

На правах рукописи



Прокудин Олег Александрович

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ
ДЕФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИТОВ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ МЕЖСЛОЕВОГО СДВИГА**

Специальность: 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и
аппаратуры»

Автореферат диссертации

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Москва, 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ)

Научный руководитель: **Рабинский Лев Наумович,**
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры «Сопротивление материалов,
динамика и прочность машин» Московского
авиационного института (НИУ)

Официальные оппоненты: **Митряйкин Виктор Иванович,**
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Машиноведения и инженерной
графики» ФГБОУ ВО «Казанского
национального исследовательского технического
университета им. А.Н. Туполева – КАИ»

Кондратов Дмитрий Вячеславович,
доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры «Математического и
компьютерного моделирования» ФГБОУ ВО
«Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени
Н.Г. Чернышевского»

Ведущая организация: **ФГБУН «Институт прикладной механики
Российской академии наук»**

Защита диссертации состоится «15» декабря 2021 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.125.05 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО МАИ (НИУ) и на сайте https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=160510

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.125.05
Федотенков Г. В.



Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации. Производителями авиационной и космической техники непрерывно ведется исследование материалов, способных снизить вес летательных аппаратов. Уменьшение веса и улучшение стойкости к повреждениям послужили основными причинами для разработки нового класса материалов, применяемых в аэрокосмической отрасли. Одним из перспективных материалов данного типа является GLARE (Glass laminate aluminum reinforced epoxy), аналог в России, разрабатываемый ФГУП «ВИАМ», носит название СИАЛ. Это многослойный металлополимерный композиционный материал на основе алюмокомпозитов, представляющий собой комбинацию чередующихся слоев листового алюминиевого сплава и слоев эпоксидной смолы, усиленной стекловолокном. Толщина одного слоя составляет порядка 0,3 мм.

Алюмокомпозиты обладают большим набором преимуществ по сравнению с алюминиевыми сплавами: меньшая плотность, повышенная удельная прочность, стойкость к образованию трещин, за счет слоев композитов, коррозионная стойкость.

Теоретическое и экспериментальное исследование GLARE ведется уже более трех десятков лет. Крупные производители авиационной техники, такие как Airbus и Boeing, нашли применение для алюмокомпозитов от обшивки самолетов до панелей пола и противопожарных перегородок. Например, слоистый материал, состоящий из 5-7 слоев, был выбран для нескольких ключевых компонентов пассажирского самолета Airbus A380. К ним относятся обшивка части фюзеляжа, передние кромки горизонтальных и вертикальных стабилизаторов.

Однако дальнейшее развитие применения материалов данного типа к силовым элементам самолета, например, конструкции крыла, требует увеличения количества слоев в структуре СИАЛ. В связи с этим, **актуальной** задачей является исследование механических характеристик толстых алюмокомпозитов, состоящих, в частности, из 17 слоев (9 слоев

алюминиевого сплава и 8 слоев стеклопластика). Для таких многослойных структур, работающих в условиях сложного напряженно-деформированного состояния, важной задачей является определение характеристик межслоевой прочности с учетом нелинейных сдвиговых деформаций в слоях стеклопластика.

Кроме того, на сегодняшний день проведено большое количество исследований трехслойных сэндвич панелей с внешними несущими слоями из алюмостеклопластика. Подавляющее большинство этих работ посвящено исследованию ударного воздействия. Однако работ, нацеленных на изучение особенностей вибрационного воздействия на такие конструкции крайне мало. Между тем, вибрационный тип нагружения является характерным для большинства авиационных и космических аппаратов. Поэтому **актуальной** задачей является оценка собственных частот и различных параметров демпфирования для такого вида конструкций, так как это позволяет вычислить их динамическую прочность.

Целью работы является:

- определение эффективных механических характеристик 5 слойного алюмостеклопластика с использованием модифицированной аналитической модели. Сопоставление полученных результатов с результатами эксперимента на одноосное растяжение. Оценка динамических характеристик образцов с учетом межслоевых сдвиговых деформаций по результатам испытаний на свободные затухающие колебания;

- исследование межслоевой прочности 17 слойного алюмостеклопластика по результатам испытаний на осевое сжатие образцов с надрезами. Численное моделирование эксперимента с использованием программного комплекса Comsol Multiphysics;

- определение значений эффективного модуля упругости и модуля сдвига 17 слойного алюмостеклопластика, исследование механизмов разрушения образцов при испытаниях на трехточечный изгиб, исследование деформированного состояния образцов методом корреляции цифровых

изображений Моделирование эксперимента в Comsol Multiphysics с учетом сдвиговых деформаций в слоях стеклопластика;

– определение динамических характеристик трехслойных сэндвич балок с внешними несущими слоями из алюмопластика и полиимидным наполнителем при испытании на свободные затухающие колебания.

Методы исследования. Для достижения поставленных целей применялись аналитические и численные методы механики деформируемого твердого тела, теории упругости, механики композиционных материалов. Аналитические методы исследования были реализованы с использованием системы компьютерной алгебры Wolfram Mathematica. Численное моделирование с применением метода конечных элементов выполнено в программном комплексе Comsol Multiphysics. Результаты аналитических расчетов и численного моделирования сопоставляются с результатами серии статических и динамических испытаний.

Научная новизна:

– уточнен, установленный в более ранних работах, диапазон удлинений образцов алюмопластика, при котором реализуется чистое межслоевое разрушение. Дана оценка «кажущегося» и истинного значения межслоевой прочности с учетом эффектов межслоевого сдвига;

– впервые исследовано деформированное состояние образцов с различной ориентации армирующих волокон при изгибе с применением метода корреляции цифровых изображений;

– получены не исследованные ранее значения собственных частот и коэффициентов демпфирования трехслойных сэндвич балок с внешними слоями из алюмопластика и полиимидным наполнителем.

Теоретическая и практическая значимость.

Представлен расчетно - экспериментальный метод исследования деформированного состояния многослойного композита с учетом эффектов межслоевого сдвига. В ходе реализации данного метода были получены

значения механических и динамических характеристик образцов исследуемой структуры.

Разработанные аналитические и численные модели, сопоставленные с результатами испытаний, позволяют прогнозировать свойства исследуемого композита с любым количеством слоев.

Проведенный анализ деформированного состояния алюмокомпозитного пластика с применением метода корреляции цифровых изображений, позволил выявить неравномерное распределение деформаций межслоевого сдвига внутри толстых образцов алюмокомпозитного пластика.

Полученные результаты могут быть применены при проектировании конструкций силовых элементов летательных аппаратов, работающих в условиях статического и вибрационного нагружения.

Обоснованность и достоверность результатов, полученных при использовании аналитических методов расчета, определяется примененными строгими методами механики деформируемого твердого тела, теории упругости, механики композиционных материалов. Достоверность полученных результатов обоснована сопоставлением с результатами численного моделирования и проверена в ходе проведения статических и динамических испытаний. Численное моделирование проведено с помощью программного комплекса Comsol Multiphysics с использованием сетки конечных элементов высокой плотности. Достоверность численных расчетов оценивалась путем варьирования размера конечно-элементной сетки, а также сопоставлением полученных решений с использованием упрощенных аналитических моделей. Испытания исследуемых образцов проводились в соответствии с отечественными и международными стандартами ГОСТ и ASTM на сертифицированном оборудовании.

Результаты, выносимые на защиту:

– модифицированная аналитическая модель, для определения значения эффективного модуля упругости, предела текучести и предела прочности при осевом растяжении 5-слойного образца алюмокомпозитного пластика.

Экспериментальное и численное определение динамических характеристик образцов;

– экспериментальное определение значения межслоевой прочности 17 слойного алюмостеклопластика в испытании на одноосное сжатие образцов с надрезами. Сопоставление с результатами численного моделирования эксперимента;

– определение эффективного значения модуля упругости и модуля сдвига 17 слойного алюмостеклопластика в испытании на изгиб. Результаты исследования механизмов разрушения образцов. Оценка диапазонов удлинения образцов, при которых происходит смена механизма разрушения. Экспериментальные и численные результаты оценки «кажущегося» и истинного значения межслоевой прочности при изгибе. Оценка интенсивности распределения сдвиговых деформаций в образцах алюмостеклопластика с использованием метода корреляции цифровых изображений;

– экспериментальное и численное определение динамических характеристик трехслойных сэндвич балок с внешними несущими слоями из алюмостеклопластика и полиимидным наполнителем.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. Международная молодежная научная конференция «XLV Гагаринские чтения» Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского (ИПМех РАН), 17 апреля 2019 г;

2. Всероссийская научная конференция с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, посвященная 30-летию ИПРИМ РАН, 20 ноября 2019г;

3. Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А. Г. Горшкова. Вятчи, 16-20 марта 2020 г;

4. Международная конференция «Космические системы». МАИ, 27 апреля 2021 год.

5. Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А. Г. Горшкова. Вятчи, 17-21 мая 2021 г;

6. 24th International Conference on Composite Structures. Faculty of Engineering, University of Porto, Portugal, 14-16 June 2021.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 10 работ, в том числе одна научная работа в журнале из списка Scopus и три научные работы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК РФ:

1. Y. Solyaev, S. Lurie, O. Prokudin, V. Antipov, L. Rabinskiy, N. Serebrennikova, V. Dobryanskiy. Elasto-plastic behavior and failure of thick GLARE laminates under bending loading. Composites Part B 200 (2020) 108302, Volume 200, 1 November 2020, 108302 <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108302>;

2. Антипов В. В., Прокудин О. А., Лурье С. А., Серебренникова Н. Ю., Соляев Ю. О., Коновалов А. Н. Оценка межслоевой прочности алюмокомпозитов по результатам испытаний образцов на трехточечный изгиб. Вестник Московского авиационного института – 2019. –Т. 26. – №. 2. – С. 229-237;

3. О. А. Прокудин, Ю. О. Соляев, А. В. Бабайцев, А. В. Артемьев, М. А. Коробков. Динамические характеристики трехслойных балок с несущими слоями из алюмокомпозитов. Вестник ПНИПУ, Механика – № 4, 2020. doi: 10.15593/perm.mech/2020.4.22;

4. Прокудин О.А., Рабинский Л.Н., Чан Кует Тханг. Определение динамических характеристик металлополимерного слоистого стержня// Труды МАИ. 2021 – № 120.

Объём и структура диссертации. Работа содержит 128 страниц основного текста, включая 59 рисунков, 15 таблиц, состоит из введения, 4 глав, заключения, нормативных ссылок, списка литературы в количестве 93 ссылок.

Основное содержание работы

Во введении представлена краткая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования и степень ее разработанности, кратко изложена структура работы по главам, сформулирована цель и задачи исследования, обоснованы научная новизна и практическая значимость работы, отмечен личный вклад автора работы.

Первая глава носит обзорно-аналитический характер. В ней приведены результаты выполненного литературного обзора отечественных и зарубежных публикаций в области исследования.

Во второй главе:

– предложена аналитическая модель для оценки эффективных механических свойств 5 слойного алюмостеклопластика, образованного тонкими слоями алюминиевого сплава и стеклопластика при одноосном растяжении. Для расчетов применена модифицированная модель слоистого материала с учетом наличия в структуре композита упругопластических слоев. Проведен послойный анализ прочности алюмостеклопластика с учетом прогрессирующего разрушения его слоев и учетом влияния остаточных температурных напряжений, возникающих при его изготовлении. В качестве критерия прочности для слоев стеклопластика применен критерий Цая-Хилла. Достижение предела текучести в слоях алюминиевого сплава оценен по критерию Мизеса. В результате расчетов определен эффективный модуль упругости, предел текучести и предел прочности материала при осевом растяжении. Показана хорошая согласованность полученных аналитических результатов с экспериментальными данными, точность составила порядка 90%.

– представлены результаты определения межслоевой прочности 17 слойного алюмостеклопластика при испытании на осевое сжатие образцов с надрезами. Приведено сравнение полученных экспериментальных результатов

с результатами, полученными на основании численного моделирования в программном комплексе Comsol Multiphysics.

Схематическая структура 17 слойного алюмокомпозита показана на рисунке 1.

17	Сплав 1441
16.2	GFRP 0°
16.1	GFRP 0°
15	Сплав 1441
14.2	GFRP 0°
14.1	GFRP 0°
13	Сплав 1441
12.2	GFRP 0°
12.1	GFRP 0°
11	Сплав 1441
10.2	GFRP 0°
10.1	GFRP 0°
9	Сплав 1441

Рисунок 1 – Схематическая структура 17 слойного алюмокомпозита

На рисунке 2 показан образец алюмокомпозита с надрезами перед началом испытания на осевое сжатие.

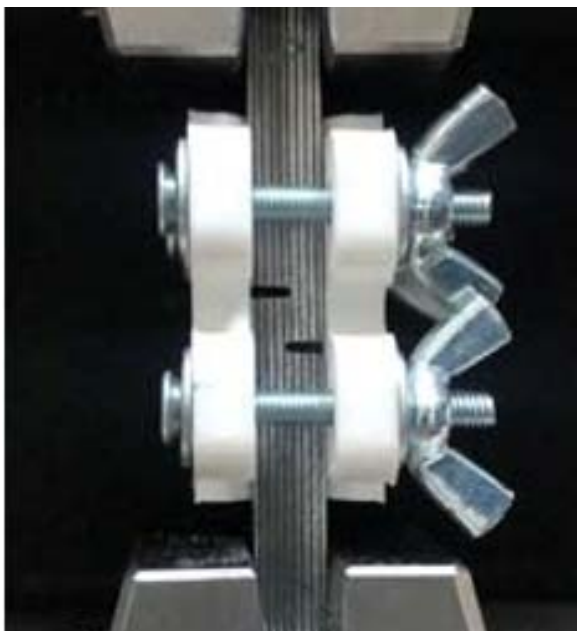


Рисунок 2 – Образец алюмокомпозита с надрезами перед началом испытания.

Результаты численного моделирования показали хорошую согласованность с экспериментом.

– приведены аналитические и экспериментальные результаты расчета модуля упругости и модуля сдвига 17 слойного алюмокомпозитного пластика при испытании на трехточечный изгиб.

Значения продольного модуля упругости и модуля сдвига оценены по следующим соотношениям:

$$E_x = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^n h_i E_i = \frac{9h_a}{h} E_{AL} + \frac{8h_c}{h} E_1 \quad (1)$$

$$G_{xz} = h \left(\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{G_i} \right)^{-1} = \frac{h}{9h_a / G_{AL} + 8h_c / G_{13}} \quad (2)$$

где i – номер слоя, $n = 17$ – количество слоев, E_{AL} и G_{AL} – модуль упругости и модуль сдвига листов алюминиевого сплава, E_1 и G_{13} – продольный модуль упругости и межслоевой модуль сдвига стеклопластика, h_a и h_c – толщины слоев листов алюминиевого сплава и слоев стеклопластика соответственно.

Продольный модуль упругости и межслоевой модуль сдвига стеклопластика определены по свойствам стекловолокна и эпоксидной смолы на основании стандартного микромеханического подхода:

$$E_1 = f E_f + (1-f) E_m + \frac{4f(1-f)(\nu_f - \nu_m)^2}{(1-f)/k_f + f/k_m + 1/G_m} \quad (3)$$

$$G_{13} = G_{12} = G_m \frac{G_f(1+f) + G_m(1-f)}{G_f(1-f) + G_m(1+f)} \quad (4)$$

где индексы f и m определяют свойства волокна и матрицы соответственно, ν – коэффициент Пуассона, $k = E / (2(1+\nu)(1-2\nu))$ – объемный модуль деформации.

Для численного моделирования вычислены значения других упругих свойств слоев, которые задаются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}
v_{12} = v_{13} &= f v_f + (1-f) v_m + \frac{v_f(1-f)(v_f - v_m)(1/k_m - 1/k_f)}{(1-f)/k_f + f/k_m + 1/G_m} \\
k_{23} &= k_m + \frac{f(k_f - k_m)}{1 + (1-f)\frac{k_f - k_m}{k_m + G_m}} \\
G_{23} &= G_m \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \\
E_2 &= E_3 \frac{4k_{23}G_{23}}{k_{23} + G_{23} + 4v_{12}^2 G_{23}k_{23} / E_1} \\
v_{23} &= \frac{k_{23} - G_{23} - 4v_{12}^2 G_{23}k_{23} / E_1}{k_{23} + G_{23} + 4v_{12}^2 G_{23}k_{23} / E_1},
\end{aligned} \tag{5}$$

где константы А, В, С в определении модуля сдвига в плоскости G_{23} зависят от объемной доли волокон и упругих свойств компонент.

Результаты экспериментальных данных обработаны по методу европейского стандарта EN 408, основанному на модели балки Тимошенко:

$$\delta = \frac{1}{4b} \left(\frac{PL^3}{E_x h^3} + \frac{PL}{k G_{xz} h} \right) \tag{6}$$

где $k = \frac{5}{6}$ – поправочный коэффициент сдвига для образца прямоугольного сечения.

Решение (6) для удобства анализа экспериментальных данных переписано в следующем виде

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1}{E_x} + \frac{1}{k G_{xz}} \left(\frac{h}{L} \right)^2, \tag{7}$$

где $E^* = \frac{PL^3}{4bh^3\delta}$ – изгибный модуль упругости, определенный из экспериментальных кривых $P(\delta)$;

– исследованы механизмы разрушения образцов 17 слойного алюмокомпозитного пластика в испытаниях на трехточечный изгиб в зависимости от

расстояния между опорами. Приведены результаты оценки значения «кажущейся» межслоевой прочности, зависящей от удлинения образца L/h . По результатам численного моделирования в программном комплексе Comsol Multiphysics, благодаря учету эффектов межслоевого сдвига в слоях стеклопластика, найдено истинное значение межслоевой прочности.

На рисунке 3 продемонстрирован образец алюмокомпозитного материала перед началом испытания на трехточечный изгиб.



Рисунок 3 – Образец алюмокомпозитного материала перед началом испытания на изгиб.

Всего было выделено 5 диапазонов удлинений с различными механизмами разрушения (рисунки 5-7), они обозначены на рисунке 4 римскими цифрами I-V.

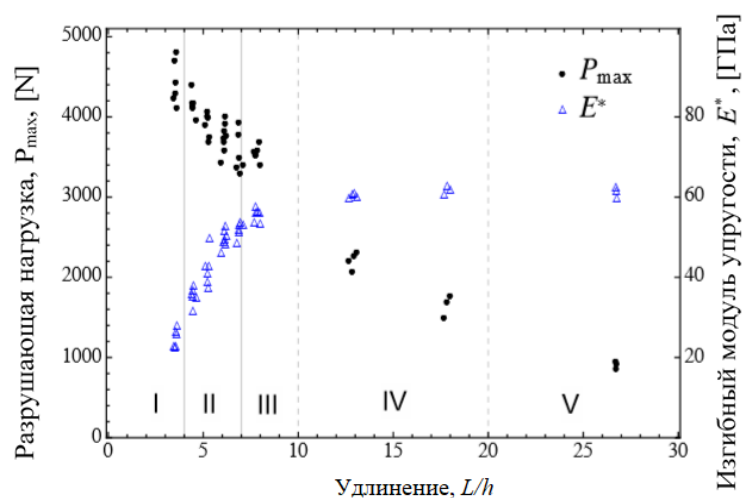


Рисунок 4 – Разрушающая нагрузка и изгибный модуль упругости образцов алюмокомпозитного материала в зависимости от удлинения L/h .

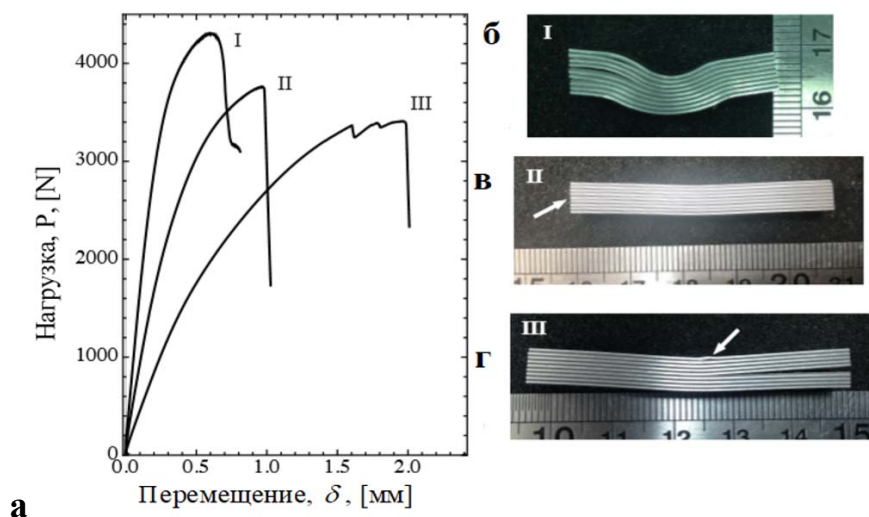


Рисунок 5 – Кривые нагрузка-перемещение (а) и различные механизмы разрушения алюмокомпозитного материала (б-г) для диапазона удлинений образцов I-III.

I. $L/h < 4$: интенсивные нелинейные поперечные деформации и вмятины, рисунок 5б;

II. $4 < L/h \leq 7$: межслоевое разрушение на границе раздела листа алюминиевого сплава и композитного материала, рисунок 5в;

III $7 < L/h < 10$: разрушение смешанного типа. В образце возникает сложное напряженное состояние, и потеря несущей способности происходит не только за счет деформаций межслоевого сдвига, но и за счет довольно значительных нормальных напряжений, рисунок 5г.

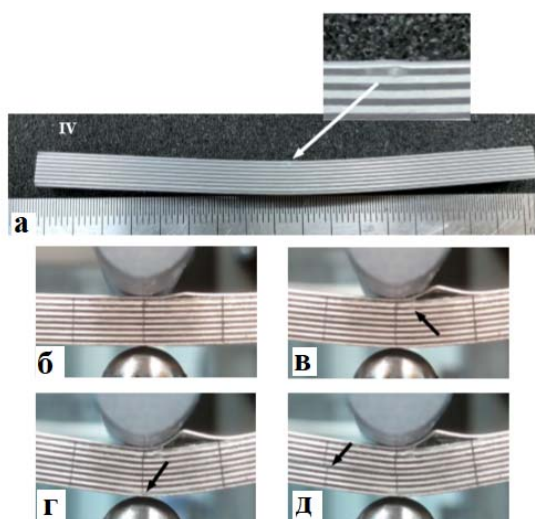


Рисунок 6 – Процесс накопления повреждений и разрушения алюмокомпозитного материала (а-д) для диапазона удлинений образцов IV.

IV. $10 < L/h < 20$: разрушение от сжатия в верхнем слое стеклопластика №16 с дальнейшим сложным процессом накопления повреждений.



Рисунок 7 – Механизм разрушения алюмокомпозита для диапазона удлинений образцов V.

V. $L/h = 27$: Разрушение наблюдается вблизи места приложения нагрузки. В отличие от образцов меньшего удлинения, расслоение и изгиб верхних слоев происходит мгновенно, зона расслоения около 1 см по длине образца.

Кажущаяся межслоевая прочность оценивалась для коротких образцов с отношением длины к толщине $L/h \leq 8$ с использованием классической формулы

$$\tilde{\tau} = \frac{3P_{\max}}{4bh}, \quad (8)$$

где P_{\max} – нагрузка, при которой произошло разрушение образца;

b и h – ширина и толщина образца, которые измерены в трех точках по длине образца и усредненные значения этих величин использовались в оценках.

В численном расчете в Comsol Multiphysics для листов алюминиевого сплава применена модель пластического течения с изотропным упрочнением в соответствии с уравнением Людвига – Холломона (9), а для учета сдвиговых деформаций в слоях стеклопластика использована модель Рамберга-Осгуда (10):

$$\sigma_y = \sigma_{y,0} + K(\varepsilon_{eq})^n, \quad (9)$$

$$G_{13}^* = \frac{G_{13}}{\left(1 + \left(\frac{G_{13}\gamma_{13}}{\bar{\tau}_{13}}\right)^m\right)^{1/m}}, \quad G_{23}^* = \frac{G_{23}}{\left(1 + \left(\frac{G_{23}\gamma_{23}}{\bar{\tau}_{23}}\right)^s\right)^{1/s}}, \quad (10)$$

На рисунке 8 показано сопоставление расчетных и экспериментальных кривых нагрузка-перемещение для различных величин удлинений образцов.

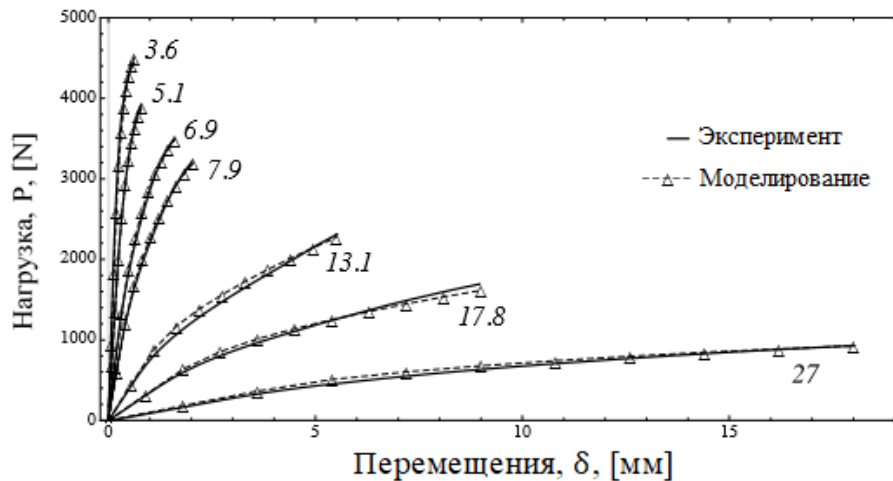


Рисунок 8 – Сравнение экспериментальных кривых с кривыми, полученными в результате численного моделирования

На рисунке 9 продемонстрирована важность учета сдвиговых деформаций в слоях стеклопластика в численном расчете

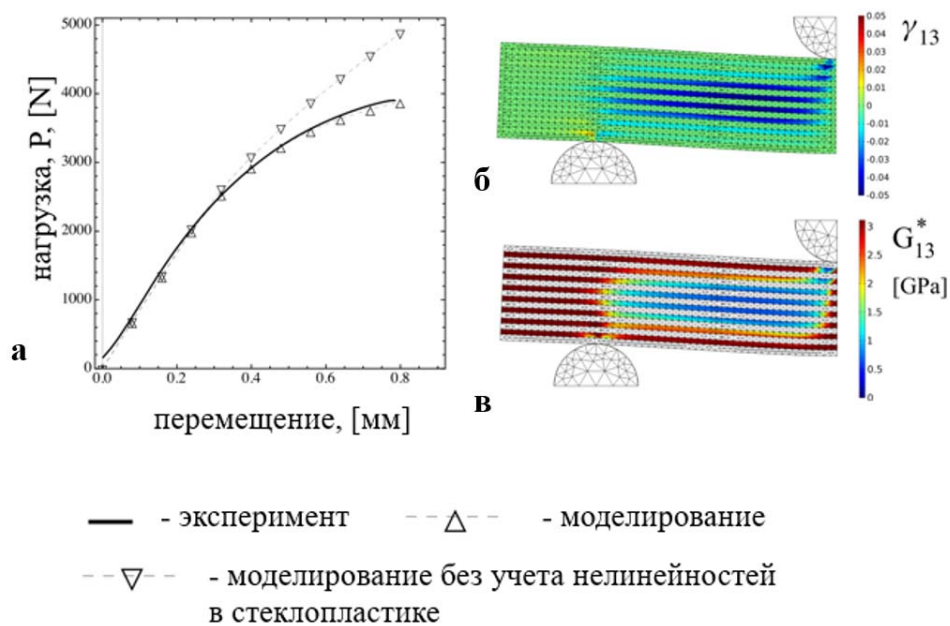


Рисунок 9 – Иллюстрация необходимости учета свойств пластических сдвиговых деформаций в слоях стеклопластика. Сравнение экспериментальной кривой с кривыми, полученными с помощью численного моделирования с

учетом и без учета нелинейных сдвиговых деформаций в слоях стеклопластика (а); распределение интенсивности сдвиговой деформации γ_{13} и соответствующее уменьшение модуля сдвига G_{13}^* (б-в).

На рисунке 10 приведены результаты расчета межслоевой прочности.

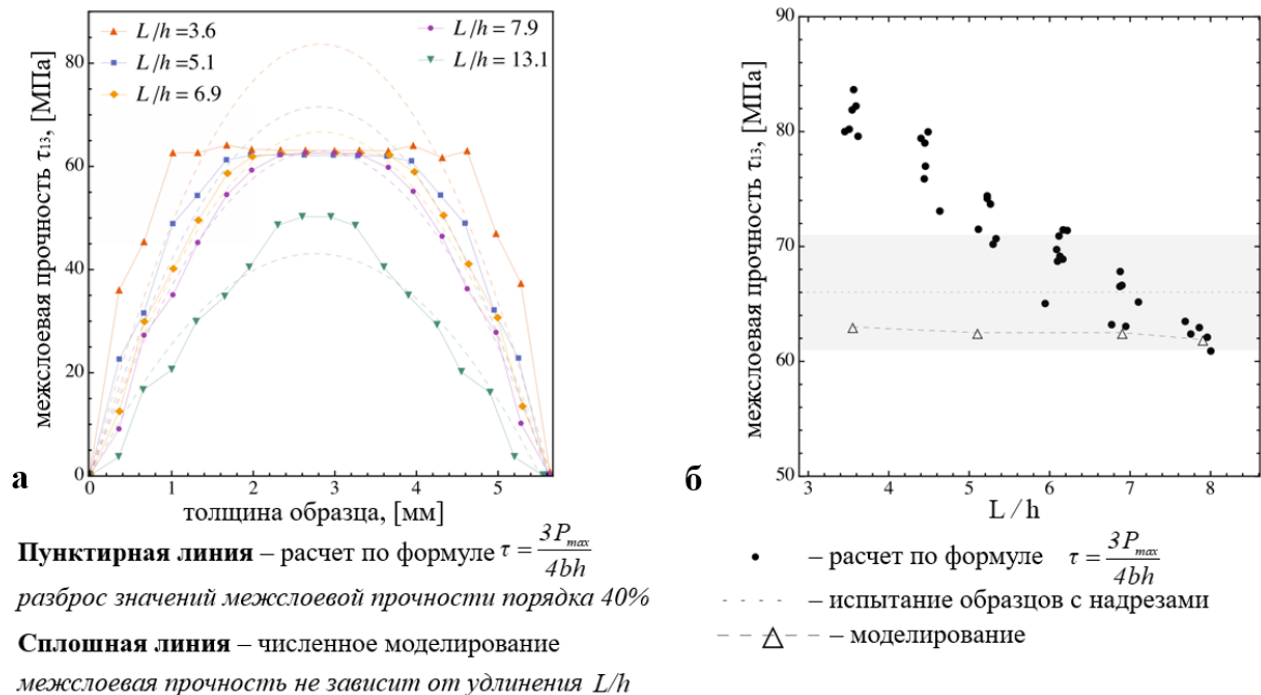


Рисунок 10 – Распределение касательных напряжений по толщине образца алюмокомпозитного материала (а) и сравнение значений межслоевой прочности, определенных различными испытательными, аналитическими и численными методами (б).

На рисунке 11 показан образец алюмокомпозитного материала с узором.

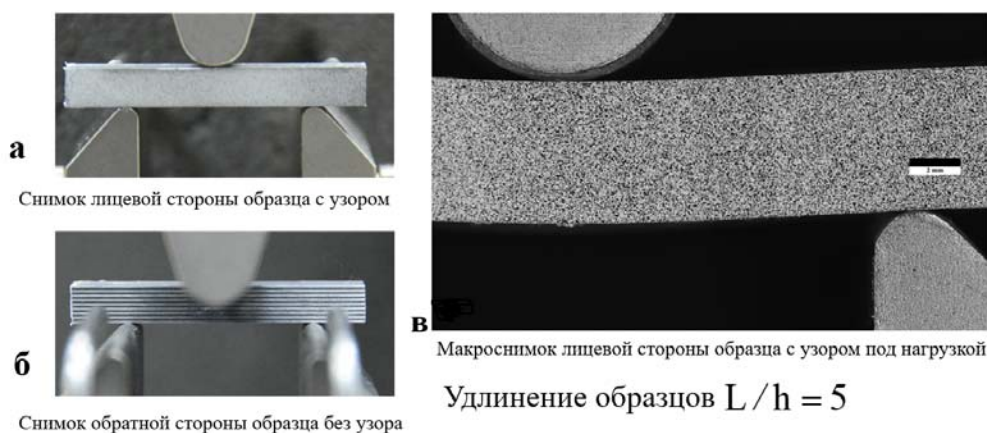


Рисунок 11 – Испытание образца алюмокомпозитного материала с узором Снимок лицевой и обратной стороны образца (а-б), макроснимок лицевой стороны образца (в).

Выявлена значительная концентрация сдвиговых деформаций в слоях стеклопластика, проведено сравнение с численным результатом расчета в Comsol Multiphysics, рисунок 12.

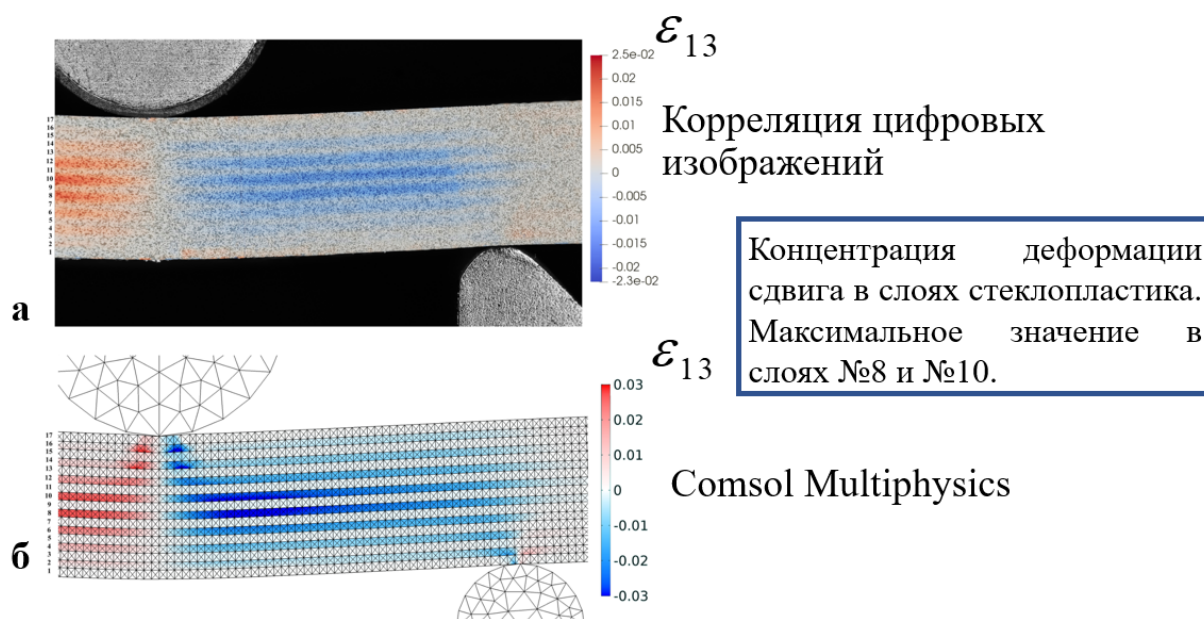


Рисунок 12 Результаты анализа методом корреляции цифровых изображений (а) и численного моделирования (б) для распределения деформаций межслоевого сдвига ε_{13} в образце алюмокомпозитного стеклопластика.

В третьей главе приведены результаты исследования динамических свойств 5-слойного алюмокомпозитного стеклопластика экспериментальным и аналитическим методом. Определены значения собственных частот и коэффициентов демпфирования образцов. В испытаниях образцы различной длины жестко закреплялись струбциной с одного конца, а на другом конце задавались условия нагружения, приводящие к возникновению затухающих изгибных колебаний, преимущественно, по первой собственной форме. Для возбуждения колебаний по поверхности образца либо ударяли металлическим ударником, либо задавалось начальное отклонение конца образца от положения равновесия.

Обработка результатов испытаний проводилась с использованием метода быстрого преобразования Фурье для получения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) реализуемых колебаний. На получаемых АЧХ определялся пик, соответствующий первой резонансной частоте. Ширина

найденного пика позволяет определить коэффициент демпфирования образца ζ на основании соотношения

$$\zeta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_0}, \quad (11)$$

где ω_0 – частота резонанса, и $\omega_1 < \omega_2$ – частоты вблизи резонанса, при которых значение амплитуды уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с амплитудой резонанса.

Для проверки экспериментальных результатов расчета собственных частот и коэффициентов демпфирования с учетом модуля сдвига слоев, используется модель слоистой балки Тимошенко. Задача решается для случая линейно-упругого деформирования слоев в предположении малых деформаций.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - \left(\frac{J_\rho}{D} + \frac{F_\rho}{G} \right) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{F_\rho}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{J_\rho F_\rho}{DG} \frac{\partial^4 w}{\partial t^4} = 0 \quad (12)$$

Если в этом уравнении положить

$$D = I_2 - \frac{I_1^2}{I_0}, \quad J_\rho = I_2 - 2eI_1 + e^2 F_\rho, \quad e = \frac{\int_0^h btdt}{\int_0^h bdt}, \quad F_\rho = \sum_{m=1}^i (\rho_m b_m h_m), \quad G = \frac{bh^2}{\sum_{i=1}^k \frac{h_i}{G_i}}, \quad (13)$$

$$I_1 = \frac{b}{2} \sum_{i=1}^k E_i h_i (t_{i-1} + t_i), \quad I_2 = \frac{b}{3} \sum_{i=1}^k E_i h_i (t_{i-1}^2 + t_{i-1}t_i + t_i^2), \quad I_0 = \sum_{i=1}^k E_i b_i h_i$$

В этих выражениях E_i – модуль упругости i -го слоя в продольном направлении балки, G_i – модуль сдвига i -го слоя в плоскости изгиба, $h_i = t_i - t_{i-1}$ – толщина i -го слоя, t_i – координата i -го слоя, отсчитываемая от нижней поверхности балки, k – число слоев в алюмоплексостеклопластике.

Решение трансцендентного уравнения относительно частоты ω , вообще говоря, комплексной, построена численно с использованием Wolfram Mathematica. Для нахождения коэффициентов демпфирования алюмоплексостеклопластика, при решении уравнения 12 применен метод

комплексных модулей. В соответствии с этим методом, значение собственных частот и коэффициентов демпфирования определяется следующим образом

$$\omega_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\operatorname{Re}[(\omega_i^*)^2]}; \quad \eta_i = \frac{\operatorname{Im}[(\omega_i^*)^2]}{\operatorname{Re}[(\omega_i^*)^2]} \quad (14)$$

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований динамических характеристик трехслойных сэндвич-балок с несущими слоями из 5 слойного алюмокомпозитного пластика и полиимидного наполнителя. Методика проведения испытаний аналогична, приведенной в главе 3.

Механические свойства несущих слоев 5 слойного алюмокомпозитного пластика предварительно определены в квазистатических испытаниях на осевое растяжение, в частности определен эффективный модуль упругости материала, который был использован для оценки изгибной жесткости и собственных частот трехслойных сэндвич-балок

Модуль сдвига полиимидного наполнителя определен по результатам испытаний изготовленных трехслойных образцов на трехточечный изгиб

$$w = \frac{PL^3}{48D} \left(1 + 12 \frac{D}{SL^2} \right), \quad (15)$$

где w – прогиб по центру образца, P – приложенное усилие,

$D = \frac{EbH^2h}{2}$ – изгибная жесткость трехслойной балки, вычисляемая с учетом

известного значения модуля упругости несущих слоев в пренебрежении влияния изгибной жесткости наполнителя,

L – расстояние между опорами, которое в испытаниях составляло 200 мм,

$S = \frac{5}{6}Gb \frac{(H + 2h)^2}{H}$ – жесткость наполнителя на сдвиг, вычисляемая с учетом

искомого модуля сдвига наполнителя G и в пренебрежении податливости на сдвиг несущих слоев.

Для оценки значения частоты первой собственной формы колебаний ω консольно-закрепленного образца применено решение

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1.875}{L} \right)^2 \sqrt{\left(\frac{D_1}{\mu} \right)}, \quad (16)$$

где L – длина балки, $D_1 = \frac{Ebh^3}{12}$ – изгибная жесткость балки, $\mu = bh\rho$ – погонная масса балки.

В заключении диссертационной работы перечислены основные результаты и возможные области их применения.

Основные результаты диссертационной работы:

– определены эффективные механические свойства 5 слойного алюмопестклопластика на основании модифицированного аналитического решения, сопоставленного с результатами испытаний на одноосное растяжение. Определены динамические характеристики образцов с учетом межслоевых сдвиговых деформаций;

– дана оценка значения межслоевой прочности 17 слойного алюмопестклопластика по результатам испытаний на осевое сжатие образцов с надрезами;

– получены значений эффективного модуля упругости и модуля сдвига 17 слойного алюмопестклопластика по результатам испытаний на изгиб и на основании микромеханической модели слоистого композита. Проведено исследование механизмов разрушения образцов. Выявлена зависимость характера разрушения образцов от величины их удлинения (L/h). Исследовано деформированное состояние образцов 17 слойного алюмопестклопластика при испытании на трехточечный изгиб методом корреляции цифровых изображений, выявлена концентрация сдвиговых деформаций в центральных слоях пестклопластика;

– определены динамические характеристики трехслойных сэндвич балок с внешними несущими слоями из алюмопестклопластика.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в журналах базы Scopus (1) и из списка ВАК РФ (2-4):

1. Y. Solyaev, S. Lurie, O. Prokudin, V. Antipov, L. Rabinskiy, N. Serebrennikova, V. Dobryanskiy. Elasto-plastic behavior and failure of thick GLARE laminates under bending loading. Composites Part B 200 (2020) 108302, Volume 200, 1 November 2020, 108302 <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108302>;

2. Антипов В. В., Прокудин О. А., Лурье С. А., Серебренникова Н. Ю., Соляев Ю. О., Коновалов А. Н. Оценка межслоевой прочности алюмокомпозитов по результатам испытаний образцов на трехточечный изгиб. Вестник Московского авиационного института – 2019. –Т. 26. – №. 2. – С. 229-237;

3. О. А. Прокудин, Ю. О. Соляев, А. В. Бабайцев, А. В. Артемьев, М. А. Коробков. Динамические характеристики трехслойных балок с несущими слоями из алюмокомпозитов. Вестник ПНИПУ, Механика – № 4, 2020. doi: 10.15593/perm.mech/2020.4.22;

4. Прокудин О.А., Рабинский Л.Н., Чан Кует Тханг. Определение динамических характеристик металлополимерного слоистого стержня// Труды МАИ. 2021 – № 120.

Прочие публикации по тематике диссертационной работы:

5. Прокудин О. А., Добрянский В. Н. Исследование межслоевой прочности композиционных материалов на основе алюмокомпозитов. Международная молодежная научная конференция «XLV Гагаринские чтения» Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского (ИПМех РАН), 17 апреля 2019г. С. 971

6. Прокудин О. А., Бабайцев А. В. Определение характеристик межслоевой жесткости и прочности образцов алюмокомпозитов в испытаниях на изгиб. Всероссийская научная конференция с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и

гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, посвященная 30-летию ИПРИМ РАН, 20 ноября 2019г С. 76.

7. Прокудин О. А., Соляев Ю. О., Добрянский В. Н. Определение межслоевых характеристик жесткости и прочности алюмокомпозитов. Материалы XXVI международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А. Г. Горшкова. Вятчи, 16-20 марта 2020 г, том 1. С. 188-189

8. Прокудин О. А., Соляев Ю. О., Бабайцев А. В. Исследование эффектов межслоевого сдвига в металлополимерных композитах методом корреляции цифровых изображений. Международная конференция «Космические системы». 27 апреля 2021 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2021. С. 50.

9. Прокудин О. А., Соляев Ю. О., Рабинский Л. Н. Чан Куэт Тханг. Динамические испытания сэндвич балок с несущими слоями из СИАЛ. Материалы XXVII международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А. Г. Горшкова. Вятчи, 17-21 мая 2021 г, том 1. С. 190

10. Solyaev, Yury; Prokudin, Oleg; Babaytsev, Arseniy. On the interlaminar shear deformations in the thick GLARE laminates. 24th International Conference on Composite Structures. Faculty of Engineering, University of Porto, Portugal, 14-16 June 2021, Pg 106.