

На правах рукописи



Степашкин Андрей Александрович

«Работоспособность углерод - углеродных композиционных материалов
фрикционного назначения при циклическом нагружении»

Специальность 05.16.01 – металловедение и термическая обработка металлов
и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» Научно-исследовательский центр композиционных материалов (НИЦ КМ) и Открытом акционерном обществе "Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита "НИИГрафит" (ОАО «НИИГрафит»)

Научный руководитель: кандидат технических наук
Мостовой Геннадий Ефимович
(ОАО «НИИГрафит»)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук
Филиппов Георгий Анатольевич
(Институт качественных сталей Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П.Бардина»)

доктор технических наук, профессор
Беломытцев Михаил Юрьевич
(кафедра металловедения и физики прочности
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»)

Ведущая организация Открытое акционерное общество «Композит»
(ОАО "Композит")

Защита диссертации состоится 21 ноября 2013 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 212.132.08 в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, ауд. ____.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИТУ «МИСиС»

Автореферат разослан

« ____ » октября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



доктор физико-математических наук

С.И. Мухин

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Благодаря уникальному сочетанию физико-химических и упруго-прочностных характеристик, а также высокой термостойкости, углерод – углеродные композиционные материалы (УУКМ) находят широкое применение в химической промышленности, металлургии, медицине, авиационной и ракетно-космической технике. Они характеризуются низкой плотностью, высокими удельными прочностными характеристиками, высокой работоспособностью в инертных и восстановительных атмосферах при высоких температурах, стабильным коэффициентом трения. Упруго-прочностные характеристики УУКМ слабо изменяются при температурах до 900⁰С. До температур 2100 – 2400⁰С прочность и модуль упругости возрастают и в 2-3 раза превосходят уровень, характерный при комнатных температурах. Работоспособность УУКМ может быть обеспечена при температурах вплоть до 3000 ⁰С.

В настоящий момент тормозные диски из УУКМ успешно применяются в тормозных системах самолетов, благодаря:

- высокой термостойкости;
- высокому и стабильному в самых различных режимах эксплуатации коэффициенту трения;
- способности к быстрому поглощению кинетической энергии, выделяющейся при торможении самолета, которая предотвращает перегрев деталей шасси;
- высоким удельным упруго-прочностным характеристикам в широком диапазоне температур;
- высокой износостойкости, обеспечивающей значительно больший ресурс тормоза в сравнении со всеми ранее применявшимися материалами;
- малому удельному весу, позволяющему значительно снизить полетную массу;
- экологической безопасности.

В настоящее время ведутся работы по созданию нового поколения материалов для тяжело-нагруженных авиационных тормозных систем (АТС) с дисками из УУКМ, обеспечивающих гарантированный ресурс работы свыше 2000 циклов «взлет-посадка». Развитие авиационной техники идет по пути повышения весовой эффективности конструкций, что делает необходимым определение величины оптимального коэффициента запаса, при котором в пределах установленного ресурса невозможно разрушение от усталости материала. Вопросы усталостной прочности УУКМ в научной литературе освещены крайне скупо, что не позволяет с их помощью прогнозировать работоспособность материала в конструкции АТС.

Цели работы

Установление для УУКМ фрикционного назначения, используемых в АТС, особенностей деформирования и разрушения под действием динамических и циклически изменяющихся эксплуатационных нагрузок;

Выявление для УУКМ фрикционного назначения взаимосвязи между их структурой, технологическими параметрами изготовления и критериями работоспособности при статических и динамических условиях для определения ресурса их работы в условиях эксплуатации.

Задачи, решаемые в рамках поставленных целей

- разработать методики проведения усталостных испытаний УУКМ, в том числе испытаний, моделирующих работу в узлах зацепления «шип-паз» в тормозных системах самолетов;
- исследовать особенности изменения упругих и прочностных характеристик, а также разрушения УУКМ фрикционного назначения при циклических испытаниях;
- установить зависимости между механическими характеристиками, определёнными при статических и динамических условиях испытания;
- исследовать влияние ряда технологических факторов (вида и состояния армирующего наполнителя, схемы армирования, параметров термообработок) на усталостные свойства УУКМ;
- определить критерии, позволяющие прогнозировать работоспособность УУКМ в условиях циклического нагружения;
- выработать рекомендации для внесения изменений в технологические процессы изготовления УУКМ фрикционного назначения, в конструкцию и прочностной расчёт авиационных тормозных дисков из УУКМ.

Научная новизна работы

Впервые для УУКМ фрикционного назначения с матрицами на основе коксовых остатков каменноугольных пеков проведены испытания на малоцикловую усталость. Установлены закономерности влияния технологических параметров (вида и состояния армирующего наполнителя, схемы армирования, параметров промежуточных и финальных термообработок) на работоспособность УУКМ фрикционного назначения в условиях динамического нагружения.

Получены зависимости малоциклового усталостной долговечности различных УУКМ фрикционного назначения.

На основании изменения упругих и деформационных характеристик материалов предложен экспериментально обоснованный деформационный критерий разрушения УУКМ в условиях циклически изменяющегося напряженного состояния.

Смоделировано поведение УУКМ в условиях сложнапряженного состояния, приближенного к реальным условиям работы в авиационных тормозных системах в зоне зацепления «шип-паз». Определены возможные пути повышения усталостной прочности УУКМ нового поколения.

Практическая значимость

Даны рекомендации по оптимизации технологического процесса получения материалов типа ТЕРМАР, обладающих более высокой работоспособностью и стойкостью к воздействию циклических нагрузок по сравнению с серийно выпускаемыми (акты о практическом использовании в ОАО «НИИграфит» и ОАО АК «Рубин» прилагаются);

Разработаны и внедрены в научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы ОАО АК «Рубин» 4 методики проведения усталостных испытаний УУКМ (акт внедрения методик прилагается);

Даны рекомендации ОАО АК «Рубин» по оптимизации конструкции узла шипового зацепления тормозных дисков из УУКМ различных производителей, с целью повышения ресурса работы изделия с 500 до 2000 циклов взлет-посадка (акт внедрения прилагается).

Личный вклад автора

В диссертации представлены результаты исследований, выполненных лично автором в НИЦ Композиционных материалов НИТУ «МИСиС» и лаборатории физико-механических и теплофизических методов исследований ОАО "НИИГрафит". Личный вклад автора в настоящую работу состоит в постановке целей и задач, разработке методик проведения испытаний, подготовке экспериментальных образцов, проведении экспериментов, обработке, анализе и обобщении полученных результатов.

Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы представлены на:

Научно-технической конференции «Материалы и изделия из них под воздействием различных видов энергии» (г. Москва, 1999); Конференции «Современные проблемы производства и эксплуатации углеродной продукции» (г. Челябинск. 2000); 1-й Международная конференции "Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология" (г. Москва 2001); Научно-технической конференции, посвященной 55-летию Авиационной корпорации «Рубин» «Гидравлические агрегаты, системы и взлетно-посадочные устройства летательных аппаратов» (г. Балашиха, 2001); Всероссийской Научно-технической конференции «Материалы и технологии XXI века» (г. Пенза, 2001); Межотраслевой научно-практической конференции «Проблемы создания новых материалов для авиакосмической отрасли в 21 веке» ВИАМ. (г. Москва, 2002); 1-й Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» (г. Москва. 2002); 2-й Международной конференции "Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология" (г. Москва 2003); 77-й международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле и тракторостроение в России: приоритеты развития, подготовка кадров» (г. Москва 2013); 6-й Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» (г. Москва 2012); 8-й Международной конференции «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология» (г. Москва 2012) 19 International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials (Moscow, 2012).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы. Материалы диссертационной работы изложены на 168 страницах машинописного текста, содержат 73 рисунка, 8 таблиц, 2 приложений. Библиографический список содержит 129 наименований.

Основное содержание работы

Во **ВВЕДЕНИИ** показана актуальность темы диссертации, определены цели и задачи работы, показана ее научная новизна и практическая значимость.

ГЛАВА 1 представляет собой аналитический обзор литературы, посвящённой структуре и свойствам УУКМ фрикционного назначения, используемым в АТС. Рассмотрены сырьевые материалы и основные технологии изготовления армирующих каркасов, формирования матриц УУКМ. Проведен анализ работ, посвященных исследованию усталостной прочности, ударной вязкости, трещиностойкости УУКМ с различными технологиями получения.

На основе анализа напряженного состояния, возникающего в диске из УУКМ в процессе торможения, показано, что при эксплуатации материал испытывает два вида циклических нагрузок.

В процессе обжатия дисков тормозного пакета посредством системы поршней с гидравлическим приводом в материале возникают циклические сжимающие напряжения в осевом направлении, подчиняющиеся закономерностям многоциклового усталости, характеризующиеся частотами 100 – 120 Гц., максимальными напряжениями цикла 4 - 8 МПа, при коэффициенте асимметрии цикла 0,1 - 0,2.

При выполнении торможения в результате взаимодействия пазов дисков с металлическими крепежными деталями в зоне соединения «шип-паз» в УУКМ возникают систематически воздействующие в окружном направлении сжимающие напряжения, достигающие 30-50 МПа. Механика поведения материала под действием таких нагрузок подчиняется закономерностям малоциклового усталости, а количество циклов равно количеству включений тормоза.

На основе развитых в металловедении методов анализа структуры, свойств, определения усталостной прочности поставлены задачи: разработать методики и изучить свойства УУКМ, применяемых для создания авиационных тормозных дисков.

По итогам аналитического обзора литературы и анализа напряженного состояния обоснован выбор методов и условий испытаний УУКМ фрикционного назначения.

В **ГЛАВЕ 2** описываются материалы и методы исследования.

Материалы исследования

Исследования проводили на шести марках УУКМ фрикционного назначения, типа ТЕРМАР, разработанных и предоставленных лабораторией № 44 «НИИГрафит»: -ДФ, -АДФ, -СТД, -УК1, -УК2, -ТД.

Материалы ТЕРМАР-ТД, ТЕРМАР-ДФ эксплуатируются в самолетах семейства АН в составе тормозных комплектов КТ-166 в виде секторов-накладок толщиной 6 мм.

Материалы ТЕРМАР-СТД и ТЕРМАР-АДФ в виде монодисков в составе тормозных комплектов испытаны и эксплуатируются в тормозных системах самолетов Ту-160, Ту-204, Ту-214, Ту-334, Ан-124, Ан-148, Як-130, С-80.

Дискретно-армированный, трансверсально-изотропный материал ТЕРМАР-

АДФ, изготовлен в соответствии с ТП-4807-75-96. В качестве армирующего наполнителя использовано дискретное графитированное волокно ВПР-19с, разрезанное на фрагменты длиной 50 мм. Средняя длина филаментов в готовом материале составила около 20 мм. Матрица сформирована на основе кокса среднетемпературного пека, через последовательные циклы «пропитка пеком – обжиг (карбонизация) при 900⁰С».

Дискретно-армированные, трансверсально-изотропные УУКМ ТЕРМАР-УК1 и ТЕРМАР-УК2 изготовлены в соответствии с ТП-4807-75-96 и являются экспериментальными. В качестве армирующего наполнителя использована предварительно термообработанная при температуре 1450⁰С равнопрочная углеродная ткань УТ-900–2,5 марки Б, разрезанная на фрагменты 50х50 мм. Матрица сформирована на основе кокса среднетемпературного пека, через последовательные циклы «пропитка пеком – обжиг при 900⁰С (карбонизация)». При производстве материала ТЕРМАР-УК2 после первой пропитки каменноугольным пеком вместо карбонизации была проведена графитация при температуре 2800⁰С.

Финальная термообработка материалов АДФ, УК1 и УК2 проведена при температуре 2000⁰С в течение 1 часа.

Изготовленные из материалов ТЕРМАР-АДФ, ТЕРМАР-УК1, ТЕРМАР-УК2 самолета - комплекты прошли стендовые испытания на ОАО АК «Рубин», г. Балашиха, Московской области по программе 500 циклов «взлет – посадка» каждый. Это позволяет сравнить данные по ударной вязкости, вязкости разрушения и сопротивлению усталости, полученные на образцах в настоящей работе, с данными испытаний натурных деталей на стенде.

Дискретно-армированный, трансверсально-изотропный материал ТЕРМАР-ДФ армирующий каркас сформирован гидроосаждением дискретного волокна ВПР-19с, разрезанного на фрагменты длиной 20 мм (средняя длина филаментов в готовом материале составила 0,1-0,5 мм). Матрица сформирована на основе коксового остатка среднетемпературного пека, через циклы «пропитка пеком – обжиг при 900⁰С» и финальную термообработку при 2000⁰С в течение 1 часа.

Непрерывно армированный УУКМ ТЕРМАР-СТД, силовой каркас образован путем спирально-радиальной укладки непрерывных углеродных жгутов ВМН-4, поверхностные фрикционные слои изготовлены из графитированной углеродной ткани вискозного плетения ТГН – 2М. Матрица сформирована на основе кокса среднетемпературного пека, через последовательные циклы «пропитка пеком – обжиг при 900⁰С». Финальная термообработка проведена при температуре 1750⁰С в течение 1 часа.

УУКМ ТЕРМАР-ТД, армирован углеродной графитированной тканью вискозного плетения ТГН – 2М со схемой укладки слоев 0-90-0. Матрица материала сформирована на основе кокса среднетемпературного пека, через последовательные циклы «пекопропитка - обжиг». Финальная термообработка материала проведена при температуре 1750⁰С в течение 1 часа.

Методики проведения исследований

При исследовании характеристик УУКМ использованы методики проведения механических испытаний углеродных материалов, разработанные в «НИИграфит» и применяемые в составе Технических условий (ТУ) на углеродную

продукцию.

Для испытаний на сжатие использовали призматические образцы размерами 20x10x10 мм, на трехточечный изгиб и удар - образцы размерами 70x10x10 мм. Испытания на растяжение проведены на образцах-лопатках с рабочим сечением 10x10 мм. Определение трещиностойкости проводили на образцах размерами 70x10x10 мм, с нанесенными концентраторами, толщиной в вершине менее 0,08 мм.

Для моделирования процессов, протекающих в зоне шлицевого зацепления тормозных дисков из материалов АДФ, УК1 и УК2, спроектированы и изготовлены специальные образцы на растяжение и сжатие, представленные на рисунке 1.

Образцы для испытаний получены методом механической обработки из тормозных дисков-заготовок и дисков после стендовых испытаний. Образцы на сжатие были вырезаны в окружном и осевом направлении, образцы на изгиб, удар, трещиностойкость - в окружном направлении.

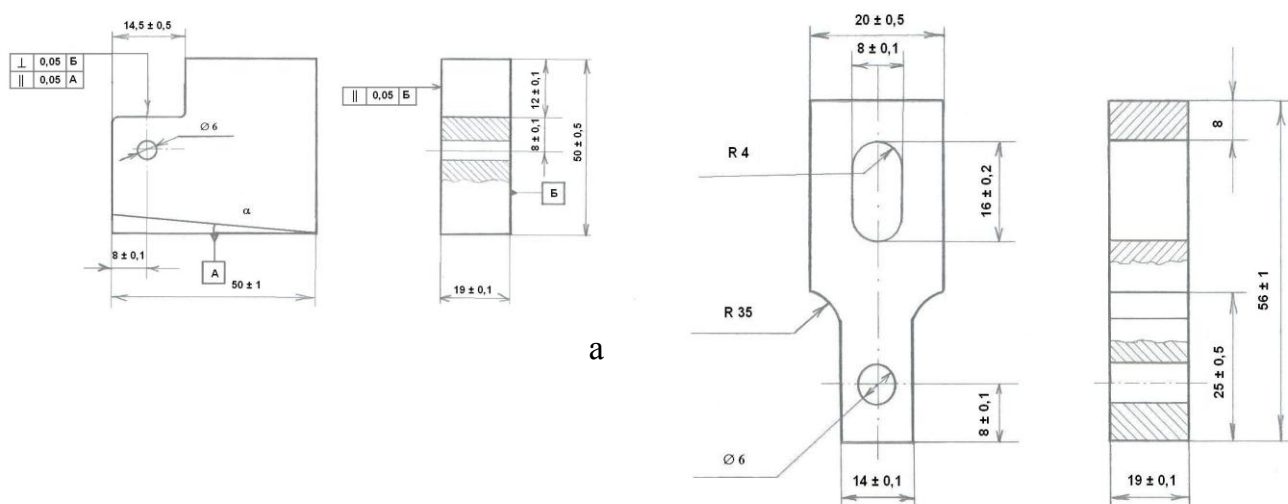


Рисунок 1 - Образцы из УУКМ типа ТЕРМАР для физико-механических испытаний: (а) – модельный образец на сжатие, (б) – модельный образец на растяжение.

Определение характеристик при сжатии в окружном и осевом направлениях проводили при нагружении со скоростью 5 мм/мин., на 12-14 образцах для каждого материала и направления; определение характеристик при растяжении проводили на 10 образцах со скоростью 5 мм/мин.. Определение характеристик при изгибе со скоростью нагружения 2 мм/мин и при ударе проводили в 2-х направлениях на 7-14 образцах для каждого материала и направления. Характеристики трещиностойкости определяли при трехточечном изгибе в 2-х направлениях, при скорости нагружения 1 мм/мин., на 7-10 образцах для каждого материала, направления и длины концентратора. Определены средние значения характеристик, в качестве меры рассеяния характеристик использована величина среднего квадратичного отклонения.

Для испытаний на малоцикловую усталость при сжатии и изгибе использованы призматические образцы, аналогичные образцам для статических испытаний. Количество образцов на одну кривую усталости составило от 24 до 155 в зависимости от наличия материала.

Для УУКМ характерна значительная вариация свойств в пределах заготовки, детали, связанная с неоднородностью структуры материала и особенностями технологии получения. Были определены общие для всех методик требования к количеству и качеству механической обработки образцов для испытаний.

Установлен отбор образцов в группы по плотности, по наличию грубых дефектов структуры, по разориентации армирования относительно направления приложения нагрузки, определены требования по непараллельности и неперпендикулярности поверхностей образцов, зафиксированные чертежами на соответствующие образцы.

Геометрическим методом и методом гидростатического взвешивания определена плотность каждого образца. В отдельные группы выделены образцы: отличавшиеся по плотности от среднего более чем на $0,02 \text{ г/см}^3$; с углом между направлением армирования и направлением нагрузки превышающим $\pm 5^\circ$; образцы с грубыми дефектами в структуре (раковины, трещины, сколы, крупные включения, резкие перегибы в укладке волокна).

Для определения условного предела усталостной прочности и построения кривой малоциклового усталости формировали не менее 7 групп по 7-10 образцов в каждой: одна - для статических испытаний, и не менее 6 - для циклических испытаний.

Начальный уровень нагружения при усталостных испытаниях определяли на основании среднего значения предела прочности и его среднеквадратичного отклонения (S) для выбранного материала.

Для построения усталостной кривой последовательно испытаны не менее 6 серий, по 7-10 образцов в каждой, с записью диаграмм “нагрузка – деформация” и фиксацией числа циклов до разрушения каждого из образцов.

Перед началом испытаний проводили трехкратное обжатие оснастки испытательной машины нагрузкой в 90% от номинального предела датчика силы, с выдержкой 1 минута.

Циклические испытания проводили при мягком цикле нагружения, в диапазоне максимальных напряжений цикла от 0,4 до 1 от предела прочности с постоянной для всех образцов частотой $\nu = 0,25 \div 0,30 \text{ Гц}$. и коэффициентом асимметрии цикла $R_\sigma = 0,10 \div 0,12$. Испытания образца прекращали при его разрушении или по достижении базы испытания $N = 15000$ циклов без разрушения. В процессе испытания фиксировали повреждения, получаемые образцом, характер разрушения, число циклов до разрушения.

Испытания первой серии образцов проводились при максимальных напряжениях цикла $\sigma_{\max} \cong 2/3$ от соответствующего предела прочности. Если более половины образцов серии разрушилось до исчерпания базы, то максимальные напряжения цикла для каждой следующей серии уменьшали на величину, равную половине среднеквадратичного отклонения S (СКО), до достижения уровня напряжений, на котором более половины образцов выдержали испытания без разрушения. Если более половины образцов первой серии выдержали испытания без разрушения, то максимальные напряжения последующих ступеней увеличивали на $0,5 S$. Испытания проводили до определения двух соседних уровней напряжений, при этом для верхнего уровня (σ_1) до исчерпания базы должно разрушиться более, а для нижнего уровня (σ_2) - менее половины образцов серии.

Для уточнения величины условного предела усталостной прочности могут быть проведены испытания серии при уровне напряжений $\sigma_{\max} \cong 0,5(\sigma_1 + \sigma_2)$. Оставшиеся группы образцов могут быть использованы для уточнения положения усталостной кривой в области малых долговечностей путем ее разделения на равные интервалы.

В ГЛАВЕ 3 представлены результаты физико-механических, структурных исследований УУКМ фрикционного назначения.

В первой части третьей главы представлены результаты кратковременных статических испытаний на растяжение, сжатие, изгиб, результаты измерения кажущейся плотности, открытой (доступной) пористости и удельного электросопротивления (УЭС) для исследованных материалов. Результаты представлены в таблице 1.

Как показали проведенные измерения, плотности образцов, изготовленных из одной и той же заготовки, могут существенно отличаться друг от друга. Наиболее однородным является материал ДФ, плотность которого в пределах одной заготовки отличается не более чем на 0,50%, а в среднем по материалу - на 0,86%.

Для углеродных материалов различие в плотности на 0,02-0,05 г/см³ приводит к значимому различию в физико-механических характеристиках, что делает необходимым устанавливать корреляции между значениями плотности и показателями прочности.

Теоретическая пористость для материалов АДФ (диски 1, 2) и УК2, обладающих высокой плотностью, составляет 11-12%, из них на долю открытой пористости приходится примерно половина. Для материалов ДФ, УК1, СТД, ТД общая пористость составляет 21-24%. Наибольшей открытой пористостью из исследованных материалов обладает ДФ 11,4%, что можно объяснить армированием короткими дискретными волокнами, обеспечивающим высокую проницаемость материала по границам раздела.

После циклических испытаний с базой 15000 циклов во всех исследованных материалах наблюдается рост величины доступной пористости на 3-6% в результате микрорастрескивания матрицы и разрушения границ волокно-матрица.

Значения УЭС, равные 15-16 мкОм·м, для материалов АДФ, УК1, ТД соответствуют температурам финальной обработки 2000-2100 °С. Значения УЭС, равные 10,6-10,7 мкОм·м для варианта УК2, обусловлены графитацией первичной матрицы и увеличением степени графитации дискретного армирующего наполнителя при температуре 2800 °С. Для материалов ТД и СТД, значения УЭС, равные 30-32 мкОм·м., обусловлены финальной температурой обработки 1700-1750 °С.

Диаграммы растяжения для всех УУКМ слабо нелинейны, предел пропорциональности составляет 0,87-0,92 от величины предела прочности. При сжатии в окружном направлении предел пропорциональности составляет для АДФ и УК1 $\sim 0,92-0,94\sigma_{сж}$, для УК2 – $0,88\sigma_{сж}$, для ДФ $0,63-0,65\sigma_{сж}$, для ТД и СТД $\sim 0,72-0,75\sigma_{сж}$. С уменьшением длины армирующего наполнителя и увеличением нелинейности укладки армирующих элементов в материале происходит снижение величины предела пропорциональности. В осевом направлении для всех материалов предел пропорциональности лежит в пределах 0,55-0,61 от соответствующего предела прочности. Такое различие связано с особенностями

Таблица 1 – Характеристики материалов типа ТЕРМАР

Характеристика материала	Марка УУКМ						
	АДФ	АДФ	УК1	УК2	СТД	ТД	ДФ
	(диск 1,2)	(диск 8,9)	(диск 5,6,7)	(диск 3,4)	(диск 0)	-	-
Плотность, d_k , г/см ³	1,98±0,02	1,83±0,02	1,79±0,02	1,94±0,02	1,72±0,02	1,66±0,04	1,78±0,01
Открытая пористость, %	4,5±0,38	6,3±0,64	4,7±0,48	6,4±0,49	9,7±0,80	-	11,4±1,21
УЭС, мк·Ом*м	16,1±0,72	15,11±1,31	15,9±0,59	10,7±1,24	32,2±2,48	30,8±3,02	14,9±0,80
$\sigma_{сж}^{\perp}$, МПа	258±27	171±31	190±20	142±21	94±12	130±21	99±10
$E_{сж}^{\perp}$, ГПа	7,1±1,1	5,5±0,3	5,7±0,4	-	5,2±0,3	-	7,0±0,7
$\sigma_{сж}^{\parallel}$, МПа	132±16	106±10	93±6	90±9	51±8	63±7	92±10
$E_{сж}^{\parallel}$, ГПа	18,1±3,7	19,6±1,7	19,8±2,9	18,7±3,6	8,7±1,8	9,0±1,0	11,9±1,4
$\sigma_{изг}^{\perp}$, МПа	150,3±43,6	123,2±10,3	118,1±11,7	125,5±16,2	51,8±2,2	62,9±4,7	73,3±6,2
$\sigma_{изг}^{\parallel}$, МПа	174,3±29,8	156,9±6,0	169,8±9,8	161,7±16,7	56,5±8,5	64,0±6,0	69,8±4,1
K_{Ic}^{\perp} , МПа·м ^{0,5}	4,9±0,6	-	-	4,2±0,8	2,9±0,2	-	2,07±0,2
$K_{I\tau}^{\perp}$, МПа·м ^{0,5}	4,5±0,5	-	3,9±0,6	1,8±0,3	-	-	-
K_{Ic}^{\parallel} , МПа·м ^{0,5}	7,8±1,2	-	10,5±1,2	8,0±0,8	3,1±0,3	-	2,09±0,1
σ_B^{\parallel} , МПа (образцы-лопатки)	40,4±7,4	43,1±7,1	52,1±8,6	50,7±7,7	59,6±14,8	27,8±5,2	22,3±4,0
E_B^{\parallel} , ГПа	26,1±5,2	33,5±7,4	22,4±5,3	17,4±3,8	5,3±1,4	4,0±0,3	6,2±0,6
σ_B^{\parallel} , МПа (модельные образцы, рисунок 1а)	42,9±11,7	-	57,6±12,1	53,9±12,9	-	-	-

структуры исследованных УУКМ, в которых армирующий наполнитель преимущественно ориентирован в плоскости диска. Для материала ДФ, структура которого близка к изотропной, пределы пропорциональности при сжатии в разных направлениях практически совпадают.

Ударная вязкость по Шарпи определена на образцах без надреза 70x10x10 мм, на базе 60мм с использованием копра ZWICK 5313, оснащенного молотом на 7,5 Дж., и датчиком силы на 10 кН.

Значения максимальной силы в момент разрушения, предела прочности при ударном изгибе, величины ударной вязкости, определенные как средние по 7-14 образцам, представлены в таблице 2.

С ростом фактической длины углеродного волокна в композиционном материале (переход от ДФ к АДФ) с 0,1 до 20 мм ударная вязкость возрастает в 3 раза.

Таблица 2 - Результаты испытаний на удар УУКМ типа ТЕРМАР

Материал	Направление удара	$F_{\text{макс}}, \text{ Н}$	$\sigma_{\text{и}}^{\text{уд}}, \text{ МПа}$	$a_k, \text{ кДж/м}^2$
ТЕРМАР-УК1, диск 7	осевое	1411,5±148,2	84,7±8,9	34,5±12,1
	радиальное	1868,0±109,5	112,1±6,6	19,1±1,5
ТЕРМАР-УК2, диски 3,4	осевое	969,8 ± 196,4	87,3±17,7	20,9 ± 3,5
	радиальное	1227,6 ± 271,8	110,5±24,5	12,6 ± 3,4
ТЕРМАР-АДФ, диск 8	осевое	745,8±267,5	67,1±24,1	11,5±2,6
	радиальное	1069,6±215,3	96,3±19,4	12,7±2,6
ТЕРМАР-АДФ, диск 9	осевое	769,8 ± 196,4	69,3±17,7	10,9 ± 3,5
	радиальное	1142,6 ± 266,8	102,8±24,0	11,6 ± 3,4
ТЕРМАР-ДФ, диск 10	осевое	447,6 ± 33,7	40,3±3,0	5,0±0,8
	радиальное	386,5 ± 23,3	34,8±2,1	4,3±0,7
ТЕРМАР-ТД	осевое	511,9 ± 45,1	46,1±4,1	7,0±0,7
	радиальное	441,9 ± 29,4	39,8±2,6	5,5±0,7

Ударная вязкость УУКМ на основе дискретной ткани в 3-7 раз выше, чем у армированных дискретными волокнами. Замена первого цикла карбонизации на графитацию (переход от УК1 к УК2) привела к снижению ударной вязкости в 1,4 раза. Это можно объяснить охрупчиванием армирующих волокон в процессе графитации, повышением их чувствительности к действию изгибающих напряжений в материале.

Для обеспечения работоспособности в условиях ударных нагрузок предпочтительно армирование дискретной тканью или сочетание ткани и дискретных волокон максимально возможной длины.

Критические значения коэффициентов интенсивности напряжений, представленные в таблице 1, определены при трехточечном изгибе на образцах 70x10x10 мм с концентратором глубиной 3 мм. Первичный надрез нанесен с помощью фрезы толщиной 1 мм. на глубину 2 мм., от его вершины с помощью лезвия нанесена трещина толщиной 0,08 мм, глубиной 1 мм. Расстояние между опорами 60 мм., скорость перемещения пуансона 0,5 мм/мин., среднее число образцов на точку 14.

Для образцов из материалов типа АДФ и УК2, испытанных в осевом направлении Z в плоскости θZ , были определены два коэффициента

интенсивности: K_{1c}^{\perp} - для образцов, разрушившихся в результате нормального отрыва, и K_{1c}^{\parallel} - разрушившихся от локального расслоения. Значения K_{1c}^{\perp} - оказались практически равны ($\approx 4,6 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$). Образцы из УК1 в осевом направлении Z в плоскости θZ разрушались с локальным расслоением, поэтому УК1 определено только $K_{1c}^Z = 3,9 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$.

При испытании в окружном направлении все УУКМ разрушались от нормальных напряжений; трещиностойкость материалов АДФ и УК2 в этом направлении также практически одинакова, $\approx 7,9\text{--}8 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$ и превышает в 1,7 раза K_{1c}^Z . Лучшую сопротивляемость распространению трещин в окружном направлении показал УК1, для него $K_{1c}^{\parallel} = 10,5 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$, то есть в 1,3 раза больше, чем у АДФ и УК2. Самое низкое значение трещиностойкости показал материал ДФ, для которого K_{1c}^{\parallel} и K_{1c}^{\perp} практически совпадают и равны $2,1 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$.

Для УУКМ характерна значительная вариация свойств, как в пределах партии заготовок, так и в пределах единичной заготовки. Для материала АДФ (диски 8,9) при сжатии в окружном направлении предел прочности (средний для 10 образцов) равен 105,7 МПа, минимальное 81,2 МПа., максимальное значение 121,6 МПа., для материала УК1 92,9 – 82,1 – 107,8 МПа, для УК2 90,4 – 70,0 – 106,5 МПа, соответственно. Наибольший разброс максимальных и минимальных значений в пределах заготовки зафиксирован на материалах ДФ и СТД.

Распределение предела прочности для 102 образцов из материала ДФ, представлено на рисунке 2.

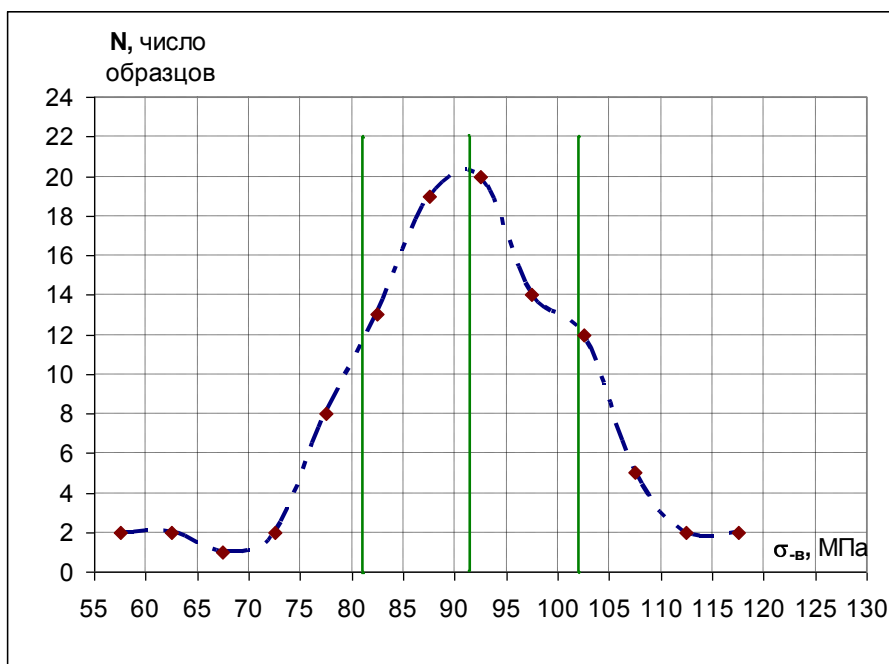


Рисунок 2 - Распределение значений предела прочности материала ТЕРМАР-ДФ при сжатии в окружном направлении. 102 образца, Среднее значение прочности $91,5 \pm 10,5 \text{ МПа}$.

Распределение близко к нормальному закону; анализ на выбросы максимальных и минимальных значений с использованием критерия Граббса показал, что все результаты могут быть отнесены к одной генеральной совокупности. В силу такой особенности УУКМ для корректной трактовки результатов циклических испытаний требуется оценка предела прочности каждого единичного образца с использованием нормирующих зависимостей. В работе показано, что в качестве нормирующих зависимостей могут использоваться:

«предел прочности – модуль упругости», «предел прочности – кажущаяся плотность», «предел прочности – предел пропорциональности».

На рисунке 3 представлены зависимости модуля упругости материала ДФ от предела прочности при сжатии в окружном направлении для 4-х технологических партий. Для каждого из исследованных УУКМ зависимости «предел прочности – модуль упругости», «предел прочности – кажущаяся плотность», «предел прочности – предел пропорциональности» характеризовались различными величинами коэффициентов корреляции.

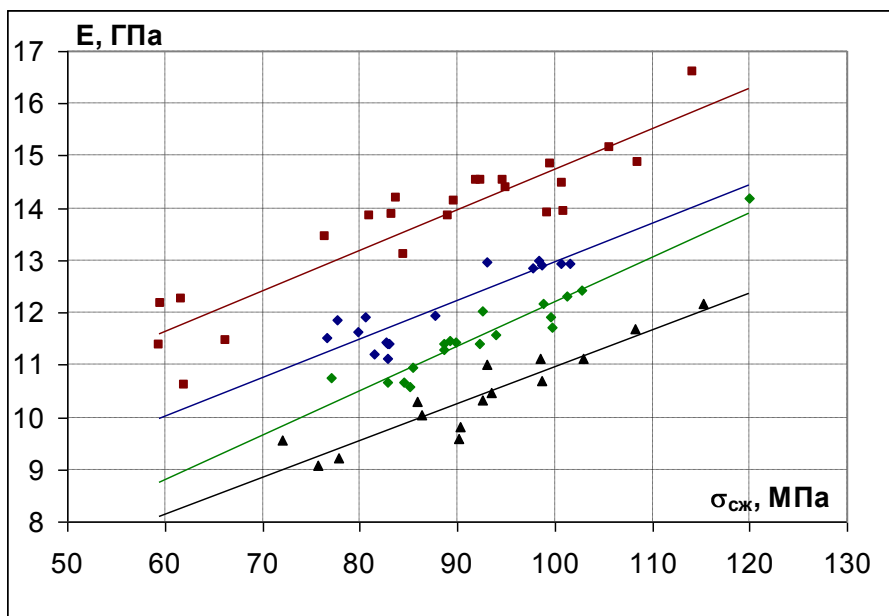


Рисунок 3 - Зависимость модуля упругости от предела прочности при сжатии в окружном направлении. Материал ТЕРМАР-ДФ, образцы 4 технологических партий.

Зависимость предела прочности единичных образцов от плотности представлена на рисунке 4.

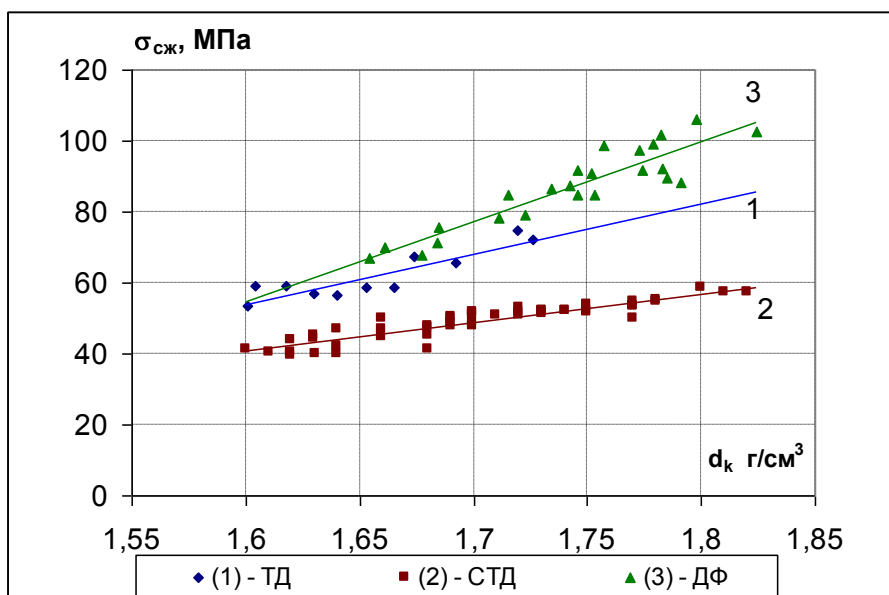


Рисунок 4 - Зависимость предела прочности образцов из материалов ТД, СТД и ДФ от плотности.

Корреляция для материалов ТД, СТД, ДФ при использовании линейной аппроксимации составляет 0,8 – 0,92, в то время как для материалов УК1 и УК2 не превышает 0,65. При построении кривых малоциклового усталости для всех УУКМ, в качестве нормирующей выбиралась зависимость с наибольшей величиной коэффициента корреляции. Для СТД, ТД, ДФ зависимость «плотность – предел прочности», для АДФ, УК1 и УК2 - «предел прочности – модуль упругости»

Во второй части третьей главы приведены кривые малоциклового усталости УУКМ при сжатии и изгибе, на базе 15000 циклов, рассмотрены подходы к уточнению их положения с использованием нормирующих зависимостей.

На рисунке 5 представлено рассеяние результатов статических испытаний и распределение усталостной долговечности при циклических испытаниях образцов из материала ТД при сжатии в окружном направлении.

Малое количество образцов для испытаний на усталость и значительный разброс результатов статических испытаний 56 – 75 МПа при использовании классических подходов не позволяют построить кривую малоциклового усталости. Наличие корреляции между плотностью и пределом прочности (рисунок 4, коэффициент корреляции 0,877) позволяет нормировать максимальные напряжения цикла не на среднее значение предела прочности по материалу, а на рассчитанные значения прочности образца с использованием нормировки по плотности.

На рисунке 6 представлены две кривые усталости, (б) - нормированная на предел статической прочности и (в) - скорректированная с учетом зависимости прочность – плотность единичных образцов. Использование нормирующей зависимости позволило уточнить положение кривой малоциклового усталости в относительных величинах. Скорректированная кривая малоциклового усталости проходит ниже и определенное значение предела усталостной прочности для материала на 10% меньше, чем без использования корректирующей зависимости.

Кривые малоциклового усталости, построенные по результатам испытаний образцов из материала АДФ при сжатии в осевом направлении приведены на рисунке 7. В процессе подготовки испытаний были выделены две группы образцов из материала АДФ. Рассматривалась группа из 104 кондиционных образцов и группа из 63 образцов, содержащих в структуре грубые дефекты, такие как V- и Z-изломы в укладке армирующего наполнителя, крупные включения коксовой матрицы, отклонения направления приложения нагрузки от направления армирования более чем на 5°, что позволило построить для них отдельную кривую малоциклового усталости.

Значительная часть образцов (19 образцов), содержащие в структуре дефекты, в процессе испытаний на малоцикловую усталость разрушилась на первом цикле нагружения до достижения заданных программных значений максимального напряжения цикла. Кривая малоциклового усталости для группы дефектных образцов проходит на 15 -20 МПа ниже, чем для кондиционных образцов. Сравнение нормированных кривых малоциклового усталости УУКМ АДФ при сжатии в окружном направлении приведено на рисунке 8.

Для всех исследованных материалов в области малоциклового усталости можно выделить два участка, отличающихся по скорости разупрочнения, которые могут быть аппроксимированы линейными зависимостями в полулогарифмических координатах

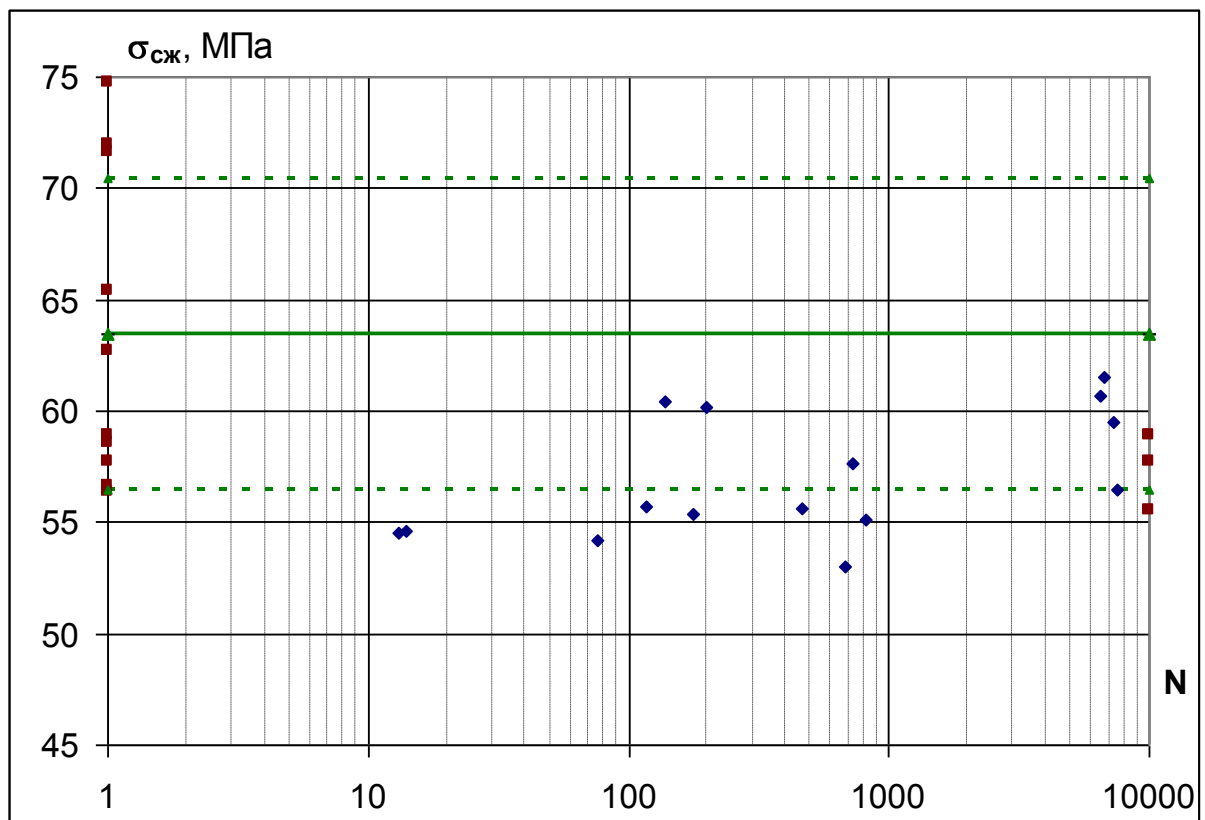


Рисунок 5 - результаты испытаний на малоцикловую усталость образцов из материала ТЕРМАР-ТД, сжатие в окружном направлении (θr)

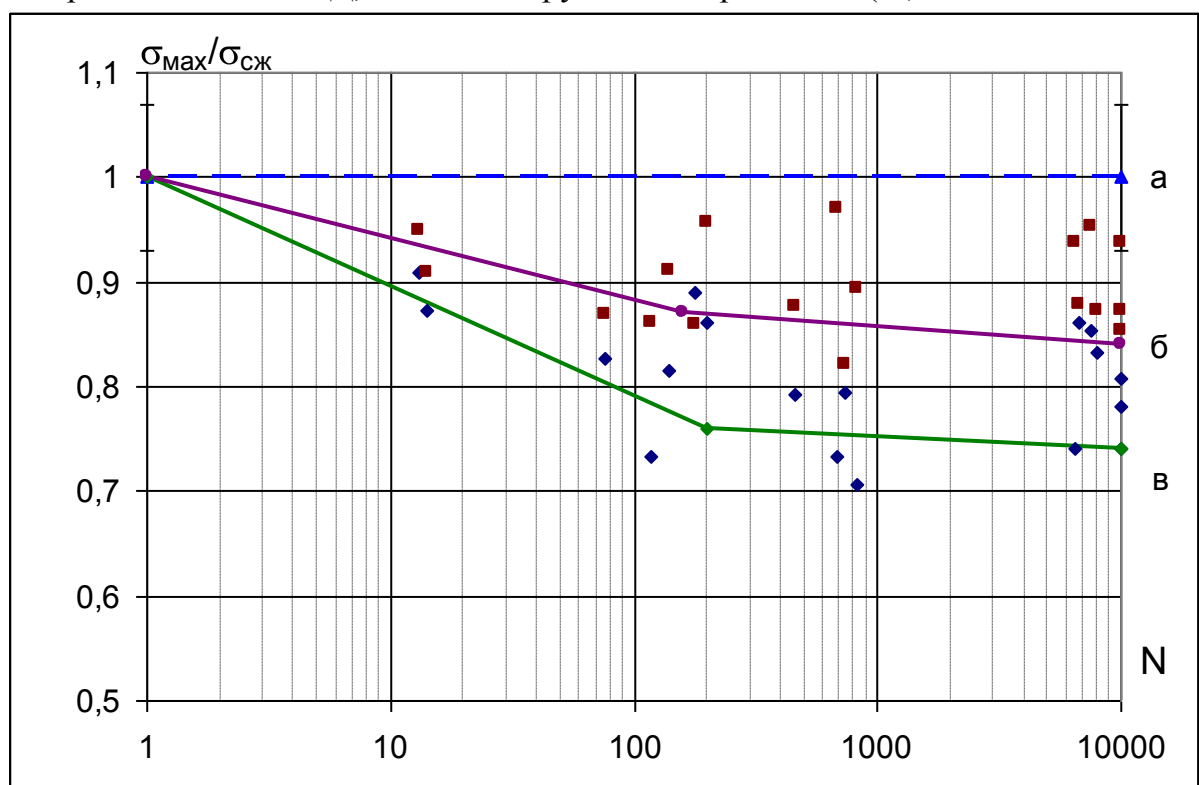


Рисунок 6 - Нормированные кривые малоцикловой усталости образцов из материала Термар-ТД, (а) – СКО результатов статических испытаний. (б) – нормировка по среднему значению предела прочности, (в) – нормировка по зависимости предел «прочности - плотность».

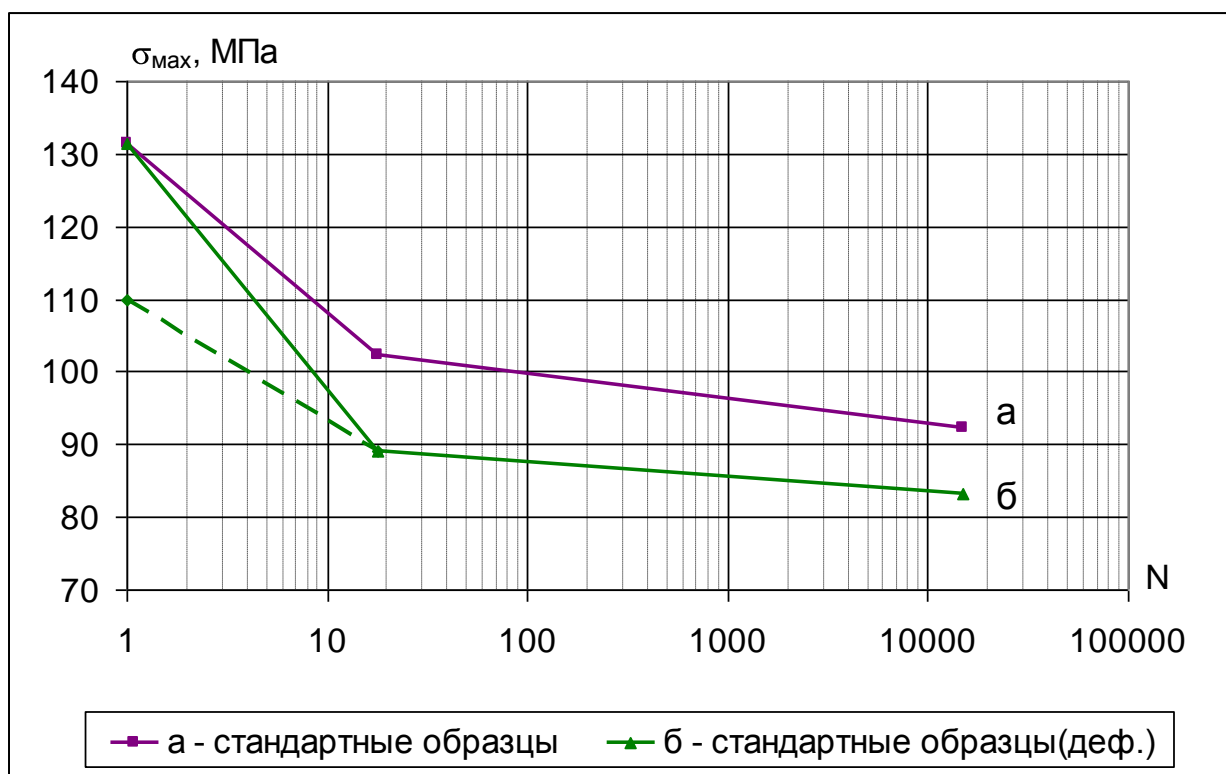


Рисунок 7 - Кривые малоциклового усталости образцов из материала АДФ при сжатии в окружном направлении (θr). (а) – кондиционные образцы, (б) – дефектные образцы.

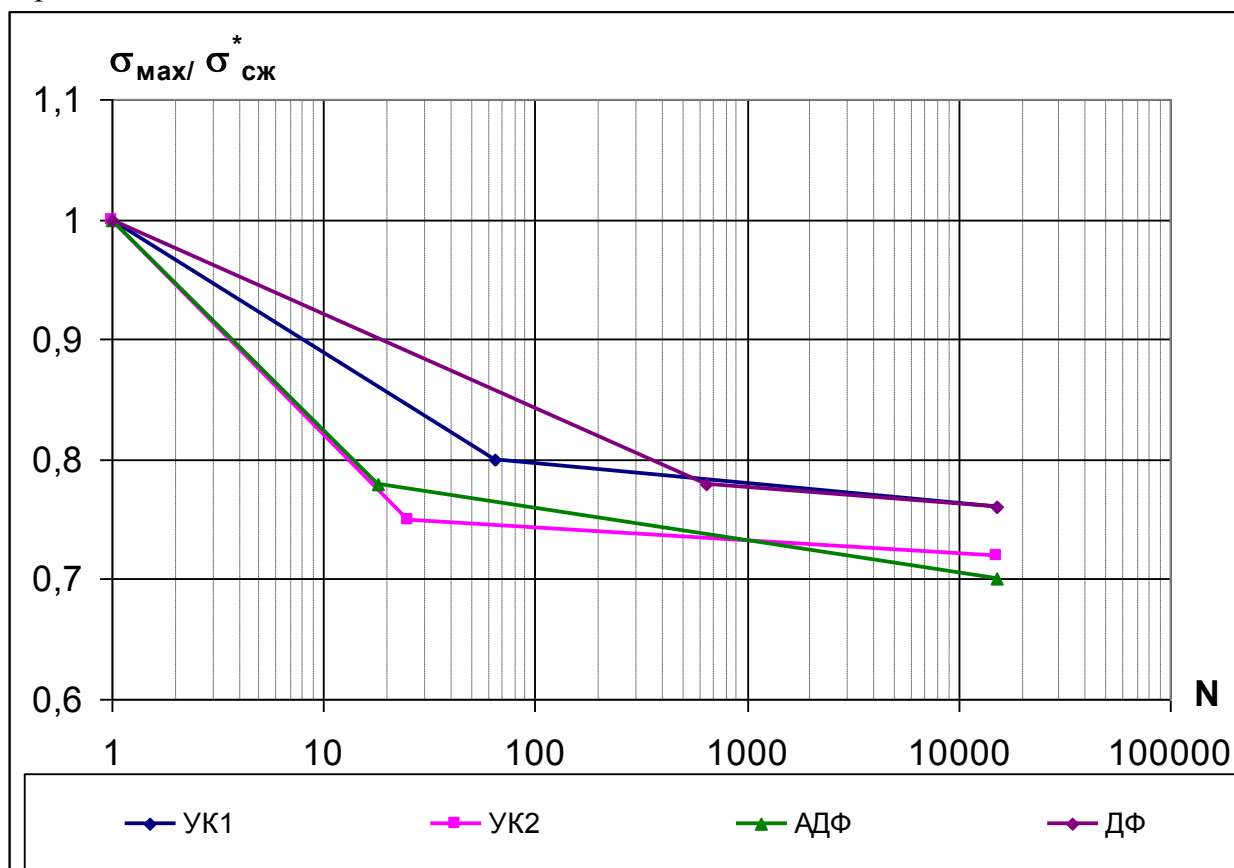


Рисунок 8 - Кривые малоциклового усталости образцов из материалов типа ТЕРМАР при сжатии в окружном направлении (θr).

На первом участке (1–100 циклов), при значениях максимальных напряжений цикла более $0,75\text{--}0,8 \sigma_{сж}$ для всех материалов наблюдается интенсивное накопление и развитие повреждений. На втором участке скорость разупрочнения снижается в 3–10 раз, что связано со сменой механизмов возникновения и накопления повреждений.

С учетом разброса экспериментальных данных второй участок может быть аппроксимирован единой зависимостью. Для всех материалов условный предел малоциклового усталости на базе 15000 циклов составляет $0,74 \pm 0,03 \sigma_{сж}$. Второй участок диаграммы для всех материалов с температурой финальной обработки $2000 - 2100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ практически совпадает, что позволяет сделать вывод о преобладающей роли пековой матрицы в процессе накопления усталостных повреждений при сжатии в исследованных материалах.

В третьей части третьей главы представлены результаты испытаний модельных образцов на сжатие из материалов АДФ, УК1 и УК2 и построение кривых малоциклового усталости. Модельные образцы, имитирующие форму фрагмента узла зацепления в сочетании с имитацией способа нагружения (рисунок 9(а)), показали большую стойкость к воздействию циклических нагрузок по сравнению со стандартными, так как наличие бокового поджатия защитными металлическими скобами замедляет процесс накопления усталостных повреждений.

Наличие в материале таких дефектов, как перегибы волокна "Z" и «V»-образной формы, крупные включения хрупких коксовых частиц снижает усталостную долговечность. Различие характера разрушения модельного образца, содержащего и не содержащего дефекты приведено на рисунке 10(б).

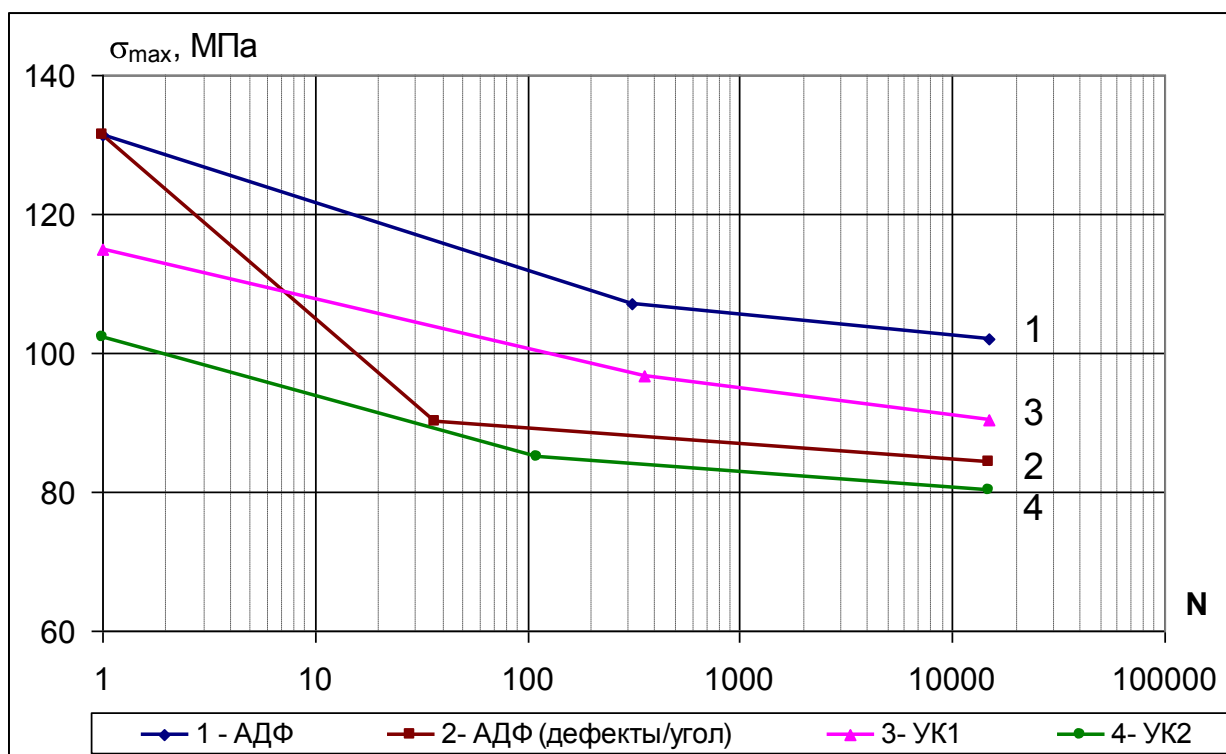


Рисунок 9 - Кривые малоциклового усталости модельных образцов из материалов ТЕРМАР при сжатии.

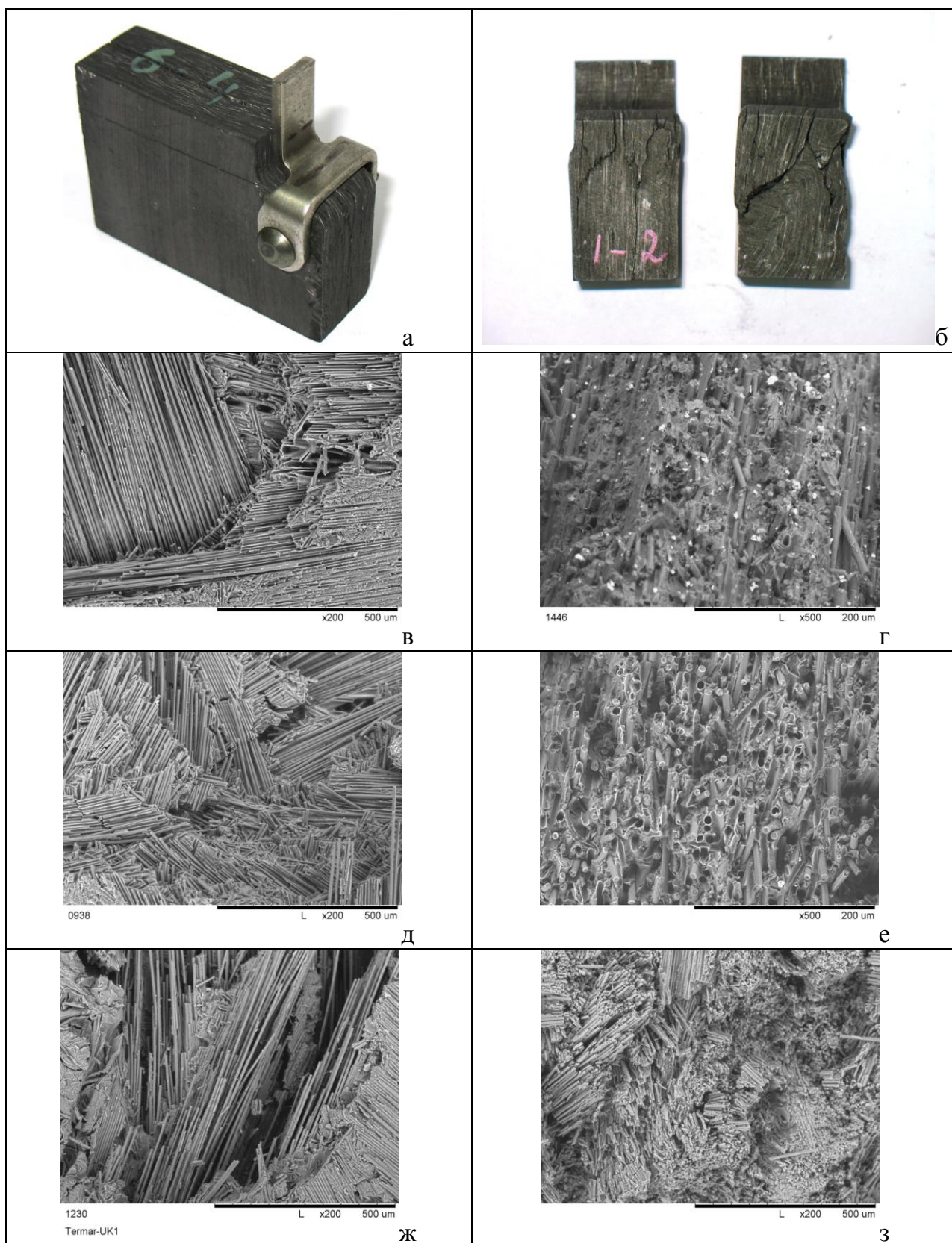


Рисунок 10 - поверхность разрушения УУКМ: (а) – модельный образец в сборе, (б) – разрушение модельных образцов на сжатие, АДФ (в) разрушение АДФ при сжатии, (г) при циклическом сжатии, (д) АДФ при ударе, (е) – ДФ при ударе, (ж) – УК1 при ударе, (з) - УК1 при циклическом сжатии.

Разрушение модельных образцов не происходило мгновенно. Первичные трещины от момента их появления до момента потери образцом устойчивости в зависимости от уровня максимальных напряжений цикла развивались в пределах от 10 до 10000 циклов. Некоторые образцы, получив повреждения на первых циклах нагружения, выдержали максимальные нагрузки цикла до исчерпания базы испытаний $N = 15000$ циклов. Длина трещины при этом достигала 8-12 мм. (до 30-35% от высоты образца) при уровне напряжений $\sigma_{\max} = 0,6 - 0,9 \sigma_{\text{сж}}$. В цикле нагружения наблюдался процесс раскрытия – закрытия трещин при изменении нагрузки, сопровождавшийся выносом с воздухом пылевидных продуктов разрушения.

Первичные повреждения происходили, как правило, в зоне контакта материала с металлическим крепежом: в зоне контакта поверхности боковой скобы с образцом, и в зоне смятия материала под шпилькой по краям отверстия.

В четвертой части третьей главы представлены результаты исследования поверхностей разрушения УУКМ при статических, циклических и ударных нагрузках с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM-1000. Характерный вид поверхностей разрушения приведен на рисунке 10(в - з).

При протекании усталостных процессов в УУКМ происходит разрушение матрицы и измельчение волокон, уменьшающие их средний размер в композите. Процессы разрушения углеродной матрицы можно разделить на разрушение границ с волокном, разрушение матрицы внутри углеродных жгутов и разрушение матрицы, связывающей между собой отдельные жгуты.

При воздействии ударных нагрузок происходит преимущественное разрушение коксовой матрицы на границе раздела с волокном. В материалах, армированных длинными волокнами, разрушается матрица, контактирующая непосредственно с поверхностью волокна и находящаяся внутри жгутов. В материале ДФ с короткими волокнами наблюдается их выдергивание из матрицы.

В **ГЛАВЕ 4** представлены результаты анализа изменения в форме петель гистерезиса при циклическом сжатии образцов из УУКМ. В результате проведенного анализа предложен деформационный критерий начала интенсивного разрушения материалов.

Характерный вид диаграммы нагрузка-деформация при сжатии в осевом и окружном направлении представлен на рисунке 11. Для большей части испытанных материалов в процессе нагружения с увеличением числа циклов характерен переход к нелинейным зависимостям $P(\Delta L)$ при отрицательной кривизне диаграмм. Диаграммы в пределах одного цикла охарактеризованы двумя касательными к начальному упругому и к конечному участку деформационного упрочнения. Пересечение касательных даёт точку перегиба, $(\sigma_{\theta, \text{кр}})$, достижение которого означает смену механизма деформирования: с упругого деформирования на деформационное упрочнение. Первый участок характеризуется модулем упругости E_{θ}^H , второй участок – модулем E_{θ}^{KM} .

Определение величин коэффициентов Пуассона и измерение размеров образцов при испытаниях позволило выявить уплотнение образцов при сжатии: на первом участке до $\sigma_{\theta}^{\text{кр}}$ оно было обратимым, выше $\sigma_{\theta}^{\text{кр}}$ – частично обратимым.

Изменения упругих характеристик позволяет предположить, что в процессе нагружения протекают два конкурирующих процесса: с одной стороны, это увеличение адгезионного взаимодействия между углеродным волокном и коксовой

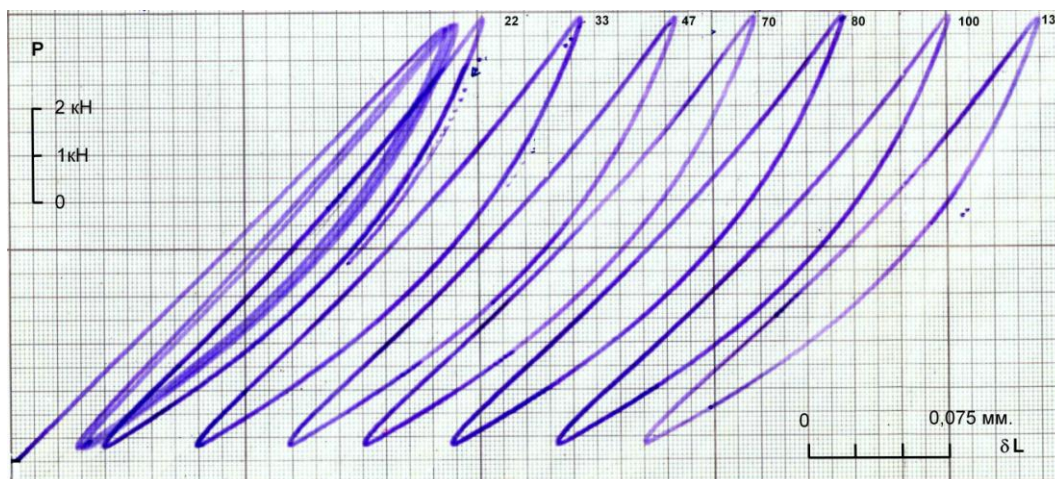


Рисунок 11 - Машинная диаграмма «нагрузка – удлинение» при циклическом нагружении при сжатии образцов УУКМ в осевом направлении. Разрушение 143 цикл.

матрицей, в результате уплотнения материала и действия касательных напряжений в образце вследствие его взаимодействия с опорами; с другой стороны, это возникновение микрповреждений на границах раздела волокно-матрица, разрушение отдельных элементарных волокон, образование и рост новых микротрещин, их коагуляция и развитие. На начальном участке упругие характеристики материала (E_n) определяются преимущественно коксовой матрицей и воспринимающими нагрузку короткими участками углеродных волокон. С увеличением нагрузки происходит постепенное закрытие пор, под действием возникающих в материале сдвиговых напряжений увеличивается длина нагруженных участков углеродных волокон и степень реализации волокнами их упругих характеристик, что приводит к обратимому возрастанию упругих свойств УУКМ на конечном участке (E_{km}).

Изменения значений начального и конечного модуля упругости на примере материала АДФ представлены на рисунке 12.

Для материала АДФ при максимальных напряжениях цикла более $0,82 \sigma_{сж}$ равновесие между процессами упрочнения и разупрочнения сохраняется в течение первых 3-5 циклов, с некоторым превалированием процесса упрочнения. Модуль упрочнения E_{km} возрастает с 36 до 37 ГПа, а начальный модуль E_n с 15 до 16,8 ГПа (рисунок, кривые 1а и 1б), после чего происходит их снижение, обусловленное процессами накопления повреждений и трещинообразования. Величина E_n , определяемая жесткостью матрицы, снижается на 0,9 от исходного значения, а E_{km} к моменту разрушения уменьшается до 0,81 от исходного значения. Такое изменение касательных модулей позволяет предположить, что протекающие при высоких напряжениях процессы приводят к уменьшению «эффективной» длины волокна в композиционном материале, как вследствие разрушения волокон и уменьшения их длины, так и в силу разрушения границ раздела волокно-матрица, приводящее к ослаблению адгезионного взаимодействия. При накоплении критического количества дефектов происходит разрушение образца. На рисунке 13 представлено изменение деформаций при циклическом нагружении в зависимости от уровня действующих напряжений.

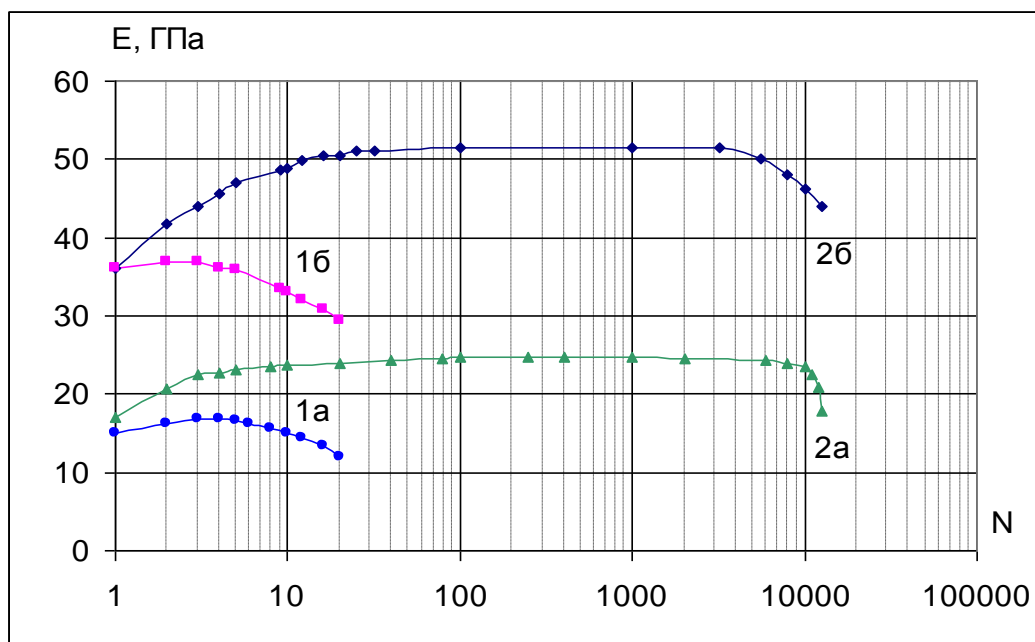


Рисунок 12 - Изменение упругих характеристик (а) E_n и (б) E_k при циклическом сжатии материала ТЕРМАР-АДФ в зависимости от величины максимальных напряжений цикла. (1) $\sigma_{\max} \cong 0,8 \sigma_{сж}$ (2) $\sigma_{\max} \cong 0,7 \sigma_{сж}$

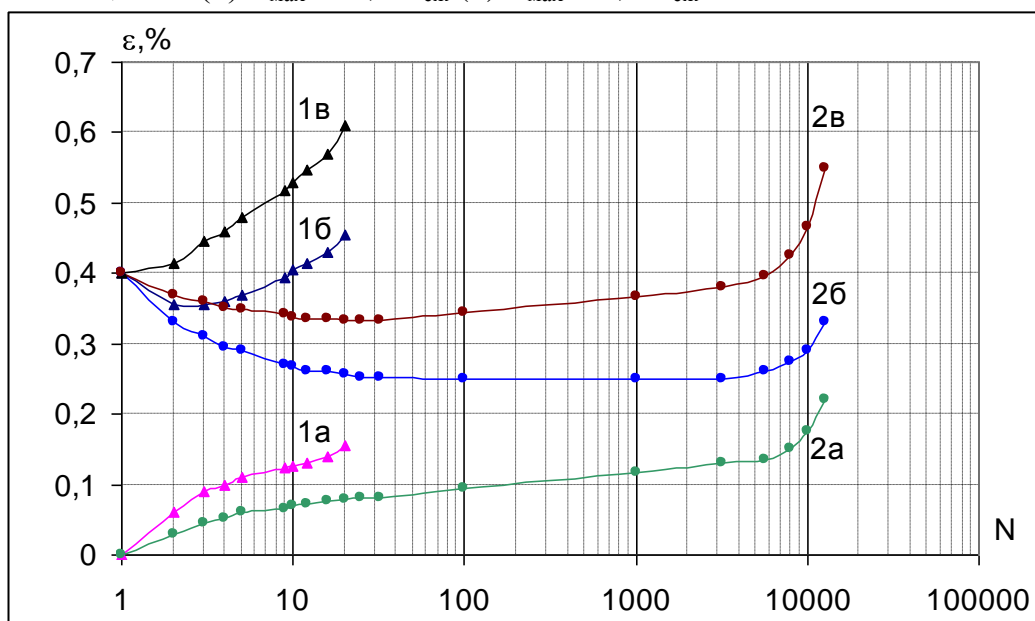


Рисунок 13 - Кинетика накопления деформаций материалом АДФ при циклическом сжатии. (1) $\sigma_{\max} \cong 0,8 \sigma_{сж}$, (2) $\sigma_{\max} \cong 0,7 \sigma_{сж}$, (а) накопленная деформация, (б) обратимая деформация, (в) полная деформация.

На основании анализа данных об изменении деформаций в пределах цикла нагружения и накоплении деформаций при разных уровнях максимальных напряжений цикла для УУКМ типа ТЕРМАР предложен деформационный критерий разрушения, согласно которому разрушение материала при малоцикловых усталостных испытаниях происходит тогда, когда полная деформация цикла становится равной деформации разрушения материала при статических испытаниях.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Разработан и экспериментально реализован комплекс методик малоцикловых усталостных испытаний, учитывающий особенности структуры и анизотропию свойств, характерную для УУКМ фрикционного назначения.

Определён условный предел малоциклового усталости на базе 15000 циклов для УУКМ с матрицами на основе пека, разными схемами армирования и видом армирующего наполнителя, составляющий $0,74 \pm 0,03 \sigma_{сж}$. Ход кривых малоциклового усталости и величины значений условного предела усталостной прочности позволяет предположить определяющую роль матрицы в обеспечении усталостной долговечности в УУКМ.

Анализ усталостных кривых позволяет прогнозировать значение предела усталостной прочности на уровне 0,5 - 0,6 от соответствующих значений пределов прочности на базе 10^7 циклов.

Выявлены особенности деформирования и накопления повреждений в УУКМ фрикционного назначения, разработан деформационный критерий разрушения материалов, позволяющий прогнозировать развитие усталостного процесса.

Показано что грубые дефекты структуры, такие как включения кокса, «V»- и «Z»-образные перегибы волокнистого наполнителя снижают малоцикловую усталостную прочность материала ТЕРМАР-АДФ на 10-15% (на базе $1,5 \cdot 10^4$ циклов).

Исследовано влияние особенностей технологии получения УУКМ (длины и вида армирующего наполнителя, процессов карбонизации и графитации) на их работоспособность в условиях динамического нагружения. Показано что материалы, армированные дискретным тканым наполнителем, по величине ударной вязкости, вязкости разрушения в 2-8 раз превосходят композиты, армированные дискретными волокнами и непрерывными волокнами и тканями. Использование для армирования карбонизованных волокон за счет формирования менее плотной и связанной матрицы внутри жгутов обеспечивают композиту более высокую сопротивляемость возникновению и развитию трещин по сравнению графитированными.

Проведены модельные испытания образцов, имитирующие условия работы материала в реальных конструкциях тормозных дисков. Усталостная прочность при сжатии УУКМ типа ТЕРМАР, определённая на модельных образцах, имитирующих условия работы материала в реальных конструкциях тормозных дисков, на 10-15% выше чем на стандартных образцах.

Установлено, что применяемая геометрия шипового зацепления дисков не позволяет реализовать характеристики материала из-за действия перерезающих сдвиговых напряжений. Сделаны рекомендации по изменению конструкции шипового зацепления.

Научные статьи опубликованные по теме диссертации

1. **А.А.Степашкин**, Г.Е.Мостовой, В.В.Кулаков. К вопросу об усталостной прочности фрикционных композиционных материалов типа ТЕРМАР. // Конструкции из композиционных материалов, №3. сс.98-104, 1999 (из списка ВАК)
2. **А.А.Степашкин** Усталостная прочность и вязкость разрушения углерод-углеродных композиционных материалов ТЕРМАР-АДФ. // Сб. «Современные проблемы производства и эксплуатации углеродной продукции». Челябинск. 2000. –с.179-182.
3. **А.А.Степашкин**, Г.Е.Мостовой. Изменение модуля упругости углерод-углеродного композиционного материала при циклическом сжатии// Перспективные материалы № 5, сс. 20-25, 2002 (из списка ВАК)
4. **А.А. Stepashkin**, G.E. Mostovoy. Variation of the elasticity modulus of carbon-carbon composite materials under cyclic loading// J. Advansed Materials, v.9, pp. 471-477, 2003.
5. **А.А.Степашкин**, В.В. Мозолев, Г.Е.Мостовой. Оценка ресурса углерод-углеродных тормозных дисков авиаколес с учетом эволюции механических свойств материала. // http://www.mami.ru/science/aai77/scientific/article/s05/s05_16.pdf