

На правах рукописи



ВОРОБЬЁВ Игорь Андреевич

**КРИТЕРИЙ ПРОЧНОСТИ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И
ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

Специальность: 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Московский политехнический университет" на кафедре "Техническая механика и компьютерное моделирование".

Научный руководитель: **Бондарь Валентин Степанович**
Заслуженный деятель науки РФ, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры "Техническая механика и компьютерное моделирование" ФГАОУ ВО "Московский политехнический университет"

Официальные оппоненты: **Матвиенко Юрий Григорьевич**
доктор технических наук, профессор, заведующий отделом "Прочность, живучесть и безопасность машин" ФГБУН "Институт машиноведения имени А.А. Благонравова Российской Академии наук"

Горбачев Владимир Иванович
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой механики композитов ФГБОУ ВО "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова"

Ведущая организация **Акционерное общество "Композит"**

Защита состоится "15" мая 2025 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.410.03 на базе ФГБОУ ВО "Тверской государственный технический университет" по адресу: 170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22, ауд. Ц-208.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО "Тверской государственный технический университет" и на сайте ВУЗа по адресу: <https://new.tstu.tver.ru/science/dissertation/24.2.410.03/#pills-defense>.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Алексеев
Андрей Алексеевич

ВВЕДЕНИЕ

Идея создания композиционных материалов путем смешения мягких матриц с прочными армирующими волокнами возникла не случайно. Эта концепция заимствована у природы: древесина и кость, пожалуй, самые распространенные примеры природных композитов. Древесина состоит из волокон целлюлозы, придающих ей способность изгибаться, не ломаясь, и соединения под названием лигнин, обеспечивающего жесткость. Кость – это сочетание мягкой матрицы из белка коллагена и прочного, но хрупкого, минерала апатита. Люди тысячелетиями используют композиционные материалы в строительстве, начиная от кирпичей из глины с соломой, и заканчивая современным железобетоном.

Композиционные материалы все чаще применяются во многих отраслях промышленности, особенно в машиностроении. Использование таких материалов, как правило, гарантирует высокую прочность и массовую эффективность конструкций. В настоящее время многие научно-технические проблемы в области промышленной техники решаются благодаря использованию полимерных органических и неорганических материалов. Их структура, композиционный состав и используемые связующие соединения зависят от назначения и условий эксплуатации изделия. Как правило, армированные волокнами полимерные композиционные материалы (ПКМ) применяются в виде однонаправленных лент или переплетенных тканей.

Использование композиционных материалов на основе полимерных связующих (фенольных, эпоксидных, цианатэфирных и др.) и наполнителей (стеклянных, углеродных, полимерных, металлических) в виде нитей, лент, тканевых материалов является одним из основных направлений по совершенствованию массовых характеристик различных изделий. Конструкционные полимерные композиционные материалы применяются в трехслойных панелях с сотовым наполнителем, антеннах, обтекателях, панелях солнечных батарей, крупногабаритных несущих конструкциях, для упрочнения металлических баков и пр. Изделия из полимерных композиционных материалов изготавливаются с использованием автоклавно-вакуумной и прессовой технологий, литьем под давлением, ручной выкладкой, намоткой и т.д.

Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения на основе углеродных наполнителей обладают наиболее высокими удельными характеристиками прочности и жесткости при минимальном коэффициенте линейного термического расширения, что обеспечивает конструкциям из них высокую стабильность в процессе эксплуатации. В то же время конструкции из полимерных композиционных материалов имеют значительно меньший, чем алюминиевые, вес при тех же или лучших жесткостных характеристиках.

Ключевой особенностью применяемых в и машиностроении полимерных композиционных материалов, армированных стекло- или угле-волокном, является то, что они анизотропны и неоднородны в целом, а их механическое поведение сильно отличается от металлов и других изотропных

структур. В разрушении полимерных композиционных материалов участвует несколько механизмов, обладающих накопительным эффектом, например, расслоение, разрушение армирующих волокон или матрицы, тогда как в металлах доминирует одна трещина и её распространение.

Исследование прочности композитных конструкций предполагает современные методы определения механических характеристик полимерных композиционных материалов и создание критериев прочности или условий разрушения, которые позволяют на основе минимального количества испытаний при одноосном или двухосном нагружении прогнозировать разрушение конструкции при любом виде напряженного состояния. Однако, в тех случаях, когда направление растяжения не совпадает с направлением укладки, разработанные экспериментальные методы недостаточно точны. В частности, при определении упругих характеристик полимерных композиционных материалов с укладкой под углом 45° к направлению оси образца различные методики показывают различные результаты.

Несмотря на то, что полимерные композиционные материалы считаются нечувствительными к усталости, особенно по сравнению с металлами, всё же они подвержены разрушению от циклических нагрузок. К сожалению, уже разработанные методы оценки и прогнозирования ресурса изотропных материалов не могут быть применены к конструкциям, изготовленным из анизотропных полимерных композиционных материалов, поскольку существует огромное количество различных комбинаций из волокон, матриц и методов их производства, что затрудняет разработку единого метода оценки и прогнозирования ресурса таких конструкций.

Актуальность работы

В настоящее время, полимерные композиционные материалы конструкционного назначения используются в авиа- и машиностроении наравне со сталью, алюминием и титаном для изготовления многих критически важных элементов конструкций таких, как крылья и фюзеляж самолетов, лопасти ветряных турбин, кузов и другие элементы автотранспорта и др. Большинство из этих конструкций работают при воздействии как статических, так и переменных нагрузок, имеющих произвольный характер. Таким образом, задача оценки статической и циклической прочности полимерных композиционных материалов является одной из актуальных задач при прогнозировании ресурса современных конструкций.

Можно выделить несколько наиболее значимых причин, имеющих решающее значение при оценке и прогнозировании разрушения полимерных композиционных материалов от статических и циклических нагрузок:

- полимерные композиционные материалы конструкционного назначения, как правило, хрупкие, то есть их разрушение начинается без значительной пластической деформации. Таким образом, понимание механизма их разрушения от статических и циклических нагрузок, оценка и прогнозирование ресурса имеют большое значение;
- исследование поведения полимерных композиционных материалов очень важно для машиностроения, в частности, при экспериментальной

отработке прочности изделий и элементов конструкций. До сих пор при отработке прочности используется итерационный подход, предполагающий проведение испытаний изделия или элемента конструкции в реальных или близких к реальным условиям нагружения, однако, такой подход является дорогостоящим и трудозатратным;

- оценка прочности композитных конструкций по результатам статических расчетов неполноценна, игнорирование циклических нагрузок может губительно сказаться на ресурсной прочности всего изделия или элемента конструкции.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время, актуальными направлениями исследований являются механизмы разрушения, прогнозирование долговечности, моделирование процессов накопления повреждений и оценка влияния эксплуатационных факторов на ресурс и статическую прочность композитных конструкций.

Существенные достижения были сделаны в изучении процессов разрушения полимерных композитов, особенно углепластиков и стеклопластиков, что нашло отражение в работах отечественных и зарубежных исследователей. Разработаны различные модели для описания прочностных характеристик полимерных композиционных материалов, однако, большинство из них ограничены применением к специфическим условиям нагружения и отдельным типам материалов.

Цель работы. Разработка экспериментально обоснованных критериев статической и циклической прочности полимерных композиционных материалов для прогнозирования ресурса многослойных композитных конструкций. Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих **основных задач**:

1. разработка метода оценки статической прочности полимерных композиционных материалов;
2. разработка метода оценки циклической прочности, позволяющего прогнозировать ресурс полимерных композиционных материалов при циклическом нагружении;
3. разработка метода определения параметров материала и критериев статической и циклической прочности;
4. проведение проверки методов оценки циклической и статической прочности, а также метода определения параметров материала, по результатам экспериментальных исследований.

Научная новизна работы. Разработан новый критерий циклической прочности полимерных композиционных материалов, позволяющий определять ресурс слоев материала при циклическом нагружении. Предложен уточненный критерий статической прочности полимерных композиционных материалов. Разработан метод определения параметров материала и критериев статической и циклической прочности полимерных композиционных материалов по ограниченному набору экспериментальных данных.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты исследования позволяют повысить точность оценки статической и

циклической прочности конструкций из полимерных композиционных материалов. Результаты работы внедрены в расчетную практику Центра прикладных исследований АО "ЦНИИмаш" и используются при проведении прочностных расчетов композитных конструкций.

Методология и методы исследования. Методы исследования основаны на сравнении результатов численных расчетов деформирования и разрушения образцов полимерных композиционных материалов с данными, полученными на основе экспериментальных исследований.

Положения, выносимые на защиту:

1) метод оценки статической прочности полимерных композиционных материалов, основанный на предположении об упругом характере деформирования ортотропного материала и модифицированном критерии прочности Хашина;

2) критерий циклической прочности полимерных композиционных материалов, включающий аналитическое уравнение кривой усталости, связывающее количество циклов до разрушения с максимальным значением индикатора прочности в цикле;

3) метод определения параметров кривой усталости по результатам экспериментов при заданных коэффициентах асимметрии и числах циклов до разрушения при циклическом нагружении;

4) уточнение критерия прочности Хашина, позволяющее повысить точность оценки момента разрушения армирующего волокна при растяжении при наличии сдвиговых напряжений;

5) метод определения параметров упругого деформирования и критериев статической и циклической прочности, основывающийся на минимально возможном количестве экспериментальных исследований.

Достоверность результатов. Результаты численных расчетов прошли проверку путем сравнения с экспериментальными данными как полученными лично автором, так и из литературных источников. Экспериментальные исследования проведены с использованием современного испытательного оборудования.

Апробация работы. Основные результаты исследований были представлены на:

1) Отраслевой научно-практической конференции "Космонавтика XXI века", организованной Центральным научно-исследовательским институтом машиностроения, 2021 г.;

2) Всероссийской конференции "Математическое моделирование в естественных науках", организованной Пермским национальным исследовательским политехническим университетом и Институтом механики сплошных сред УрО РАН, 2023 г.;

3) Московском ежемесячном семинаре молодых ученых и студентов (МЕСМУС) по проблемам машиноведения имени Ю.Н. Роботнова № 188, организованном Институтом машиноведения им. А.А. Благодирова РАН, 2024 г.;

4) Семинаре кафедры механики композитов механико-математического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, 2024 г.;

5) Научно-техническом совете отдела "Прочность, живучесть и безопасность машин" Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2024 г.

Публикации. По основным результатам диссертационной работы опубликовано 3 работы, из них 3 статьи – в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (Перечень ВАК), и 1 из которых – в издании, индексируемом в базе Scopus.

Личный вклад соискателя. Все исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, получены лично соискателем в процессе научной деятельности. Заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 126 страниц, в том числе 109 страниц основного текста, содержит 55 рисунков, 10 таблиц и 2 приложения. Список использованных источников включает в себя 153 наименования на 15 страницах. Объем приложения составляет 2 страницы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена литературному обзору российских и зарубежных источников, посвященных исследованию процессов деформирования и разрушения полимерных композиционных материалов. Также рассмотрены публикации, затрагивающие конечно-элементное моделирование таких процессов, работы по классической и модифицированной теории пластин и оболочек. Особое внимание уделяется различным методам проведения испытаний в целях определения механических и прочностных характеристик.

Отмечается вклад в механику деформирования, статическую и циклическую прочность полимерных композиционных материалов, который внесли следующие отечественные и зарубежные авторы: Амбарцумян С.А., Аннин Б.Д., Ашкенази Е.К., Болотин В.В., Васильев В.В., Вильдеман В.Э., Горбачев В.И., Григолюк Э.И., Димитриенко Ю.И., Лехницкий С.Г., Малмейстер А.К., Матвиенко Ю.Г., Победря Б.Е., Полилов А.Н., Рабинович А.Л., Работнов Ю.Н., Скудра А.М., Сухинин С.Н., Тарнопольский Ю.М., Azzi V., Carera E., Christensen R., Hashin Z., Hoffman O., Puck A., Tsai S., Wu C. и многие другие.

Вторая глава посвящена численным расчетам, позволяющим описать процессы деформирования и провести оценку прочности ПКМ при статическом нагружении.

Рассмотрен частный случай анизотропии – ортотропия. Показано, что толщина одного слоя ПКМ мала по сравнению с двумя другими его размерами. Поэтому в нем реализуется плоское напряженное состояние. В таком случае выражения связи напряжения с деформацией принимают вид:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{12}}{E_1} & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Показано, что в рамках расчёта напряжённо-деформированного состояния полимерных композиционных материалов методом конечных элементов приоритетным является структурный подход, предполагающий исследование прочности каждого слоя в отдельности, а не пакета в целом.

Отмечается, что для оценки прочности ПКМ необходимо разделять разрушение армирующего волокна и полимерной матрицы. На двух вариантах разрушения основан критерий Хашина, позволяющий оценить предельное состояние слоя в зависимости от реализуемого механизма разрушения композита. Критерий Хашина представляет собой четыре условия прочности, каждое из которых ассоциируется с характерной формой разрушения слоя композиционного материала: растяжение волокна, сжатие волокна, растяжение матрицы и сжатие матрицы.

Приведены выражения критерия Хашина для каждого из четырех вариантов разрушения:

- Растяжение волокна при $\sigma_{11} \geq 0$:

$$F_f^t = \left(\frac{\sigma_1}{X^T} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\sigma_6}{S^L} \right)^2. \quad (2)$$

- Сжатие волокна при $\sigma_{11} < 0$:

$$F_f^c = \left(\frac{\sigma_1}{X^C} \right)^2. \quad (3)$$

- Растяжение матрицы при $\sigma_{22} \geq 0$:

$$F_m^t = \left(\frac{\sigma_2}{Y^T} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_6}{S^L} \right)^2. \quad (4)$$

- Сжатие матрицы при $\sigma_{22} < 0$:

$$F_m^c = \left(\frac{\sigma_2}{2S^T} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_2}{Y^C} + \left(\frac{\sigma_6}{S^L} \right)^2. \quad (5)$$

Разрушение происходит, если (по крайней мере) один из индикаторов F достигает или превышает критическое значение 1. Таким образом, критерий Хашина учитывает особенности строения ПКМ и может быть применен для оценки прочности сложных конструкций.

Приводится метод идентификации параметров материала и критерия прочности по результатам испытаний однонаправленных образцов, вырезанных под углами 0° , 45° и 90° градусов к оси армирования. По

результатам испытаний образцов в направлениях 0° и 90° , где направления осей образца и выкладки материала совпадают, определяются модули Юнга, коэффициент Пуассона и характеристики, определяющие момент разрушения:

$$E_1 = E_{0^\circ}^+, E_2 = E_{90^\circ}^+, \mu_{12} = \mu_{12}^+, \quad (6)$$

$$X^T = \sigma_{0^\circ}^+, X^C = -\sigma_{0^\circ}^-, Y^T = \sigma_{90^\circ}^+, Y^C = -\sigma_{90^\circ}^-. \quad (7)$$

По результатам испытаний образцов в направлении 45° определяется модуль сдвига в плоскости армирования

$$G_{12} = \left(\frac{4\varepsilon_{xx}}{\sigma_{xx}} - \frac{1 - \mu_{12}}{E_1} + \frac{1 - \mu_{21}}{E_2} \right)^{-1} \quad (8)$$

и параметры S^L и S^T при выполнении условия

$$\sigma_{45^\circ}^- < 2S^L, \quad S^L = \frac{\sigma_{45^\circ}^+}{\sqrt{4 - \left(\frac{\sigma_{45^\circ}^+}{Y^T} \right)^2}}, \quad S^T = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{(\sigma_{45^\circ}^-)^2 - 2Y^C \sigma_{45^\circ}^-}{1 - \frac{\sigma_{45^\circ}^-}{2Y^C} - \left(\frac{\sigma_{45^\circ}^-}{2S^L} \right)^2}}. \quad (9)$$

При невыполнении условия:

$$S^L = \frac{\sigma_{45^\circ}^-}{\sqrt{4 - \left(\frac{\sigma_{45^\circ}^-}{Y^C} \right)^2}}, \quad S^T = \frac{1}{2} Y^C. \quad (10)$$

Проведена оценка жесткостных и прочностных характеристик пакета ПКМ с произвольной схемой армирования. Приведены уравнения преобразования напряжений и деформаций из координат материала в координаты образца:

$$[\sigma] = [T_\sigma][\bar{\sigma}]; \quad (11)$$

$$[\varepsilon] = [T_\varepsilon][\bar{\varepsilon}], \quad (12)$$

где $[T_\sigma]$ и $[T_\varepsilon]$ – матрицы преобразования напряжений и деформаций в координаты образца.

Отмечается связь матриц преобразования:

$$[T_\sigma]^{-1} = [T_\varepsilon]^T; \quad (13)$$

$$[T_\varepsilon]^{-1} = [T_\sigma]^T. \quad (14)$$

Выводится уравнение матрицы жесткости пакета ПКМ произвольной схемы армирования:

$$[K] = \sum_{n=1}^k [K^n] \bar{h}^n, \quad (15)$$

где $[K^n]$ – матрица жесткости n-ого слоя в координатах образца, $\bar{h}$ – толщина монослоя.

Показано, что при определении жесткостных характеристик пакета ПКМ порядок чередования слоев в этом пакете не имеет никакого значения, а пакет ПКМ, состоящий из слоев одинаковой жесткости, можно рассматривать как один слой суммарной толщины, входящих в него слоев.

Третья глава посвящена процессам деформирования и оценке прочности ПКМ при статическом нагружении.

Рассматривается случай нагружения однонаправленных образцов из углепластика в направлениях 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° и 90° к оси армирования, результаты экспериментов приведены в работе Jen M.–H.R., Lee C.H. По приведенному во второй главе методу идентификации определяются упругие характеристики углепластика.

Таблица 1 – Упругие характеристики углепластика.

E_1 , МПа	E_2 , МПа	G_{12} , МПа	μ_{12}
140 350	9 440	4 900	0,253

Приводится сравнение жесткостных характеристик однонаправленного пакета ПКМ в зависимости от направления нагружения. На рисунках 1 и 2 пунктирная линия – расчет, кружочки – эксперимент.

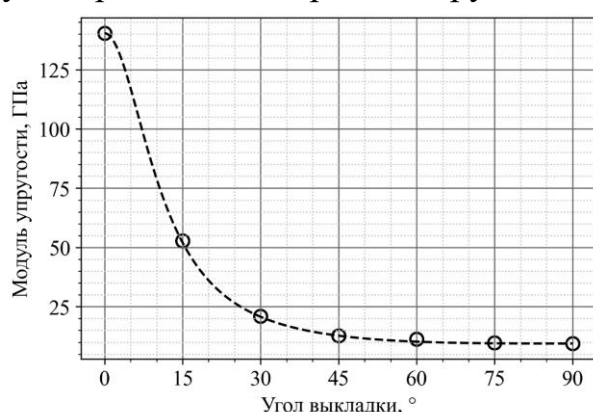


Рисунок 1 – Диаграмма зависимости модуля упругости от направления нагружения

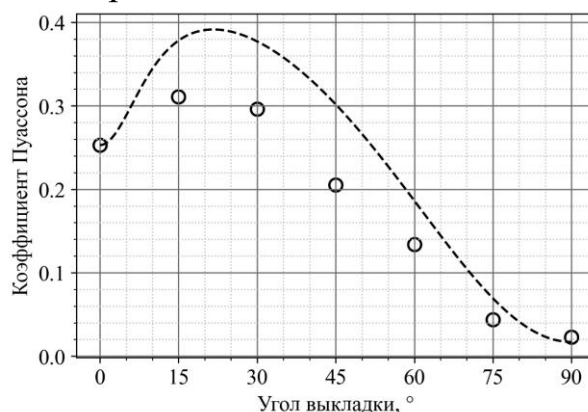


Рисунок 2 – Диаграмма зависимости коэффициента Пуассона от направления нагружения

По приведенному во второй главе методу идентификации определяются прочностные характеристики однонаправленного пакета ПКМ.

Таблица 2 – Прочностные характеристики однонаправленного пакета.

X^T , МПа	X^C , МПа	Y^T , МПа	Y^C , МПа	S^L , МПа	S^T , МПа	α
2 128	954,6	93	205,9	258,6	177,7	1,22

Представлены диаграммы зависимости предельных напряжений от направления нагружения пакета ПКМ.

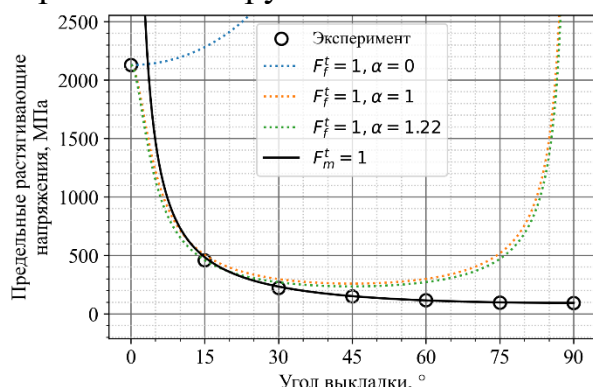


Рисунок 3 – Диаграмма зависимости предельных растягивающих напряжений от направления нагружения

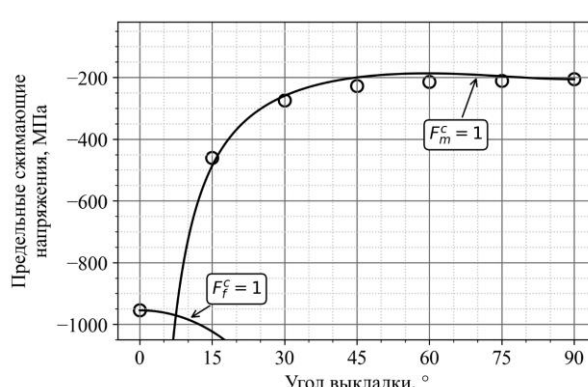


Рисунок 4 – Диаграмма зависимости предельных сжимающих напряжений от направления нагружения

Отмечается, что экспериментальные и расчетные данные хорошо согласуются, однако, разрушение образцов с направлением нагружения отличным от 0 градусов происходит по критерию разрушения матрицы, в связи с чем определение коэффициента, отвечающего за вклад сдвиговых напряжений, $0 \leq \alpha \leq 1$ по данному набору экспериментальных данных не представляется возможным. Определение коэффициента α возможно при направлениях нагружения в диапазоне $0^\circ < \varphi \leq 5^\circ$.

Для определения параметров материала лучше всего подходит симметричная схема армирования. Тогда матрица жесткости симметричного пакета слоистого ПКМ определяется следующим образом:

$$[K] = \frac{1}{2} ([K^{(+\varphi)}] + [K^{(-\varphi)}]), \quad (16)$$

где φ – угол, $K^{(+\varphi)}$ и $K^{(-\varphi)}$ матрицы жесткостей слоя в координатах пакета.

Рассматривается случай одноосного растяжения или сжатия (при $\sigma_{yy} = \sigma_{xy} = 0$) образца многослойного ПКМ. Тогда жесткость образца определяется из соотношения:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & 0 \\ \Phi_{12} & \Phi_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \Phi_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_{22}}{K_{11}K_{22} - K_{12}^2} \sigma_{xx} \\ -\frac{K_{12}}{K_{11}K_{22} - K_{12}^2} \sigma_{xx} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

Из полученных соотношений выводятся уравнения зависимости модуля упругости и коэффициента Пуассона пакета от жесткостных характеристик материала:

$$E_{xx} = \frac{1}{\Phi_{11}} = K_{11} - \frac{K_{12}^2}{K_{22}}, \quad \mu_{xy} = \frac{-\Phi_{12}\sigma_{xx}}{\Phi_{11}\sigma_{xx}} = \frac{K_{12}}{K_{22}}, \quad (18)$$

Уравнение (18) зависимости модуля упругости пакета от упругих характеристик материала для образца симметричной выкладки $\pm 45^\circ$ можно записать следующим образом:

$$E_{xx} = 4G_{12} \frac{E_1 + E_2(1 + 2\mu_{12})}{E_1 + E_2(1 + 2\mu_{12}) + 4G_{12}(1 - \mu_{12}\mu_{21})}. \quad (19)$$

Из уравнения (19) выводится модуль сдвига материала:

$$G_{12} = \frac{E_{xx}(E_1 + E_2(1 + 2\mu_{12}))}{4(E_1 + E_2(1 + 2\mu_{12}) - E_{xx}(1 - \mu_{12}\mu_{21}))}. \quad (20)$$

Ниже приводится сравнение расчета и результатов экспериментальных исследований, приведенных в работе Snell M.B.

Таблица 3 – Упругие характеристики углепластика

E_1 , МПа	E_2 , МПа	G_{12} , МПа	μ_{12}
153 400	8 300	5 000	0.8

На рисунке 5 представлена зависимость модуля упругости симметричного пакета, определенного экспериментально, от угла выкладки в сравнении с данными, полученными расчетным путем.

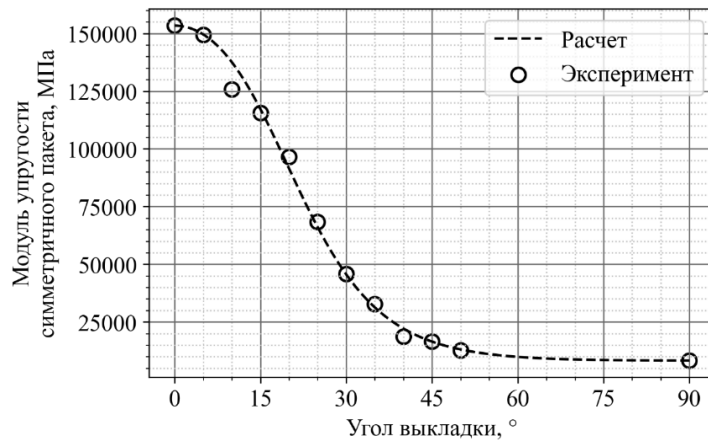


Рисунок 5 – Зависимость модуля упругости пакета от угла выкладки

Параметры критерия прочности X^T , X^C , Y^T и Y^C определяются по результатам испытаний однонаправленных ПКМ под углами 0 и 90 следующим образом:

$$X^T = \sigma_{0^\circ}^t, X^C = |\sigma_{0^\circ}^c|, Y^T = \sigma_{90^\circ}^t, Y^C = |\sigma_{90^\circ}^c|, \quad (21)$$

где $\sigma_{0^\circ}^t$ и $\sigma_{0^\circ}^c$ – предельные напряжения материала при растяжении и сжатии в направлении армирования соответственно, $\sigma_{90^\circ}^t$ и $\sigma_{90^\circ}^c$ – предельные напряжения материала при растяжении и сжатии в направлении поперек армирования соответственно.

Параметры S^L , S^T и α определяются по результатам испытаний образцов с симметричной выкладкой.

$$S^L = \frac{Y^T \sigma_{xx}^t T_{12}}{\sqrt{(Y^T)^2 - (\sigma_{xx}^t T_{22})^2}}, \quad (22)$$

где σ_{xx}^t – предельное напряжение растяжения пакета.

$$S^T = \frac{1}{2} \sqrt{T_{22} \frac{T_{22} \sigma_{xx}^c + Y^C}{\frac{T_{22}}{Y^C} - \left(\frac{T_{12}}{S^L}\right)^2 \sigma_{xx}^c + \frac{1}{\sigma_{xx}^c}}}, \quad (23)$$

где σ_{xx}^c – предельное напряжение сжатия пакета.

$$\alpha = 4 \left(\frac{S^L}{\sigma_{xx}^t} \right)^2 \left[1 - \left(\sigma_{xx}^t \frac{T_{11}}{X^T} \right)^2 \right]. \quad (24)$$

Параметр α может быть определен по результатам испытаний образцов при углах 25° и 30°. При углах $\varphi < 25^\circ$ его значение превышает 1, а при углах $\varphi > 30^\circ$ разрушение пакета происходит по критерию разрушения матрицы материала. Параметры S^L и S^T определены при углах 45° и 60° соответственно.

Таблица 4 – Параметры критерия прочности Хашина

X^T , МПа	X^C , МПа	Y^T , МПа	Y^C , МПа	S^L , МПа	S^T , МПа	α_{30°	α_{25°
1 017	605	28,6	152	55,9	22,9	0,47	0,74

На рисунке 6 представлена диаграмма зависимости предельных растягивающих напряжений от углов выкладки углепластика. На графике

черными кружками отмечены экспериментальные данные, черными линиями – предельные напряжения матрицы, пунктирными линиями – предельные напряжения волокна, определенные при различных значениях параметра α .

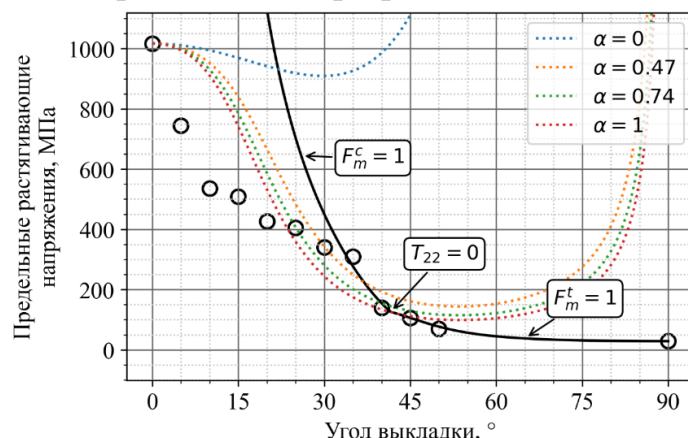


Рисунок 6 – Диаграмма зависимости предельных растягивающих напряжений от углов выкладки углепластика

Разрушение образцов симметричного пакета описывается с удовлетворительной точностью при углах $\varphi \geq 35^\circ$. При этих угла разрушение происходит по критерию прочности матрицы. Однако, качественно описать результаты испытаний при углах $5^\circ \leq \varphi \leq 30^\circ$ не представляется возможным. На кривой индикатора прочности матрицы отмечен характерный угол выкладки, при котором $T_{22} = 0$. При растяжении образцов с углами выкладки меньше 41.6° матрица находится в сжатом состоянии, при углах больше – в растянутом.

На рисунке 7 представлена диаграмма зависимости предельных сжимающих напряжений от углов выкладки углепластика. Черными кружками отмечены экспериментальные данные, черными линиями – предельные напряжения матрицы и волокна. Также как и при растяжении на кривой индикатора прочности матрицы отмечен характерный угол выкладки, при котором $T_{22} = 0$. При сжатии образцов с углами выкладки меньше 41.6° матрица находится в растянутом состоянии, при углах больше – в сжатом.

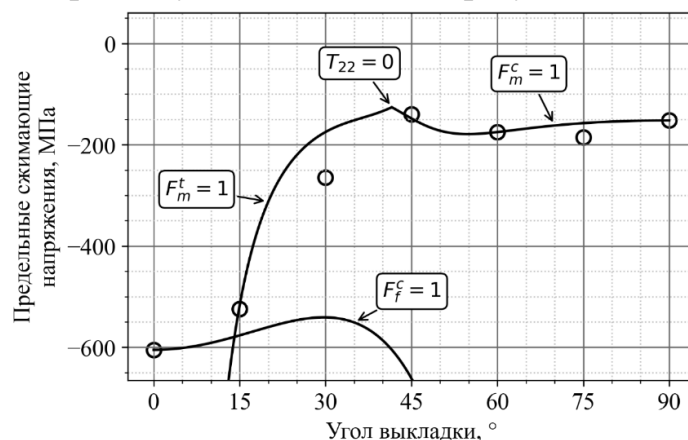


Рисунок 7 – Диаграмма зависимости предельных сжимающих напряжений от углов выкладки углепластика

Представим результаты экспериментальных исследований в виде зависимости, характеризующей влияние сдвиговых напряжений на прочность волокна:

$$f(\sigma_6) = \alpha \left(\frac{\sigma_6}{S_L} \right)^2. \quad (25)$$

Однако, эта функция недостаточно точно описывает результаты эксперимента, которые могут быть аппроксимированы с удовлетворительной точностью функцией вида:

$$f(\sigma_6) = \alpha \left[\left(\frac{\sigma_6}{S_L} \right)^2 \right]^{n_\alpha}, \quad (26)$$

где n_α – параметр материала.

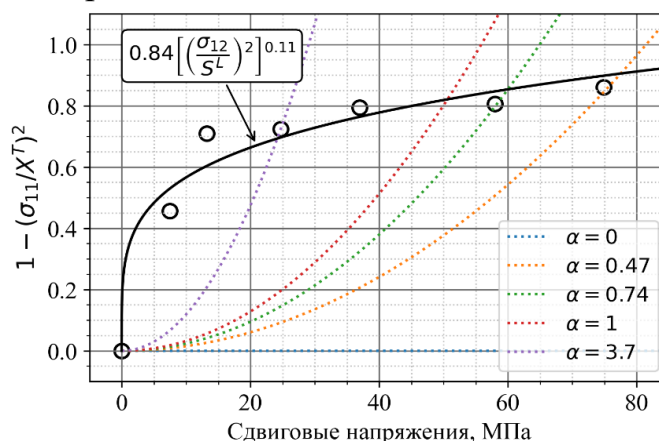


Рисунок 8 – Диаграмма зависимости сдвиговых напряжений от прочности волокна

Таким образом критерий прочности волокна при растяжении принимает вид:

$$F_f^t = \left(\frac{\sigma_1}{X^T} \right)^2 + 0.84 \left(\left(\frac{\sigma_6}{S^L} \right)^2 \right)^{0.11}. \quad (27)$$

На рисунке 9 представлена диаграмма зависимости предельных растягивающих напряжений от углов выкладки углепластика с аппроксимацией по уточненному критерию прочности.

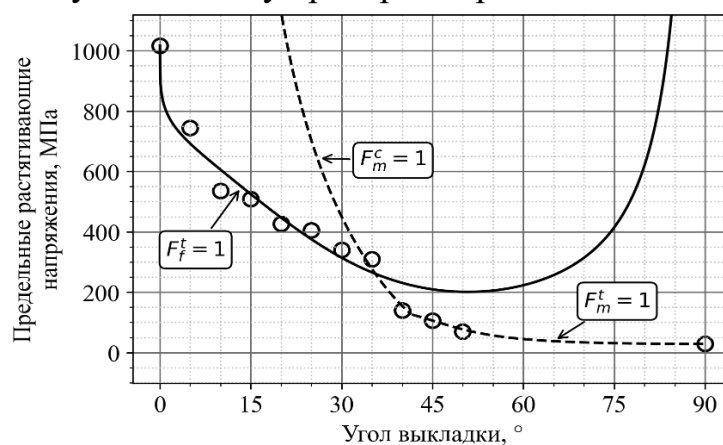


Рисунок 9 – Диаграмма зависимости предельных растягивающих напряжений от углов выкладки углепластика

Таблица 5 – Параметры уточненного критерия прочности.

X^T , МПа	X^C , МПа	Y^T , МПа	Y^C , МПа	S^L , МПа	S^T , МПа	α	n_α
1 017	605	28.6	152	55.9	22.9	0.84	0.11

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований, полученные лично автором. Были проведены испытания образцов ПКМ однонаправленных образцов, вырезанных под углом 0° , 90° и 45° к направлению армирования, и образцов с квазиизотропной выкладкой на растяжение, сжатие, изгиб и сдвиг.

По результатам представленных экспериментов были определены и представлены в таблице 6 параметры материала и критерия прочности.

Таблица 6 – Параметры материала и критерия прочности.

Материал		Критерий прочности	
Параметр	Значение	Параметр	Значение
E_1 , ГПа	141,9	X^T , МПа	1700
E_2 , ГПа	8,6	X^C , МПа	1050
μ_{12}	0,35	Y^T , МПа	55
G_{12} , ГПа	5,8	Y^C , МПа	210
		S^L , МПа	170
		S^T , МПа	110

Верификация проводилась в программно-расчетном комплексе, создавались конечно-элементные модели образцов. Образцы состояли из оболочечных элементов, сечение которых представляло собой набор из 16 слоев, толщиной 0,125 мм каждый с различным направлением выкладки. На рисунке 10 отмечены моменты достижения индикаторами прочности своих критических значений. Красный и зеленый крестики – волокно при растяжении и сжатии, зеленый треугольник – матрица при сжатии.

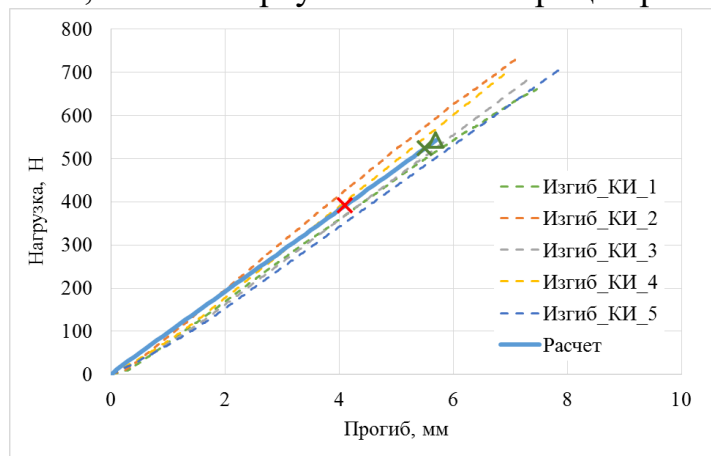


Рисунок 10 – Диаграммы зависимости "нагрузка-прогиб" при изгибе ПКМ с квазиизотропной выкладкой

Проведенная верификация параметров материала, критерия прочности и метода идентификации параметров монослоя путем сравнения расчетных и экспериментальных диаграмм нагружения образцов с квазиизотропной выкладкой при изгибе показала хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных.

Четвертая глава посвящена разработке критерия прочности ПКМ при циклическом нагружении.

Представлен анализ результатов циклических испытаний однонаправленных углепластиков из статьи Jen M.–H.R., Lee C.H., в которой приведены результаты экспериментальных исследований при циклическом нагружении однонаправленных образцов, армированных в направлениях 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° и 90° , при коэффициентах асимметрии r_{xx} 0; 0,2; 5, $-\infty$. Под коэффициентом асимметрии r_{xx} принимается отношение минимального значения номинального напряжения образца при растяжении или сжатии к его максимальному значению. По результатам анализа сделан вывод о целесообразности использования зависимости $N_f = f(F_{max})$ в качестве кривой усталости.

Для описания кривых усталости использовалось двухпараметрическое аналитическое уравнение:

$$\log_{10}(N_f) = C - mF_{max}, \quad (28)$$

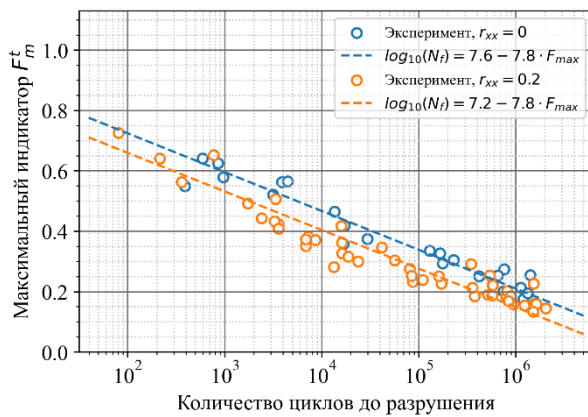


Рисунок 11 – Сравнение кривых усталости при $r_{xx} = 0$ и $r_{xx} = 0,2$

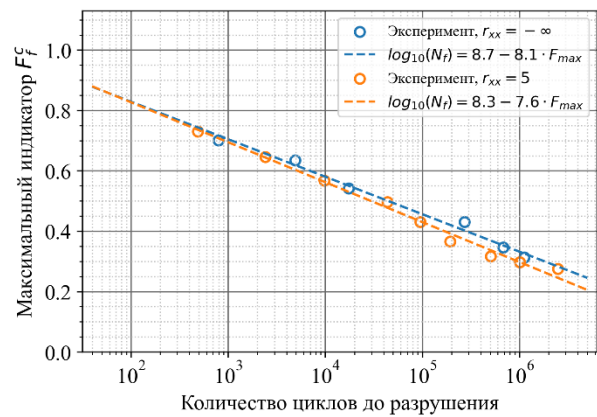


Рисунок 12 – Сравнение кривых усталости при $r_{xx} = -\infty$ и $r_{xx} = 5$

Для учета асимметрии цикла вводится понятие коэффициента асимметрии цикла R для индикаторов разрушения F :

$$R = \sqrt{\frac{F_{min}}{F_{max}}} \quad (29)$$

где $R \in [R_f^t, R_f^c, R_m^t, R_m^c]$ – коэффициент асимметрии цикла, $F_{min} \in [F_{f_{min}}^t, F_{f_{min}}^c, F_{m_{min}}^t, F_{m_{min}}^c]$ и $F_{max} \in [F_{f_{max}}^t, F_{f_{max}}^c, F_{m_{max}}^t, F_{m_{max}}^c]$ – соответствующие минимальное и максимальное значения индикатора прочности в цикле.

На рисунке 13 приведены точки, связывающие значение максимального индикатора прочности с коэффициентом асимметрии для 10^3 , 10^4 , 10^5 и 10^6 циклов до разрушения.

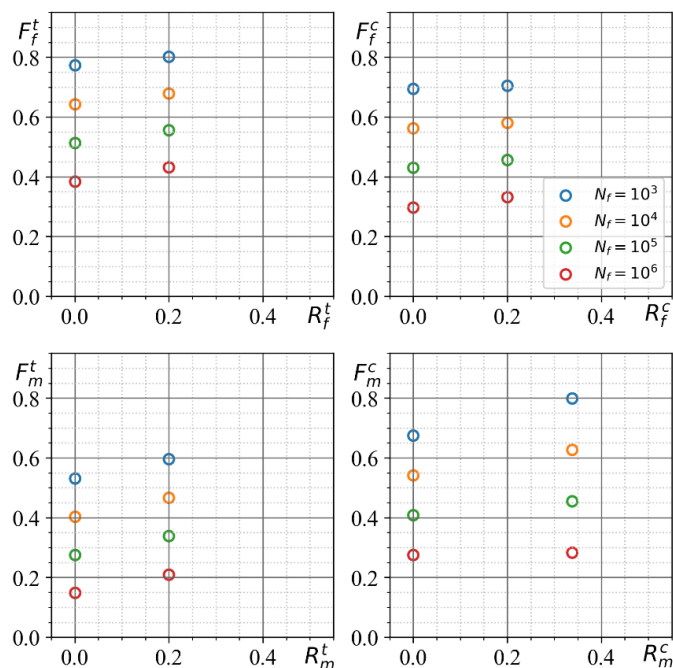


Рисунок 13 – Диаграммы зависимости F от R

Диапазон значений между точками, связывающими значение максимального индикатора прочности с коэффициентом асимметрии для 10^3 , 10^4 , 10^5 и 10^6 циклов до разрушения, от $R^{(1)}$ до $R^{(2)}$ определяется по методу линейной интерполяции. Тогда:

$$F_{max} = \frac{F_{max}^{(2)} - F_{max}^{(1)}}{R^{(2)} - R^{(1)}} (R - R^{(1)}) + F_{max}^{(1)}, \quad (30)$$

где $F_{max}^{(1)}$, $F_{max}^{(2)}$ – диапазон значений индикатора прочности, $R^{(1)}$, $R^{(2)}$ – диапазон значений коэффициента асимметрии.

Для экстраполяции в правую область диаграммы 13 можно предположить, что при статическом нагружении $R = 1$ момент разрушения определяется достижением $F = 1$ не зависимо от требуемого числа циклов до разрушения. Тогда уравнение (30) принимает вид:

$$F_{max} = \frac{1 - F_{max}^{(1)}}{1 - R^{(1)}} (R - R^{(1)}) + F_{max}^{(1)}. \quad (31)$$

На рисунке 14 представлена экстраполяция результатов испытаний в область статического нагружения $R = 1$ следующим уравнением:

$$\log_{10}(N_f) = m^{(1)}(F_{max} + 1) \frac{R^{(1)} - 1}{R - 1} + C^{(1)}. \quad (32)$$

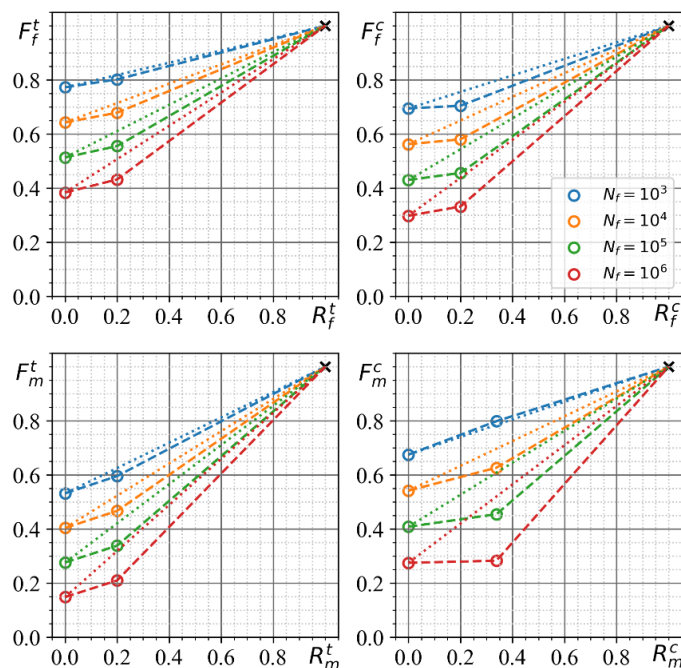


Рисунок 14 – Диаграммы зависимости F от R

Видно, что экспериментальные точки отличаются от прогнозируемых в диапазоне $0 \leq R \leq 1$. Таким образом для повышения точности оценки ресурса ПКМ, необходимо экспериментальное определение кривых усталости в диапазоне коэффициентов асимметрии соответствующему условиям его эксплуатации. В этом диапазоне также необходимо определение функций параметров $C = f(R)$, $m = f(R)$.

Для знакопеременных циклов нагружения можно предположить, что механизм разрушения определяется наибольшим значением индикатора прочности (растяжение или сжатие) для волокна и матрицы материала. Тогда, необходимо определить связь максимальных напряжений цикла с коэффициентом асимметрии. При этом, значение коэффициентов асимметрии следует определять следующим образом:

- 1) Механизм разрушения при растяжении ($F_{max}^c > 0, F_{max}^t > 0, F_{max}^t > F_{max}^c$):

$$R^t = -\sqrt{\frac{F_{max}^c}{F_{max}^t}}; \quad (33)$$

- 2) Механизм разрушения при сжатии ($F_{max}^c > 0, F_{max}^t > 0, F_{max}^t < F_{max}^c$):

$$R^c = -\sqrt{\frac{F_{max}^t}{F_{max}^c}}. \quad (34)$$

Значения числа циклов до разрушения при знакопеременном могут быть найдены, путем экстраполяции прямой определяемой, двумя наименьшими значениями коэффициентов асимметрии. Тогда уравнение (30), полученное путем подстановки $R = -1$, принимает следующий вид:

$$\log_{10}(N_f) = \frac{\left[\frac{m^{(1)}}{m^{(2)}} C^{(2)} - C^{(1)} \right] \frac{-1 - R^{(1)}}{R^{(2)} - R^{(1)}} + C^{(1)} - m^{(1)} F_{max}}{\left[\left(\frac{m^{(1)}}{m^{(2)}} - 1 \right) \frac{-1 - R^{(1)}}{R^{(2)} - R^{(1)}} - 1 \right]}. \quad (35)$$

Учитывая тот факт, что эти значения должны быть равны, можно найти параметры кривой усталости, соответствующей симметричному циклу нагружения и являющейся средней между двумя кривыми, определёнными методом экстраполяции. Также стоит отметить, что в индикаторах прочности F симметричный цикл будет отличаться от симметричного цикла по напряжениям σ , как и для остальных знакопеременных циклов нагружения.

Определим среднее значение индикатора прочности $F_{max(-1)}$ при симметричном цикле нагружения:

$$F_{max(-1)} = \frac{F_{max(-1)}^t + F_{max(-1)}^c}{2}; \quad (36)$$

$$F_{max(-1)} = 0.5 \left[\frac{C_{(-1)}^t - \log_{10}(N_f)}{m_{(-1)}^t} + \frac{C_{(-1)}^c - \log_{10}(N_f)}{m_{(-1)}^c} \right]. \quad (37)$$

На рисунке 15 представлена экстраполяция результатов испытаний в область симметричного цикла нагружения при $R = -1$ уравнением (37).

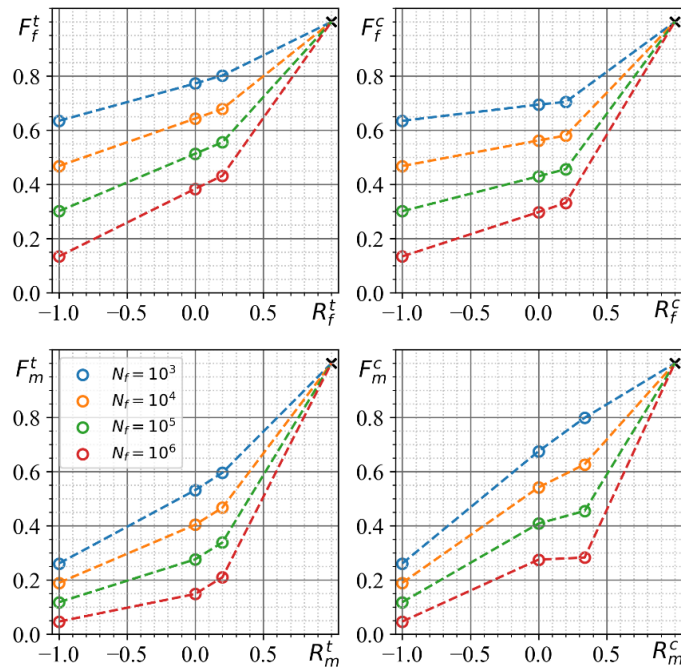


Рисунок 15 – Диаграммы зависимости F от R

Таким образом разработанный критерий циклической прочности позволяет прогнозировать число циклов до разрушения слоев ПКМ при произвольном пропорциональном режиме нагружения. Оценку прочности пакета ПКМ можно проводить путем исключения слоев при достижении разрушающего числа циклов, пересчете напряжений и значений индикаторов прочности F с использованием известных законов суммирования повреждений. Такой подход позволяет учитывать влияние сдвиговых напряжений на циклическую прочность слоев ПКМ без необходимости

проведения испытаний образцов в направлениях отличных от 0° и 90° . Однако, рекомендуется определять параметры кривых усталости в диапазоне коэффициентов асимметрии близких к эксплуатационным для каждой конкретной конструкции.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по работе:

1. Предложен метод оценки прочности полимерных композиционных материалов, объединяющий в себя структурный подход к оценке напряженно-деформированного состояния, закон упругого деформирования ортотропного материала и критерий прочности Хашина.

2. Разработан критерий циклической прочности полимерных композиционных материалов, позволяющий проводить оценку ресурса материала при циклическом нагружении по результатам экспериментов при заданных коэффициентах асимметрии.

3. Предложено уточнение критерия статической прочности Хашина, позволяющее более чем на 20 % повысить точность оценки момента разрушения волокна при растяжении при наличии сдвиговых напряжений.

4. Разработанные критерии статической и циклической прочности прошли проверку на ряде экспериментальных исследований, включающих испытания на растяжение и сжатие однонаправленных образцов и образцов с симметричной схемой армирования.

5. Сопоставление результатов экспериментов с результатами численных расчетов подтверждает применимость предложенного подхода для оценки прочности конструкций, изготовленных из полимерных композиционных материалов.

В приложении А представлен акт о внедрении результатов диссертационной работы в рабочий процесс Центра прикладных исследований АО "ЦНИИмаш" при проведении прочностных расчетов композитных конструкций.

В приложении Б представлен акт о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс Московского политехнического университета при обучении аспирантов по направлению подготовки 1.1.8 Механика деформируемого твердого тела.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Абашев Д.Р., Бондарь В.С., Воробьев И.А., Шарова В.И. Определение упругих параметров полимерных композиционных материалов и изготовленных из них цилиндрических оболочек // Проблемы прочности и пластичности, № 1, 2024 – 47-59 с.
2. Бондарь В.С., Абашев Д.Р., Воробьев И.А. Применение критерия прочности Хашина для оценки прочности композиционных материалов симметричной схемы армирования. Машиностроение и инженерное образование. №3, 2024 – 12-19 с.
3. Владимиров С.А., Воробьев И.А., Шарова В.И. Метод определения упругих параметров полимерных композиционных материалов и оценка их прочности // Космонавтика и ракетостроение, №1, 2024 – 68-75 с.