

Научная статья
УДК 620.178.352

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=182660>

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ СЛОИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Анна Дмитриевна Богомолова^{1*}, Денис Сергеевич Пальчиков²

^{1,2}ФАУ Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова,
Москва, Россия

¹adbogomolova@ciam.ru*

²dspalchikov@ciam.ru

Аннотация. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию роста повреждений в полимерном композиционном материале (ПКМ) в условиях циклического нагружения (сжатия). Рассмотрены 4 категории повреждений и различные механизмы разрушения, которые следуют поочередно. Сначала на первом этапе происходит растрескивание матрицы внутри всех слоёв от действия растяжения по границе раздела матрица-волокно. На втором этапе происходит расслаивание композита на отдельные слои под действием межслоевого сдвига. При достижении максимума нагрузки начинают рваться волокна. На четвертом этапе происходит разрушение образца. Циклическими испытаниями образцов из ПКМ с повреждениями получены зависимости размера повреждения и остаточной прочности от количества циклов нагружения. Показано применение методов

неразрушающего контроля (ультразвуковая дефектоскопия) для измерения размеров повреждений в ПКМ. Результаты данных исследований использовались для формирования подхода к оценке допустимого уровня повреждений для деталей из ПКМ. Предлагаемый подход основан на анализе изменения остаточной прочности углепластика с повреждением в зависимости от количества циклов нагружения. Также изучено влияние влаги на прочность ПКМ с повреждением и произведено сравнение результатов и определена скорость роста повреждений внутри материала.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал (ПКМ), прочность, повреждения, циклические испытания на сжатие

Для цитирования: Богомолова А.Д., Пальчиков Д.С. Исследование усталостной прочности слоистых полимерных композиционных материалов с учетом повреждений // Труды МАИ. 2024. № 138. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=182660>

Original article

STUDY OF THE FATIGUE STRENGTH OF LAYERED POLYMER COMPOSITE MATERIALS TAKING INTO ACCOUNT DAMAGE

Anna D. Bogomolova^{1*}, Denis S. Palchikov²

^{1,2} Central Institute of Aviation Motors,
Moscow, Russia

¹adbogomolova@ciam.ru*

²dspalchikov@ciam.ru

Abstract. The presented article deals with the experimental study of damage growth in a polymer composite material (PCM) under cyclic loading (compression). The authors considered four damage categories and various failure mechanisms that follow alternatively. Initially, at the first stage, the matrix cracks inside all layers due to the tension along the matrix-fiber interface. At the second stage, the composite delaminates into separate layers under the action of interlayer shear. When the maximum load is reached, the fibers begin to break. At the fourth stage, the sample is destroyed. Cyclic tests of damaged PCM samples were employed to obtain the dependences of the damage size and residual strength on the number of loading cycles. Application of non-destructive testing methods (ultrasonic flaw detection) for measuring the damage size in PCM is demonstrated. The results of the said studies were employed to develop an approach to assessing the permissible damage level for the PCM parts. The proposed approach is based on the analysis of changes in the residual strength of the damaged carbon fiber reinforced plastic depending on the number of loading cycles. The effect of moisture on the strength of damaged PCM was studied as well, comparison of the results was performed, and the rate of damage growth inside the material was determined.

Keywords: polymer composite material (PCM), strength, damage, cyclic compression tests

For citation: Bogomolova A.D., Palchikov D.S. Study of the fatigut strenght of layered polymer composite materials taking into account damage. *Trudy MAI*, 2024, no. 138. URL:

<https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=182660>

Введение

Одним из недостатков ПКМ применительно к деталям авиационных двигателей (АД) является относительно низкая ударостойкость. В случае ПКМ под низкой ударостойкостью, в первую очередь, понимается существенное снижение прочности вследствие ударного повреждения. Так как основным фактором, непосредственно влияющим на остаточную прочность ПКМ, является размер внутреннего повреждения, то для обеспечения надежной эксплуатации детали возникает необходимость в оценке его допустимого уровня (размера). Стоит заметить, что допустимый уровень повреждений должен быть определен для каждой конкретной детали из конкретного ПКМ. В рамках настоящей работы проведены исследования роста повреждений в углепластике при циклическом сжатии, являющиеся основой для осуществления подхода к оценке допустимости повреждений в деталях из ПКМ [1].

1. Объект исследования и методы

1.1. Образцы для испытаний

Объектом исследования являлись образцы углепластика авиационного назначения со схемой армирования $[0; +45; 0; -45]_n$ размерами 150x100x5 мм.

Для данного исследования использовалось 28 образцов: 8 шт. для I этапа, 12 шт. для II этапа и 9 шт. для III этапа.

1.2. Нанесение повреждений на образцы

В данной работе в качестве метода нанесения повреждений на образцы был выбран метод квазистатического продавливания (QSI) [2], поскольку он может

использоваться как имитация реальных процессов, вызывающих повреждения изделий в эксплуатации (см. Рисунок 1).

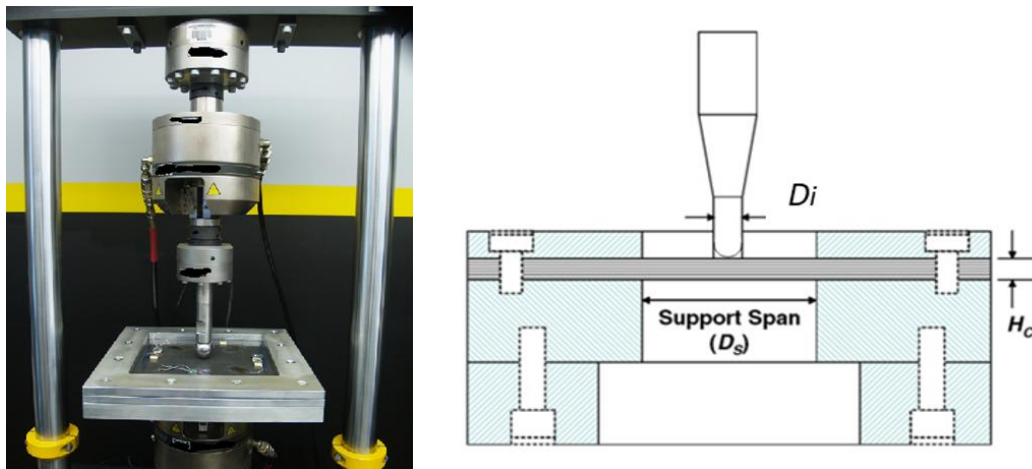


Рисунок 1 – Нанесение повреждений на образцы методом QSI

2. I этап исследования. Статические испытания

2.1. Образцы для испытаний

На I этапе исследования на 8 образцов попарно были нанесены повреждения, которые сгруппированы по «признаку визуального обнаружения» в соответствии с классификацией FAA¹ [3]: на образцы №7,8 – 1 категория повреждения, №5,6 – 2 категория, №3,4 – 3 категория, №1,2 – 4 категория (см. Рисунок 2).

¹ U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, AC No: 20-107B, p.13. 2010

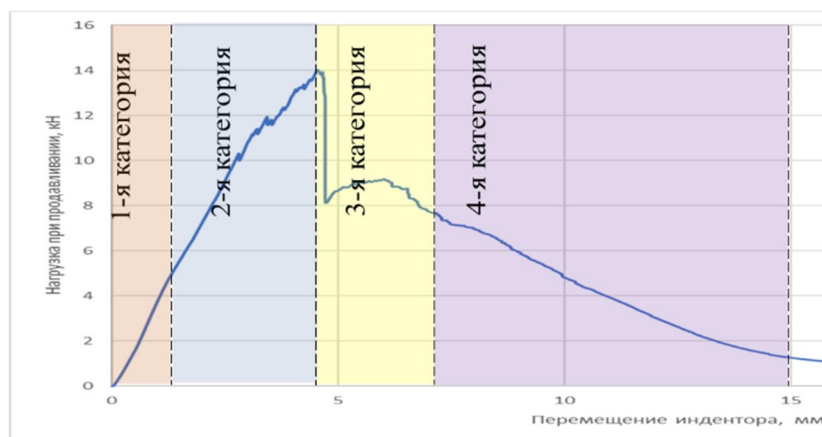
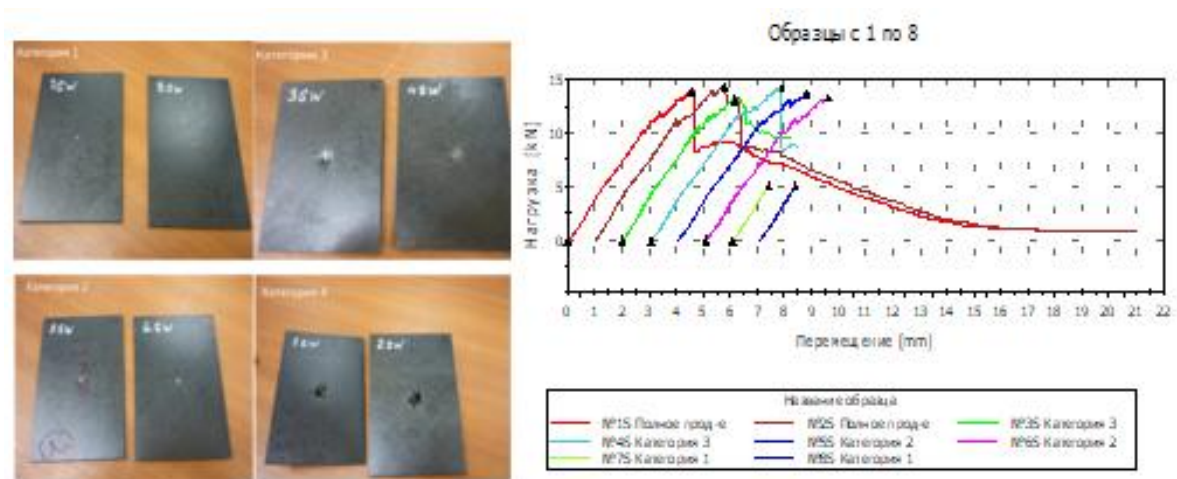


Рисунок 2 – Образцы после нанесения повреждений и кривая продавливания

Согласно FAA, классификация повреждений очень условна и основывается на визуальном обнаружении:

Повреждение категории 1 – не обнаруживаемые визуально повреждения и дефекты (BVID), которые могут остаться незамеченными при плановом осмотре. К данной категории повреждений также относят и скрытые технологические дефекты, такие как внутренние поры.

Повреждения категории 2 - дефекты, обнаруживаемые при плановом осмотре, ударные повреждения различных размеров, обнаруживаемые визуально (VID). К данной категории также относят глубокие выбоины, царапины.

Повреждения категории 3 – повреждения, очевидно обнаруживаемые визуально. Основное отличие от повреждений 2-й категории – большие размеры

Повреждения категории 4 – высокий уровень урона (разрыв винта, удар птицы). Это критический размер повреждения, после которого начинается необратимый процесс роста зоны повреждения, заканчивающийся разрушением [13]

Повреждения категории 5 - серьезные повреждения, вызванные аномальными наземными или полетными событиями, которые не охватываются критериями проектирования.

На этапе проектирования и разработки конструкции необходимо определить критические размеры дефектов, при наличии которых обеспечивается остаточная прочность элемента конструкции [12].

2.2. Статические испытания на сжатие

Все образцы, с нанесёнными на них повреждениями, подвергались испытанию на кратковременную прочность сжатием до разрушения. Для испытания использовалась специализированная оснастка (см. Рисунок 3): конструкция, которая обеспечивает разрушение образца при сжатии в рабочей зоне (в области расположения повреждения).

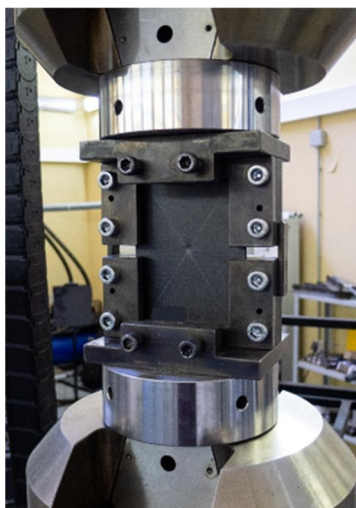


Рисунок 3 – Оснастка для испытаний на сжатие

По результатам статических испытаний получена зависимость остаточной прочности (определена прочность при сжатии после продавливания) при сжатии от энергии нанесения повреждений (см. Рисунок 4), где энергия нанесения повреждения вычислялась интегрированием кривой продавливания (см. Рисунок 2).

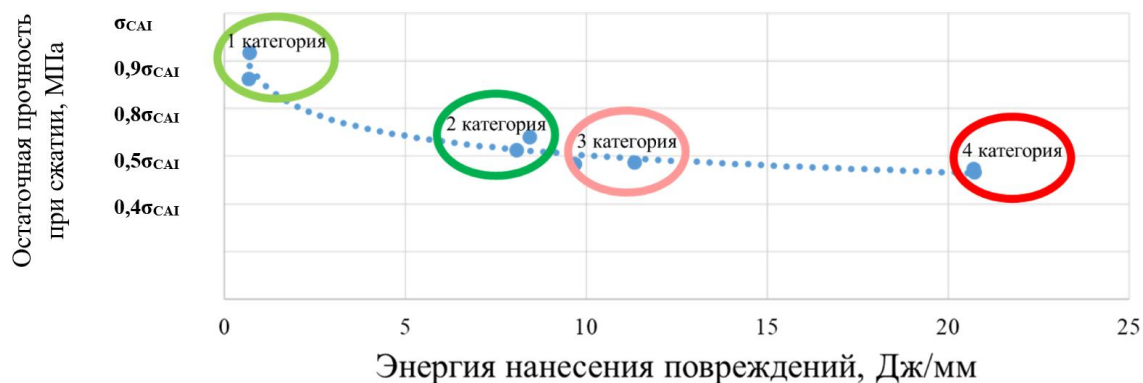


Рисунок 4 – Сопоставление визуальным признакам по FAA с категориями внутренних повреждений (где $\sigma_{САI}$ - напряжение при сжатии после удара)

Повреждения 1-ой категории (внутреннее растрескивание слоёв) соответствует визуальному признаку BVID (Barely Visible Impact Damage). При этом уровне повреждения значение остаточной прочности составило $0,81\sigma_b$. Разрушения 2-ой категории (деламинация материала в зоне разрушения) соответствует визуальному признаку VID (Visible Impact Damage), значение остаточной прочности составило

0,51 σ_b . Образцы 3-ей категории с частично разрушенными волокнами соотносятся с признаками группы LVI (Large Visible Impact Damage), где значение остаточной прочности составило 0,46 σ_b . И 4-ая категория образцов со сквозным разрушением структуры материала, соотносится с группой «обширных повреждений» и значение остаточной прочности при сжатии составляет 0,43 σ_b .

3. II этап исследований. Циклические испытания

Следующий этап работ был проведен на образцах с повреждениями второй категории, поскольку повреждение 2-ой категории является наиболее опасным. При эксплуатации реальных изделий есть вероятность пропустить данный тип повреждений при регулярном визуальном контроле, даже несмотря на то, что оно является видимым. С одной стороны, материал со 2-й категорией повреждений уже имеет значительные области с расслоением, и растрескавшейся матрицей, что создаёт очаги концентрации напряжений в структуре материала, но с другой стороны еще сохраняется целостность несущих волокон. В связи с этим изделие/материал ещё способно воспринимать эксплуатационную нагрузку. Для оценки напряжений, соответствующих безопасной работоспособности изделия/материала с данным типом повреждения проведены циклические испытания поврежденных образцов ПКМ на усталость (сжатие-сжатие).

3.1. Образцы для испытаний

Для испытаний представлено 12 образцов, идентичным по размерам тем, что были использованы на предыдущем этапе работы. На все образцы были нанесены повреждения продавливанием с усилием 10 кН. Что соответствует повреждению 2-й

категории на рисунке 5, где представлены диаграммы нагружения данных образцов при продавливании.

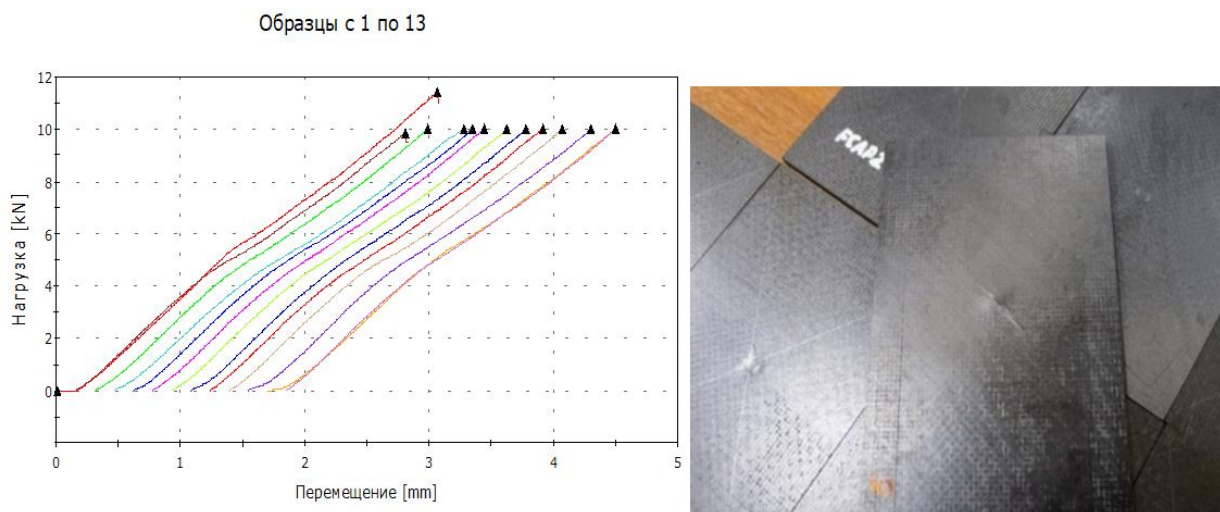


Рисунок 5 - Диаграммы деформирования образцов с повреждениями 2-ой категорией

После нанесения повреждений на образцы необходимо отследить начальный размер внутренних повреждений с помощью методов неразрушающего контроля.

3.2. Неразрушающий контроль

Для изучения закономерности процесса роста повреждений в ходе циклических испытаний требуется проводить периодические измерения размеров внутреннего расслоения. Для этого необходимо выбрать один из методов неразрушающего контроля. В рамках данного исследования выбран способ лазерно-ультразвуковой дефектоскопии, соответствующий ГОСТ Р 56787-2015 [4]. Контроль осуществляется с помощью лазерного дефектоскопа (см. Рисунок 6).

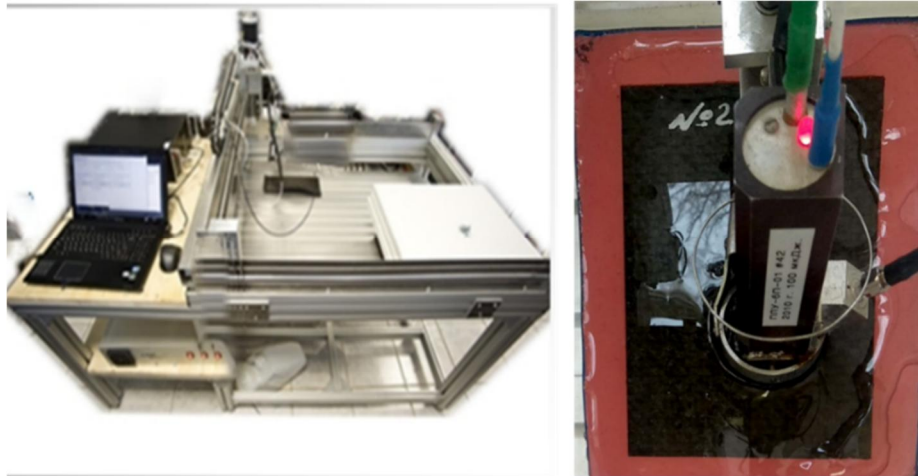


Рисунок 6 – Дефектоскоп и процесс сканирования образцов

Особенность этого метода в отличие от традиционного УЗ заключается в том, что ультразвуковые волны возбуждаются в широком диапазоне частот. Эта особенность позволяет избежать «мёртвых зон», расположенных у поверхности образца. Последующая программная фильтрация отражённого сигнала способствует повышению четкости и контрастности изображения, а также позволяет обнаруживать дефект в структуре материала и измерять его геометрические размеры [5] (см. Рисунок 7).

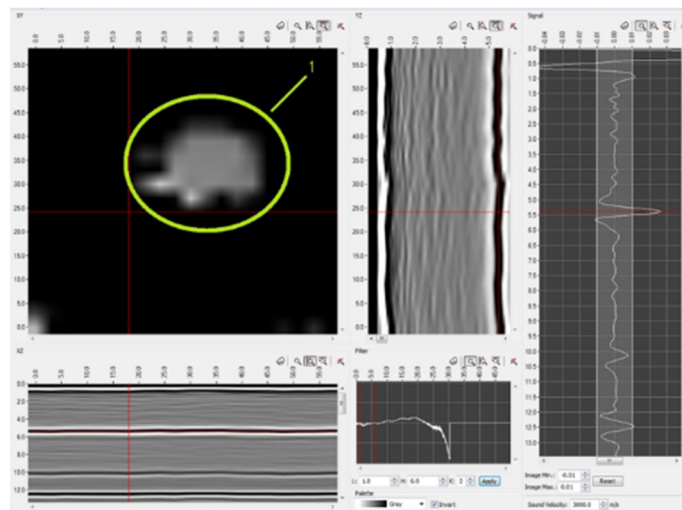


Рисунок 7 - Результаты сканирования образца с нанесенным повреждением. 1 – область удара

От ударной поверхности к основанию область повреждений постепенно расширяется, демонстрируя форму «пирамиды» [11]. Из недостатков существующей реализации данного метода можно отметить его невысокую производительность.

3.3. Циклические испытания на сжатие

В рамках данной работы проводились испытания образцов ПКМ по циклу нагружения «сжатие-сжатие», где контрольным параметром являлся: коэффициент асимметрии $R=0,1$. Определяется отношением минимального напряжения цикла к максимальному (1).

$$R = \frac{S_{\min}}{S_{\max}} \quad (1)$$

Частота испытаний на МЦУ была выбрана таким образом, чтобы температурные изменения [6], вызванные высокой частотой, не влияли на предел выносливости ПКМ и составила 3 Гц. База испытания была принята равной 10^5 циклов.



Рисунок 8 – Вид разрушенного образца во время испытаний

Максимальная нагрузка задавалась в процентах от предела статической остаточной прочности образцов с 2 категорией повреждения. Циклические испытания проводились на уровнях: 0,7; 0,8; 0,85; 0,9 от σ_B .

3.4. Результаты циклических испытаний

8 образцов испытаны при нагрузке выше, чем 80% от уровня их статической прочности и разрушены до прохождения базы 10^5 . Остальные 4 образца прошли базу. По результатам циклических испытаний построена S-N кривая [7] для образцов с повреждениями 2-ой категории (см. Рисунок 9).

По полученным данным был оценен предел усталостной прочности для образцов с повреждениями второй категории, который составил $0,84\sigma_{2к}$ ($\sigma_{2к}$ - обозначение максимального напряжения при разрушении материала при циклическом нагружении).

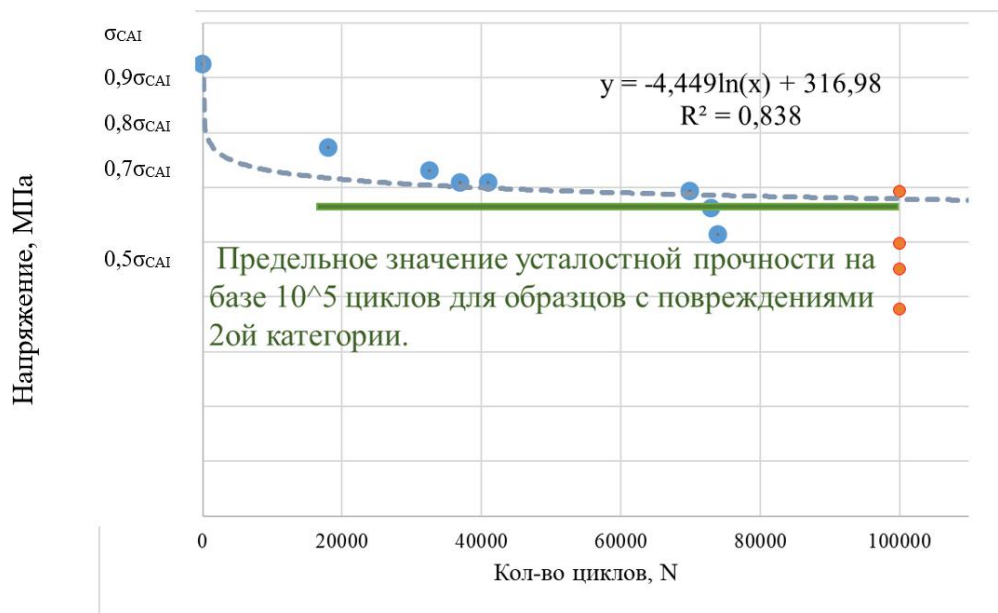


Рисунок 9 - Результаты экспериментальных исследований усталостной прочности образцов с повреждениями. На данном графике показаны максимальные напряжения до разрушения
 R^2 – величина достоверности аппроксимации

3.5. Результаты испытаний на остаточную прочность для образцов, прошедших базу $N=10^5$

Так как из 12 испытанных образцов, четыре прошли базу 10^5 циклов без разрушения, все они были впоследствии разрушены статически сжимающей нагрузкой, с целью измерения их остаточной прочности. На всех образцах был зафиксирован рост остаточной прочности, по сравнению с исходным значением остаточной прочности неиспытанных образцов.

Наибольший рост остаточной прочности наблюдался у образцов, прошедших базу испытаний в диапазоне нагрузок 0,76% -0,8% от $\sigma_{2к}$. Рост составил порядка 30% (см. Рисунок 10).

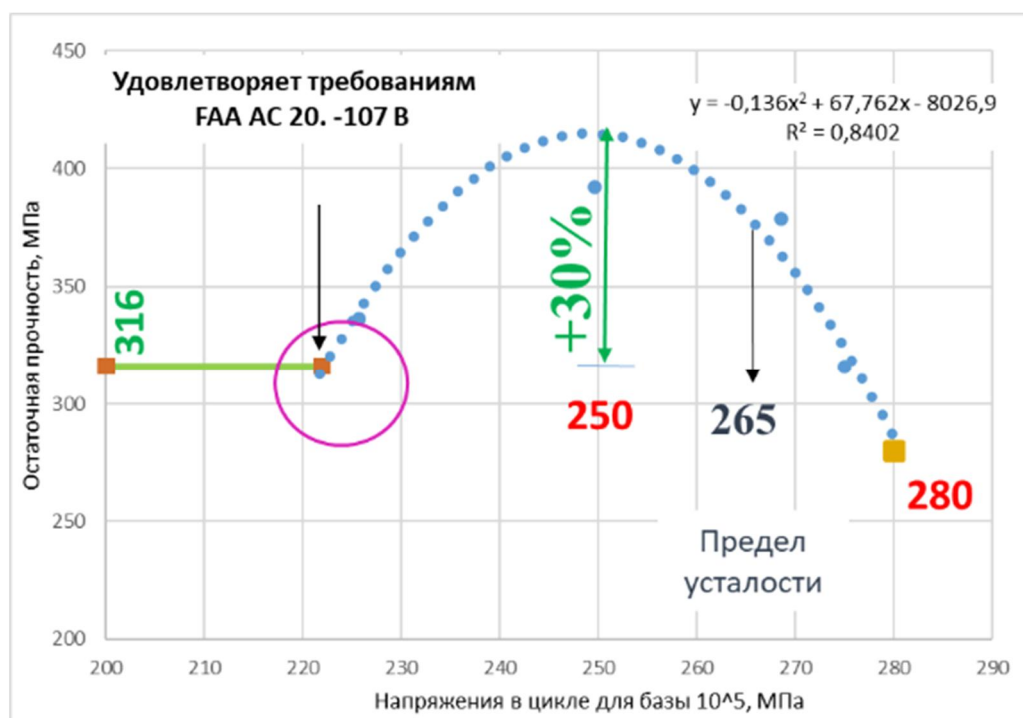


Рисунок 10 - Наблюдение роста остаточной прочности у образцов, прошедших базу $N=10^5$ циклов.

С одной стороны, рост остаточной прочности у данных образцов можно объяснить тем, что в результате действия циклической нагрузки происходит притупление вершин трещин, что уменьшает концентрацию напряжений на границах

зон расслоений. С другой стороны, под действием циклических нагрузок возможен процесс образования дополнительных микротрещин в матрице, особенно в зоне, вокруг вершины фронта расслоения, что приводит к продвижению фронта расслоения, изменению его траектория или дробления его на несколько лучей. Данный эффект может отразиться на том, что для страгивания магистрального расслоения с набором микротрещин на границе потребуется подводить больше упругой энергии, чем для продвижения расслоения в матрице без микротрещин. Это автоматически означает увеличение таких характеристик вязкости разрушения материала, как «сопротивление росту трещины» или «скорость высвобождения упругой энергии», для которых однозначно доказано, что они показывают рост своих значений, если при страгивании имеет место дроблении фронта магистральной трещины.

Аналогичным образом, усталостное растрескивание матрицы вокруг волокон по границе раздела может вызвать процесс истирания и частичного повреждения волокон в местах их взаимодействия с вершинами трещин. На волокнах должны образовываться множественные повреждения, являющиеся локальными концентраторами напряжений. А это при полном разрушении образца, приводит к тому, что волокно дробиться на большее количество участков, чем дробилось бы «новое» волокно без усталостных повреждений. Что требует увеличения нагрузки, необходимой для разрушения образца и может быть воспринято и формально истолковано, как увеличение остаточной прочности.

При изучении зарубежной литературы, было найдено несколько работ с аналогичными результатами. Одно из наиболее схожих исследований представлено в

работе Алана Неттлеса (НАСА) «Устойчивость к повреждениям композитных ламинатов с эмпирической точки зрения» [8] (см. Рисунок 11).

Усталостная нагрузка может сделать композит более прочным

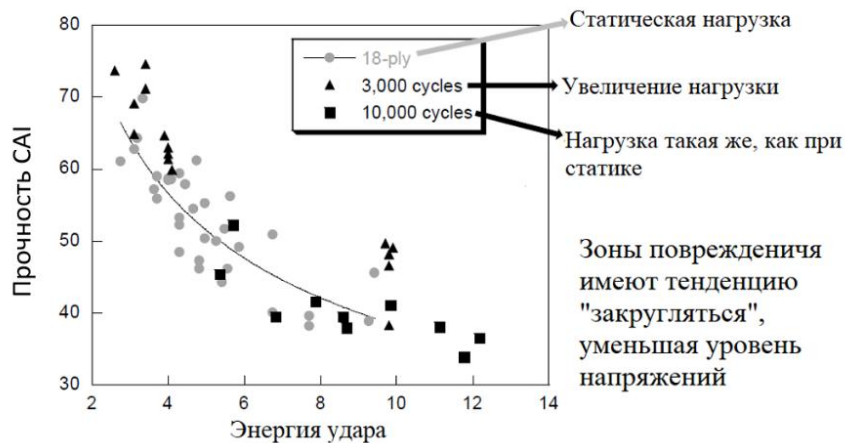


Рисунок 11 – Зависимость напряжения при сжатии после удара от энергии удара

На данном этапе работы проводятся исследования для большего количества образцов и набора статистики с целью подтверждения теории и более детального изучения причин повышения остаточной прочности.

3.6. Определение критерия скорости роста трещины

На следующем этапе работы ставились следующие задачи:

- анализ динамики роста механических повреждений при усталостных испытаниях;
- выявление характера влияния максимального напряжения цикла на скорость роста повреждений;
- определение критической скорости роста повреждения.

В ходе исследования циклические испытания образца останавливались через каждые 500 или 1000 циклов, и производилось измерение площади расслоения с помощью ультразвукового контроля (см. Рисунок 12).

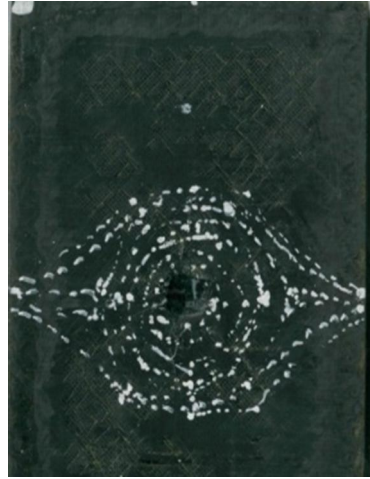


Рисунок 12 – Рост повреждения образца при циклических испытаниях на сжатие расслоения от числа пройденных циклов сжимающей нагрузки. Использовалась линейная аппроксимация данных (см. Рисунок 13).

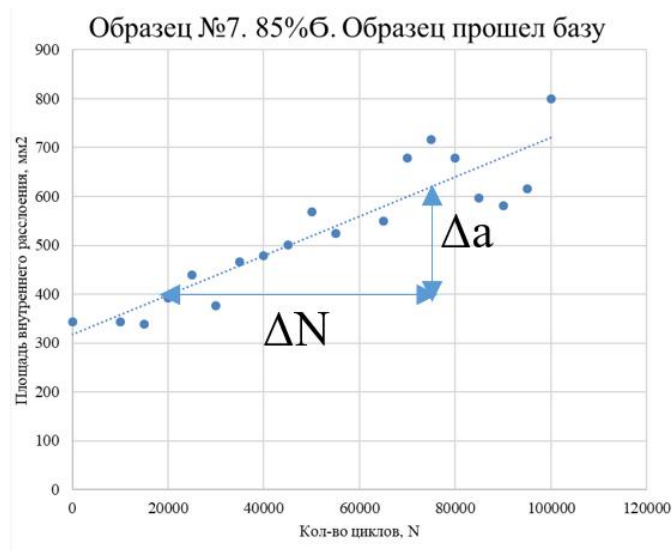


Рисунок 13 - Определение допустимых значений эксплуатационных напряжений по критерию скорости роста трещины

За параметр скорости роста повреждения $\Delta a/\Delta N$ [9] принят тангенс угла наклона прямой:

$$\Delta a/\Delta N=0,016 \text{ мм}^2/\text{цикл}$$

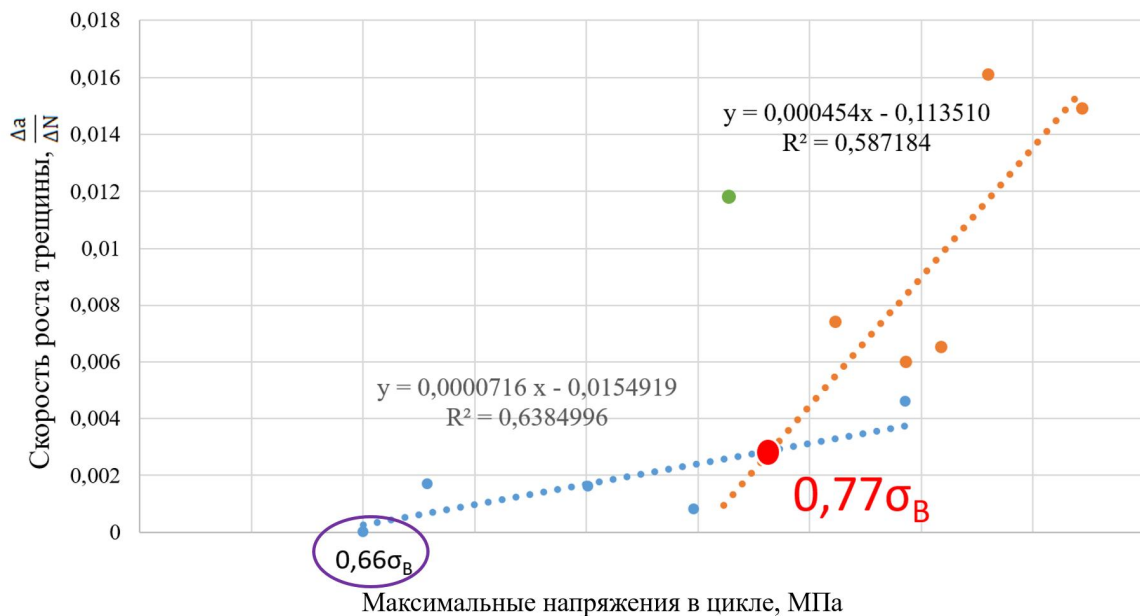
(2)

где:

Δa - прирост площади внутреннего повреждения

ΔN – количество циклов нагружения между измерениями.

Для определения критической скорости роста повреждения второй категории экспериментальные данные по всем образцам были сведены в одну графическую зависимость (см. Рисунок 14).



У образцов, испытанных при нагрузках, превышающих 80% от $\sigma_{2к}$, скорость роста повреждений увеличивается прямо пропорционально увеличению приложенных циклических напряжений (обозначено оранжевым цветом на графике). Все образцы, разрушившиеся в ходе испытаний (за исключением №7, зеленая точка на графике), имели скорость роста повреждений выше критической скорости.

Таким образом, напряжение $0,8\sigma_{2к}$ можно считать предельно допустимым значением, не превышение которого гарантирует (с 50% вероятностью) работоспособность испытуемого материала в течение 10^5 циклов без разрушения, даже при наличии повреждений 2-ой категории. При этом рост повреждения за один цикл нагружения не превысит значения $0,0016 \text{ мм}^2/\text{цикл}$.

4. III этап исследований. Испытания после воздействия влаги на материал

III этап исследований заключается в экспериментальном определении усталостной прочности образцов из ПКМ после нанесения повреждений 2-ой категории и последующего влагонасыщения.

4.1. Нанесение повреждений на образцы

Для данных испытаний используются 9 образцов, идентичные тем, что были использованы на предыдущем этапе исследования.

На все образцы так же были нанесены повреждения 2-ой категории повреждений методом квазистатического продавливания полусферическим индентором ($D_i=16 \text{ мм}$, $D_s=76 \text{ мм}$). Повреждения наносились однократным продавливанием (Метод А).

На рисунке 15 представлена диаграммы продавливания образцов

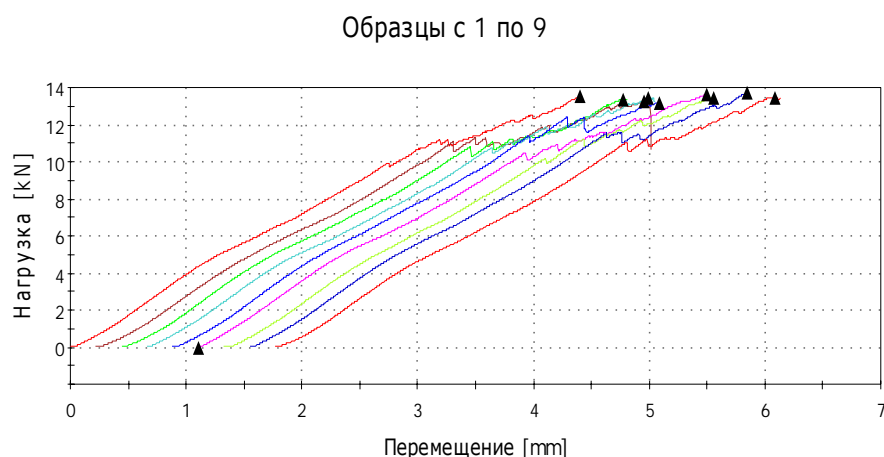


Рисунок 15 - Диаграммы нагружения образцов продавливанием. Метод А

После нанесения повреждений и проведения УЗ контроля, образцы партии были помещены в климатическую камеру для последующего влагонасыщения.

4.2. Влагонасыщение образцов

Процедура влагонасыщения проходила в соответствии с ASTM D5229 [10].

Образцы находились в камере при температуре $T=70^{\circ}\text{C}$ и влажности $\text{RH}=85\%$. После достижения состояния равновесного влагонасыщения построена диаграмма влагонасыщения (см. Рисунок 16).

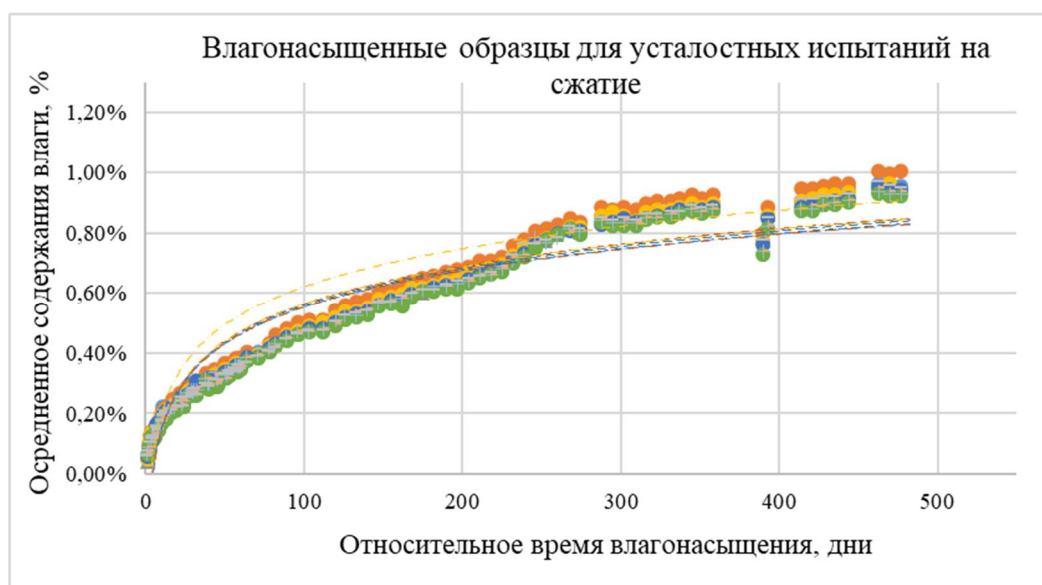


Рисунок 16 – Диаграмма влагонасыщения для образцов

4.3. Циклические испытания и УЗ контроль

После влагонасыщения образцов было проведено исследование динамики роста внутреннего повреждения под действием циклических нагрузок. Для отслеживания роста площади внутреннего расслоения были проведены регулярные измерения с помощью дефектоскопа методом ультразвуковых фазированных решеток.

По результатам сканирования определена площадь внутреннего расслоения для 5 образцов на нескольких этапах испытаний.

На рисунке 17 показано наглядное изменение площади внутреннего расслоения в зависимости от числа циклов при сжатии. Исходя из предыдущих исследований было отмечено, что наиболее активный рост внутреннего расслоения происходит после прохождения 60000 циклов. В данных исследованиях разрушение образцов произошло до прохождения базы испытаний, тем не менее наблюдался рост внутреннего расслоения во всех образцах. Измерения проводились сначала через

10000 циклов, а далее, для отслеживая роста повреждения число циклов для проведения контроля было увеличено до 15000 для каждого образца.

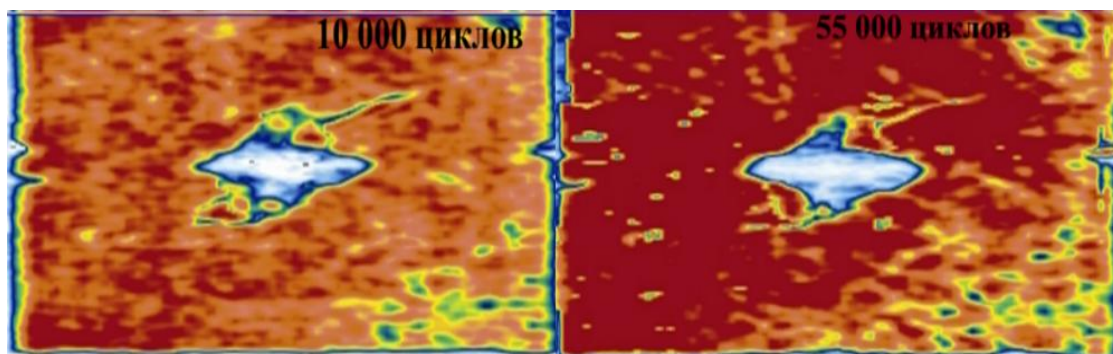


Рисунок 17 – Изменение площади внутреннего расслоения для образца №6 при различном числе циклов

Циклические испытания проводились по программе идентичной II этапу исследований.

4.4. Результаты испытаний

Исходя из значения остаточной прочности при сжатии задавалась максимальная нагрузка. Все испытуемые образцы были разрушены до прохождения базы при различных уровнях напряжений 0,7, 0,8, 0,85, 0,9 и т.д. (см. Таблица 1). По результатам циклических испытаний построена S-N кривая усталости для образцов с повреждениями 2-ой категории (см. Рисунок 18).

Таблица 1 – результаты усталостных испытаний

№образца	Кол-во напряжения от σ_B	Кол-во циклов, N
1	0,9 σ_B	2594
2	0,85 σ_B	736
3	0,85 σ_B	42866
4	0,8 σ_B	63900
5	0,75 σ_B	19223

6	0,77 σ_B	61642
7	0,79 σ_B	48656
8	0,8 σ_B	43356
9	0,83 σ_B	39566

S-N кривая

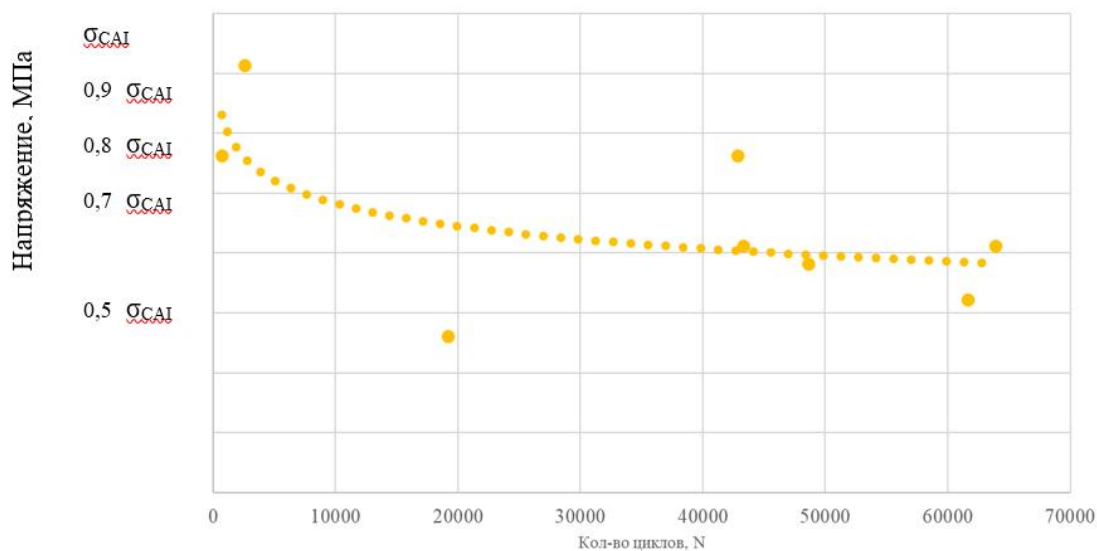


Рисунок 18 - Результаты экспериментальных исследований усталостной прочности влагонасыщенных образцов с повреждениями

При сравнении значений прочности при циклическом сжатии сухих образцов и образцов, достигших состояния равновесного влагонасыщения было определено, что прочность для влагонасыщенного материала падает на 6%. (см. Рисунок 19).

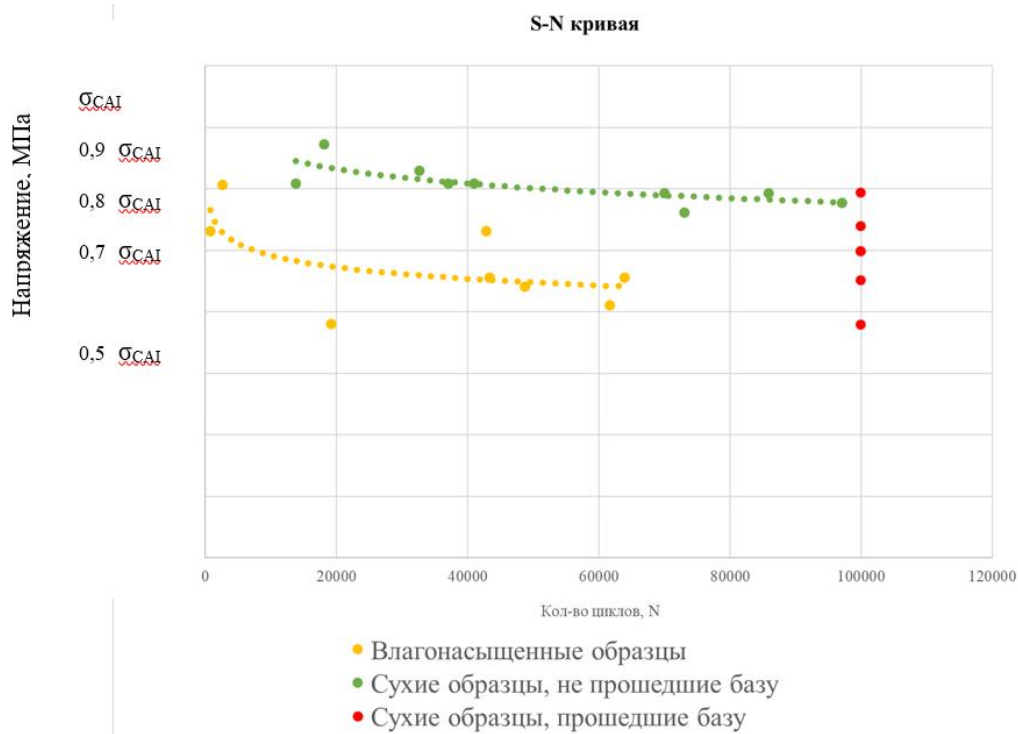


Рисунок 19 – сравнение значения прочности при усталостном сжатии для сухих и влагонасыщенных образцов из ПКМ

4.5. Определение скорости роста трещины

Проанализированы динамика роста механических повреждений при усталостных испытаниях и выявлен характер влияния максимального напряжения цикла на скорость роста повреждений.

Для каждого образца построена экспериментальная зависимость площади расслоения от числа циклов сжимающей нагрузки. Использовалась линейная аппроксимация данных по методу наименьших квадратов (см. Рисунок 20).

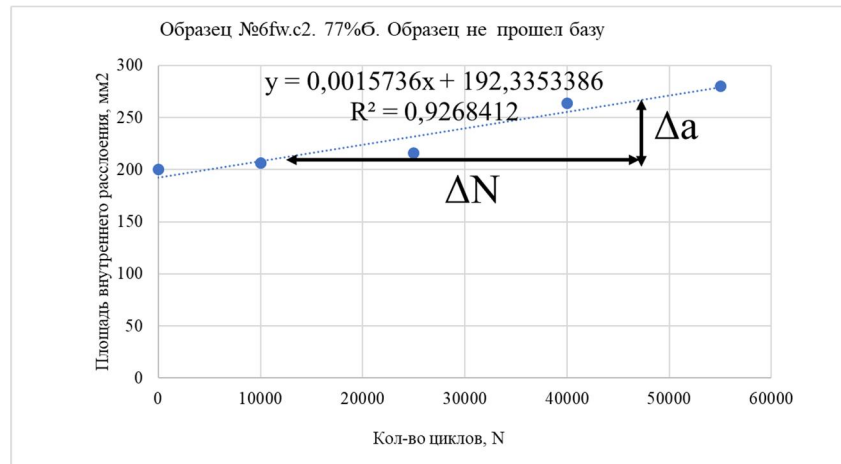


Рисунок 20 - Определение допустимых значений эксплуатационных напряжений по критерию скорости роста

Скорость роста внутреннего повреждения для влагонасыщенных образцов составляет 0,0046 в соответствии с формулой (1).

Сравнения скорости роста трещины для сухих и влагонасыщенных образцов показали, что при достижении состояния равновесного влагонасыщения для данного материала происходит падение прочности на 10%. Так же отмечено снижение интенсивности скорости роста трещины (см. Рисунок 21).

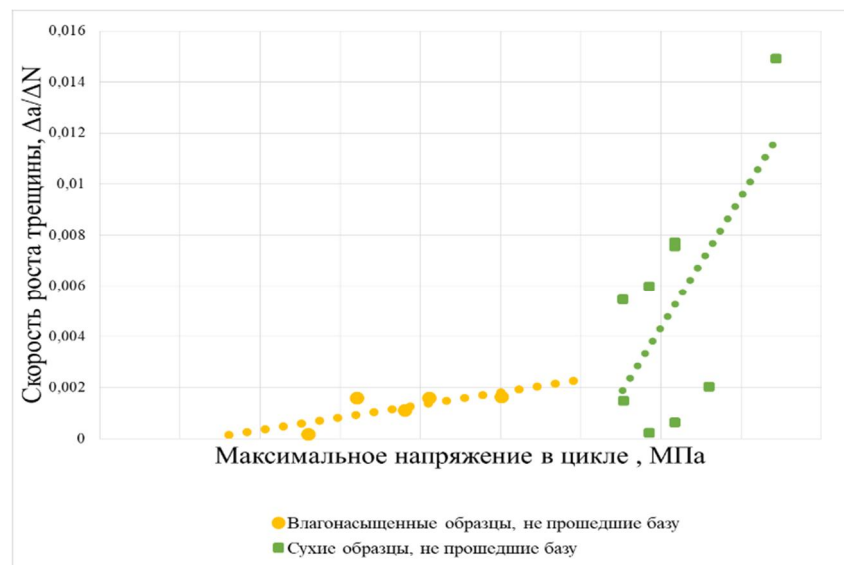


Рисунок 21 – сравнение скорости роста трещины для сухих и влагонасыщенных образцов

5. Выводы

- 1) Определены пределы прочности при сжатии для образцов с повреждениями от 2 категории, с учетом циклических нагрузок. Они имеют близкие значения: $0,81\sigma_{2к}$ при использовании критерия «критической скорости роста повреждения», и $0,84\sigma_{2к}$ если определять его по кривой усталости («S-N»).
- 2) Значение в $0,84\sigma_{2к}$ совпало с уровнем остаточной прочности материала, имеющего максимальный уровень статических повреждений (4-ой категории), нанесённых индентером по методу квазистатического продавливания QSI.
- 3) Нагрузка меньше критической - гарантирует прохождение образцами базы циклов 10^5 без поломки. При этом скорость роста повреждения не превышает величину $0,0016 \text{ мм}^2/\text{цикл}$ и наблюдается рост остаточной прочности.
- 4) Максимум остаточной прочности наблюдается при циклических нагрузках, близких к критическим.
- 5) Значение предела выносливости падает при достижении равновесного влагонасыщения на 10%.

Список источников

1. Аношкин А.Н., Зуйко В.Ю., Осокин В.М., Писарев П. Моделирование технологических дефектов и оценка их влияния на статическую прочность композитных фланцев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2016. № 2. С. 58-21. DOI: [10.15593/perm.mech/2016.2.01](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.2.01)

2. ASTM D6264/D6264M - Standard Test Method for Measuring Damage Resistance of Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite to Concentrated Quasi-Static Indentation Force. URL: https://www.astm.org/d6264_d6264m-23.html
3. Ilcewicz L. Past experiences and future trends for composite aircraft structure 11/10/09 montana state university seminar FAA CS&TA, Composites. 2009. URL: <http://www.coe.montana.edu/me/faculty/cairns/Composites>
4. ГОСТ Р 56787-2015. Композиты полимерные. Неразрушающий контроль. - М.: Стандартиформ, 2016. - 66 с.
5. Каримбаев Т.Д., Пальчиков Д.С. Методы неразрушающего контроля деталей авиадвигателей их композиционных материалов. Выявление границ допустимости дефектов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2014. № 5 (47). Ч. 1. С. 96-105.
6. Огибалов П.М. и др. Конструкционные полимеры. в 2 кн. - М.: Издательство Московского университета, 1972. Кн. 1. – 323 с.; Кн. 2. – 306 с.
7. Стрижиус В.Е. Оценка усталостной долговечности слоистых композитов с использованием нормализованных кривых усталости // Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 26, № 3. С. 20–32. DOI: [10.18721/JEST.26302](https://doi.org/10.18721/JEST.26302)
8. Alan T. Nettles. Damage Tolerance of Composite Laminates from an Empirical Perspective, NASA, Marshall Space Flight Centre, 2009, 26 p.
9. Давид Брок. Основы механики разрушения. – М.: Высшая школа, 1980. - 368 с.

10. ASTM D5229. Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials. URL: https://www.astm.org/d5229_d5229m-92r10.html
11. Ша Мингун, Сунь Ин. Экспериментальное исследование повреждений конструкции из композитных материалов высокоскоростного летательного аппарата от дождевой каплеударной эрозии // Труды МАИ. 2022. № 126. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168996>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-10)
12. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Механика деформирования и разрушения полимерных композитов при наличии множественных расслоений произвольной формы под действием динамических нагрузок // Труды МАИ. 2022. № 124. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=166912>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-06](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-06)
13. Голован В.И., Дударьков Ю.И., Левченко Е.А., Лимонин М.В. Несущая способность панелей из композиционных материалов при наличии эксплуатационных повреждений // Труды МАИ. 2020. № 110. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=112830>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-5](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-5)
14. Каримбаев Т.Д. Аналитическое описание влияния повреждений на работоспособность изделий из композиционных материалов // Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 23–25 июня 2021): сборник докладов. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2021. Т. 2. - С. 370-372

15. Кинцис Т.Я., Розе А.В., Жигун И.Г. Методы статических испытаний армированных пластиков. – Рига: Зинатне, 1972. – 227 с.
16. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. – М.: Наука, 1971. - 415 с.
17. Чамис К. Композиционные материалы. Анализ и проектирование конструкций. Т. 8. Ч. 2. – М.: Машиностроение, 1978. - 262 с.
18. Баженов С.Л. Механика и технология композиционных материалов. - Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2014. - 328 с.
19. Каримбаев Т.Д., Луппов А.А., Афанасьев Д.В., Пальчиков Д.С. О формировании технических требований к полимерному материалу перспективной рабочей лопатки вентилятора ТРДД // Двигатель. 2015. № 1. С. 4-10.
20. Гольденблат И.И., Копнов В.А. Критерий прочности анизотропных материалов - М.: Машиностроение, 1968. - 192 с.

References

1. Anoshkin A.N., Zuiko V.Yu., Osokin V.M., Pisarev P. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2016, no. 2, pp. 58-21.
DOI: [10.15593/perm.mech/2016.2.01](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.2.01)
2. *ASTM D6264/D6264M - Standard Test Method for Measuring Damage Resistance of Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite to Concentrated Quasi-Static Indentation Force*. URL: https://www.astm.org/d6264_d6264m-23.html

3. Ilcewicz L. *Past experiences and future trends for composite aircraft structure* 11/10/09 montana state university seminar FAA CS&TA, Composites. 2009. URL: <http://www.coe.montana.edu/me/faculty/cairns/Composites>
4. GOST R 56787-2015. *Kompozity polimernye. Nerazrushayushchii kontrol'* (GOST R 56787-2015. Polymer composites. Non-destructive testing), Moscow, Standartinform, 2016, 66 p.
5. Karimbaev T.D., Pal'chikov D.S. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2014, no. 5 (47), ch. 1, pp. 96-105.
6. Ogibalov P.M. et al. *Konstruktsionnye polimery*. V 2 kn. (), Moscow, Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 1972. Book. 1. – 323 p.; Book. 2. – 306 s.
7. Strizhius V.E. *Materialovedenie. Energetika*, 2020, vol. 26, no. 3, pp. 20–32. DOI: [10.18721/JEST.26302](https://doi.org/10.18721/JEST.26302)
8. Alan T. Nettles. *Damage Tolerance of Composite Laminates from an Empirical Perspective*, NASA, Marshall Space Flight Centre, 2009, 26 p.
9. David Broek. *Osnovy mekhaniki razrusheniya* (), Moscow, Vysshaya shkola, 1980, 368 p.
10. ASTM D5229. *Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials*. URL: https://www.astm.org/d5229_d5229m-92r10.html
11. Sha Mingun, Sun' In. *Trudy MAI*, 2022, no. 126. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168996>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-10)
12. Medvedskii A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=166912>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-06](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-06)

13. Golovan V.I., Dudar'kov Yu.I., Levchenko E.A., Limonin M.V. *Trudy MAI*, 2020, no. 110. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=112830>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-5](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-5)
14. Karimbaev T.D. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya»*: sbornik dokladov. Samara, Samarskii natsional'nyi issledovatel'skii universitet imeni akademika S.P. Koroleva, 2021, vol. 2, pp. 370-372.
15. Kintsis T.Ya., Roze A.V., Zhigun I.G. *Metody staticheskikh ispytaniy armirovannykh plastikov* (Methods of static testing of reinforced plastics), Riga, Zinatne, 1972, 227 p.
16. Lekhnitskii S.G. *Teoriya uprugosti anizotropnogo tela* (Theory of elasticity of an anisotropic body), Moscow, Nauka, 1971, 415 p.
17. Chamis K. *Kompozitsionnye materialy. Analiz i proektirovanie konstruksii. T. 8. Ch. 2.* (Composite materials. Analysis and design of structures. Vol. 8. Part 2.), Moscow, Mashinostroenie, 1978, 262 p.
18. Bazhenov C.L. *Mekhanika i tekhnologiya kompozitsionnykh materialov* (Mechanics and technology of composite materials), Dolgoprudnyi: Izdatel'skii Dom «Intellekt», 2014, 328 p.
19. Karimbaev T.D., Luppov A.A., Afanas'ev D.V., Pal'chikov D.S. *Dvigatel'*, 2015, no. 1, pp. 4-10.
20. Gol'denblat I.I., Kopnov V.A. *Kriterii prochnosti anizotropnykh materialov* (Criterion of strength of anisotropic materials), Moscow, Mashinostroenie, 1968, 192 p.

Статья поступила в редакцию 19.06.2024

Одобрена после рецензирования 23.07.2024

Принята к публикации 25.10.2024

The article was submitted on 19.06.2024; approved after reviewing on 23.07.2024; accepted for publication on 25.10.2024