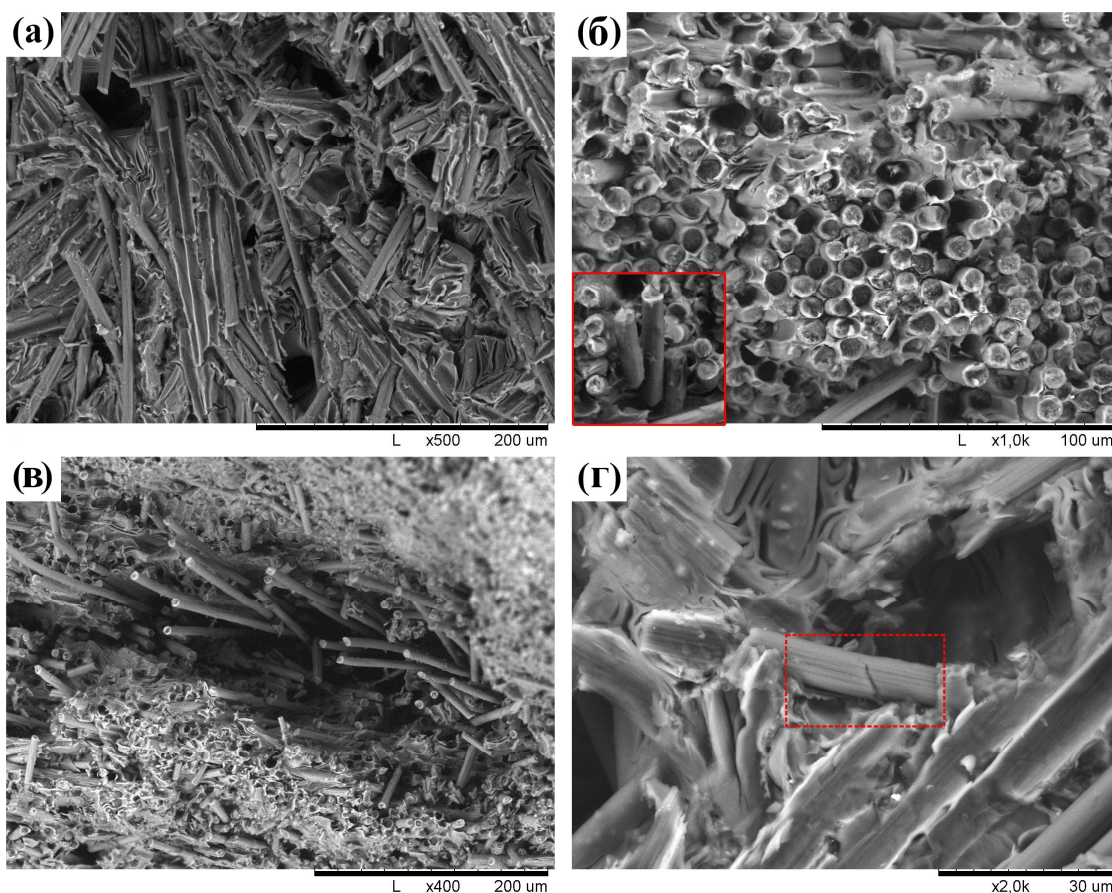


Рисунок 9 – Фрактография УУКМ после усталостного нагружения и испытаний на вязкость разрушения: (а), (в) – усталостное нагружение $0,5\sigma_{сж}$, 100 циклов; (б), (г) – усталостное нагружение $0,8\sigma_{сж}$, 100 циклов. Дополнительно выделены разрушенные волокна УУКМ.

С увеличением нагрузки до уровня $0,8\sigma_{сж}$ (рисунок 9 (б)) поверхность разрушения становится более гладкой с присутствием большого количества разрушенных волокон (рисунок 9 (г)).

При усталостном нагружении происходит формирование микротрещин на границе раздела «волокно-матрица». При испытаниях на вязкость разрушения старт трещины происходит вблизи границы раздела, и при возрастании нагрузки трещина начинает распространяться по уже образованным в процессе усталостного нагружения дефектам. Таким образом, возникнувшие микротрещины способствуют отклонению основной трещины и препятствуют разрушению волокон материала, тем самым увеличивая его вязкость разрушения. Однако при возрастании значений максимальных напряжений цикла ($0,8\sigma_{сж}$), кроме формирования микротрещин в матрице и на границе раздела «волокно-матрица», происходит разрушение отдельных волокон, приводящее к уменьшению их средней длины в материале и снижению вязкости разрушения УУКМ.

Испытания на межслоевую прочность проводили на образцах с надрезами, нанесенными после проведения циклических испытаний. Во всех случаях разрушение происходило по плоскости между двумя надрезами образца. Результаты испытаний представлены в таблице 3 и на рисунке 10. Образцы материалов Графikit 2000 и Графikit 2400 не испытывались ввиду того, что они разрушались в процессе первых 10 циклов нагружения.

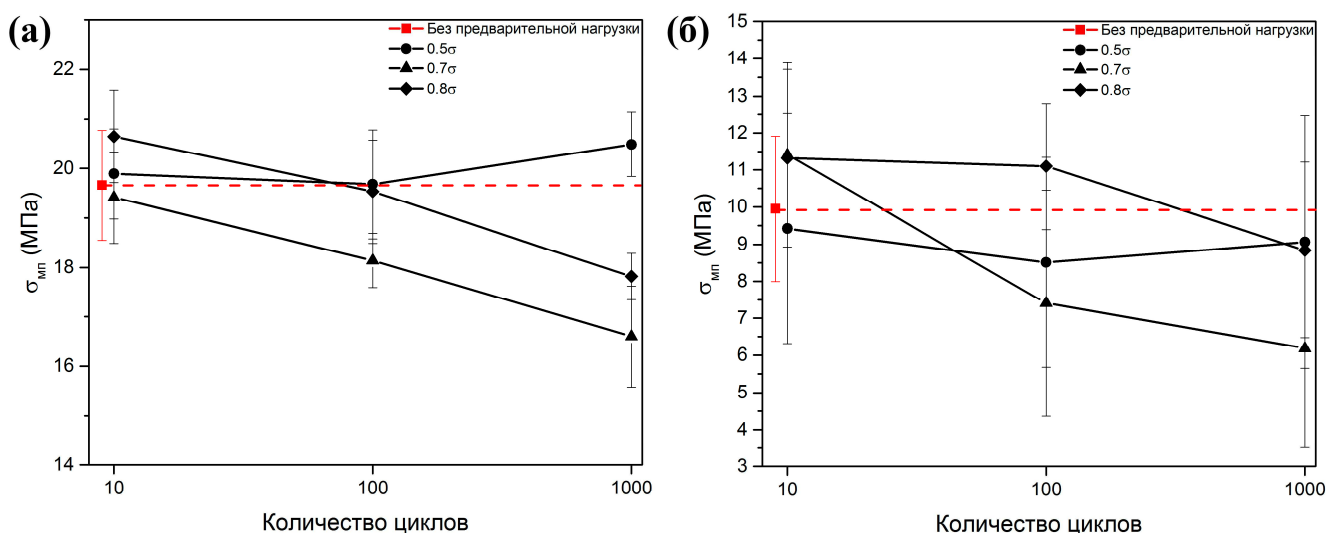


Рисунок 10 – Зависимость межслоевой прочности УУКМ от параметров усталостного нагружения: (а) – ТЕРМАР-ДФ; (б) – ТЕРМАР-АДФ.

Как видно из представленных на рисунке 10 данных, межслоевая прочность в процессе циклического нагружения при максимальных напряжениях цикла $0,5\sigma_{сж}$ практически не изменяется. Межслоевая прочность при больших значениях максимальных напряжений цикла ($0,7\sigma_{сж}$ и $0,8\sigma_{сж}$) показывает тенденцию к снижению при увеличении числа циклов предварительного нагружения.

Характерный вид поверхности разрушения при испытаниях на межслоевой сдвиг материала ТЕРМАР-АДФ приведен на рисунке 11 (а).

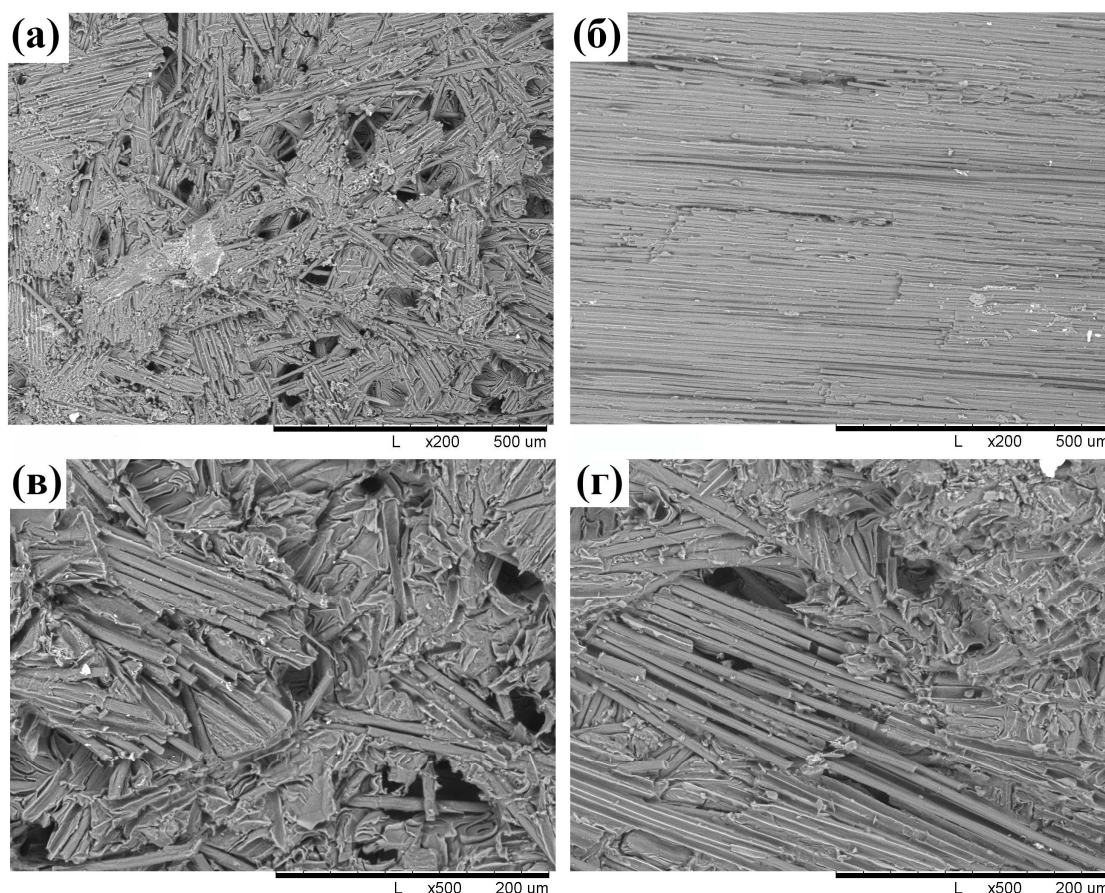


Рисунок 11 – Фрактография образцов ТЕРМАР-АДФ после циклических нагрузок и испытания на межслоевую прочность: (а) – типичная поверхность разрушения; (б) – поверхность разрушения образца с низким значением межслоевой прочности; (в) – поверхность разрушения образца после циклических нагрузок $0,5\sigma_{с.ж.}$; (г) – поверхность разрушения образца после циклических нагрузок $0,8\sigma_{с.ж.}$.

На поверхности разрушения видны следы разрушения границ раздела. Предположительно разрушение зарождалось на границах раздела «волокно-матрица», параллельных направлению прикладываемой нагрузки (рисунок 11 (г)), так как прочность границы меньше прочности волокна или матрицы. Далее трещина распространялась вдоль этой границы. Волокна, расположенные перпендикулярно направлению нагрузки, разрушались и частично выдергивались из матрицы при распространении трещины (рисунок 11 (в)). Наличие в структуре подобных поперечных волокон приводит к увеличению межслоевой прочности УУКМ. Как видно на рисунке 11 (а), на поверхности разрушения наблюдается большое количество разнонаправленных пучков волокон, лежащих в плоскости разрушения.

Разброс значений межслоевой прочности для материала ТЕРМАР-АДФ связан с наличием крупных жгутов в плоскости сдвига испытанных образцов (рисунок 11 (б)). Так жгуты, расположенные параллельно направлению прикладываемой нагрузки, значительно снижают межслоевую прочность материала.

Ввиду менее выраженной анизотропии и меньшей длины углеродного волокна в структуре материала ТЕРМАР-ДФ не наблюдается крупных углеродных жгутов, понижающих межслоевую прочность (рисунок 12 (а)), а большее количество хорошо распределенных в структуре волокон, расположенных под углом или перпендикулярно к плоскости сдвига, и обуславливает высокую межслоевую прочность материала ТЕРМАР-ДФ (рисунок 12 (б)).

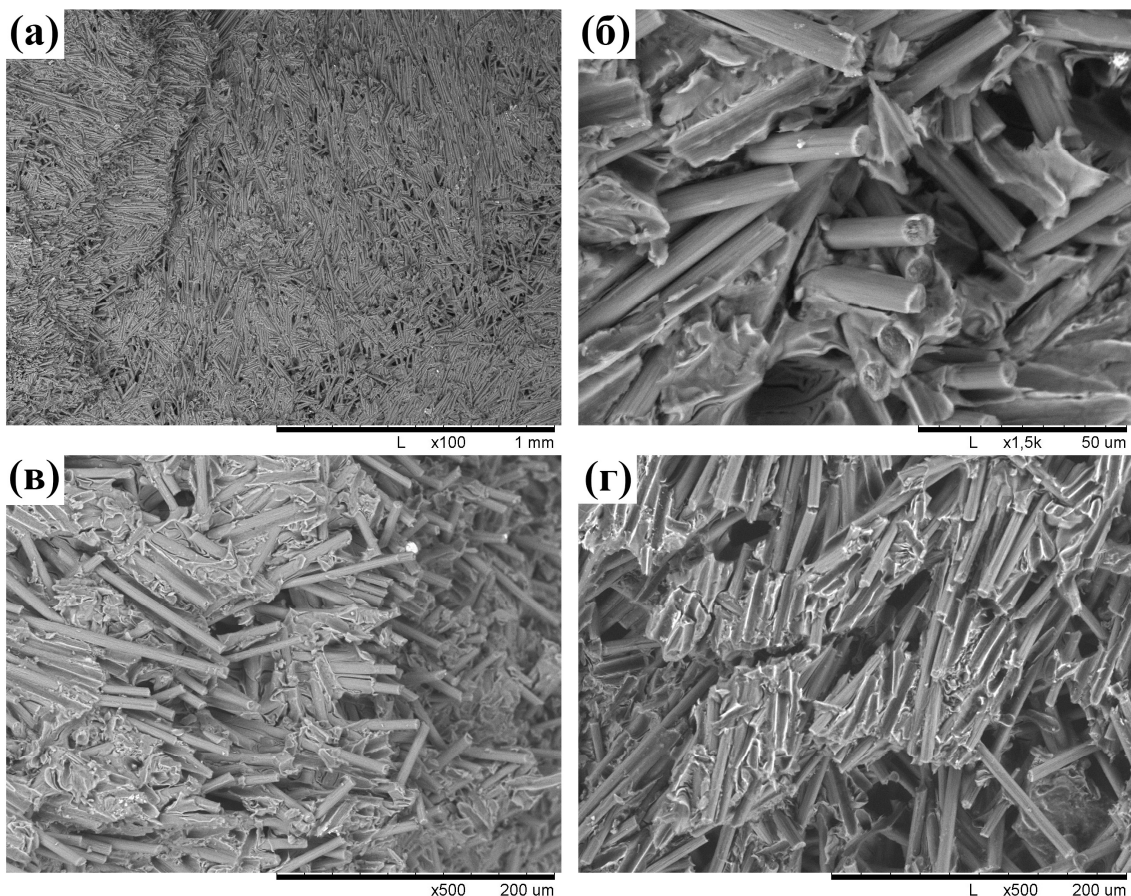


Рисунок 12 – Фрактография образцов ТЕРМАР-ДФ после циклических нагрузок и испытания на межслоевую прочность: (а), (б) – типичная поверхность разрушения; (в) – поверхность разрушения образца после циклических нагрузок $0,5\sigma_{сжс}$; (г) – поверхность разрушения образца после циклических нагрузок $0,8\sigma_{сжс}$.

У образцов с хорошим распределением углеродных волокон, при котором обеспечивается стягивание границ межслоевой трещины, наблюдаются максимальные значения межслоевой прочности. Наименьшее значение межслоевой прочности наблюдается у УУКМ с наличием в структуре жгутов волокон, расположенных параллельно направлению роста трещины. Волокна, расположенные под углом к направлению ОР, вносят решающий вклад в значения межслоевой прочности УУКМ.

Общие выводы по работе

1. Определены значения критериев вязкости разрушения (K_{Ic} , J_{Ic} , J_c , COD) для УУКМ армированных дискретными волокнами разной длины и ткаными наполнителями. Для УУКМ фрикционного назначения показаны границы применимости критериев оценки вязкости разрушения (K_{Ic} , J_{Ic} , J_c , COD). Для материалов, армированных дискретными волокнами со средней длиной менее 0,5 мм, выполняется критерий K_{Ic} . При большей длине дискретного волокна и армировании тканями корректное определение значений K_{Ic} становится невозможным и необходимо использование оценки J -интеграла.

2. Экспериментально определена конфигурация и размеры зоны концентрации напряжений у вершины трещины. В УУКМ реализуется плоско-деформированное напряженное состояние. В момент старта трещины напряжения в 2,5-3 раза превышают предел прочности материала, а максимальные напряжения возникают на расстоянии 1,5-3 мм перед фронтом трещины. Происходит локализация напряжений у вершины трещины в области диаметром до 6-7 мм, при этом в зоне диаметром 3 мм напряжения превышают предел прочности материала.

3. С учетом характера напряженного состояния у вершины трещины и особенностей разрушения, для оценки вязкости разрушения УУКМ предпочтительнее оценка работы разрушения (J_c) при продвижении трещины. Для УУКМ характерны R-кривые сопротивления росту трещины, т.е. с ростом трещины увеличивается вязкость разрушения материала.

4. Вязкость разрушения УУКМ с армирующими каркасами на основе тканей выше, чем при армировании дискретными волокнами, несмотря на их склонность к расслоению. Дефекты структуры, такие как Z- и V-образный загиб волокна, снижают вязкость разрушения УУКМ примерно в 2 раза.

5. В процессе циклического нагружения УУКМ с максимальными напряжениями цикла 0,7 и менее от предела статической прочности в диапазоне до 1000 циклов наблюдается увеличение вязкости разрушения материала, обусловленное накоплением повреждений по границе раздела «волокно-матрица». Ослабление границы раздела приводит к торможению магистральной трещины в результате ветвления без разрушения волокон. При максимальных напряжениях цикла на уровне 0,8 от предела статической прочности на базе до 1000 циклов вязкость разрушения материала снижается за счет разрушения углеродных волокон.

6. Определены значения межслоевой сдвиговой прочности УУКМ. Максимальная межслоевая сдвиговая прочность реализуется, если распределение углеродных волокон в матрице между слоями обеспечивает стягивание границ трещины на пути ее продвижения.

7. В процессе циклического нагружения при максимальных напряжениях цикла 0,5 от предела статической прочности изменения межслоевой прочности не происходит. При напряжениях цикла выше 0,7 от предела статической прочности происходит уменьшение длины углеродных волокон, что приводит к снижению межслоевой прочности материала.

Список основных публикации по теме диссертации

- 1) **Степашкин А.А., Ожерелков Д.Ю., Сазонов Ю.Б., Комиссаров А.А., Мозалев В.В.** Оценка вязкости разрушения дискретно-армированного углерод-углеродного композиционного материала. // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2015. – №4. – С. 51-58. (**A. A. Stepashkin, D. Yu. Ozherelkov, Yu. B. Sazonov, A. A. Komissarov, and V. V. Mozolev.** Assessment of fracture toughness of a discretely-reinforced carbon-carbon composite material. // *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 57, Nos. 3 – 4, July, 2015. P.229-235) (из списка ВАК).
- 2) **Степашкин А.А., Ожерелков Д.Ю., Сазонов Ю.Б., Комиссаров А.А.** Критерии оценки вязкости разрушения углерод - углеродных композиционных материалов. // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2018. – №4. – С. 64-70. (из списка ВАК)
- 3) **Степашкин А.А., Ожерелков Д.Ю., Сазонов Ю.Б., Комиссаров А.А., Мозалев В.В.** Изменение межслоевой прочности и вязкости разрушения углерод - углеродного композиционного материала под действием циклических нагрузок. // *Материаловедение.* – 2018. – №6. (из списка ВАК).
- 4) **Ожерелков Д.Ю., Степашкин А.А., Комиссаров А.А.** Оценка вязкости разрушения дискретно-армированного углерод-углеродного композиционного материала фрикционного назначения // *Сборник тезисов докладов 10-й международной конференции «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология».* – М.: ФГБНУ ТИСНУМ, 2016. – С. 321-324.
- 5) **Ожерелков Д.Ю., Степашкин А.А., Комиссаров А.А., Смирнова Ю.В.** Исследование трещиностойкости углерод-углеродных композиционных материалов фрикционного назначения. // *Сборник материалов V международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов».* – М.: ИМЕТ РАН, 2013. – С. 415.
- 6) **Сазонов Ю.Б., Ожерелков Д.Ю., Комиссаров А.А., Смирнова Ю.В.** Влияние технологических параметров получения углерод-углеродных композиционных материалов на упруго-прочностные характеристики при сжатии. // *Сборник тезисов VII Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» - ПРОСТ 2014».* – М.: НИТУ МИСиС, 2014. – С. 75.
- 7) **Ожерелков Д.Ю., Степашкин А.А., Комиссаров А.А., Сазонов Ю.Б.** Трещиностойкость дискретно-армированного углерод-углеродного композиционного материала. // *Сборник материалов VI международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов».* – М.: ИМЕТ РАН, 2015. – С. 608-609.
- 8) **Ожерелков Д.Ю., Степашкин А.А., Комиссаров А.А.** Оценка вязкости разрушения дискретно-армированного углерод-углеродного композиционного материала фрикционного назначения. // *Тезисы докладов VI Международной конференции «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов».* – М.: НИТУ МИСиС, 2015. – С. 233.
- 9) **Ожерелков Д.Ю., Степашкин А.А., Сазонов Ю.Б., Комиссаров А.А.** Оценка вязкости разрушения дискретно-армированного углерод-углеродного композиционного материала фрикционного назначения. // *Сборник трудов VIII Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» - ПРОСТ 2016».* – М.: НИТУ МИСиС, 2016. – С. 171.
- 10) **Ожерелков Д.Ю., Степашкин А.А., Комиссаров А.А. Сазонов Ю.Б.** Оценка вязкости разрушения дискретно-армированного углерод-углеродного композиционного материала фрикционного назначения. // *Сборник материалов VII международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов».* – М.: ИМЕТ РАН, 2017. – С. 555-557.
- 11) **Ожерелков Д.Ю., Степашкин А.А., Сазонов Ю.Б., Комиссаров А.А.** Исследование трещиностойкости углерод-углеродного композиционного материала фрикционного назначения. // *Тезисы докладов VII Международной конференции «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов».* – М.: НИТУ МИСиС, 2017. – С. 151.