

На правах рукописи



НГУЕН ДАК КУАНГ

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗОК
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛА
КОМПОЗИТНЫХ ПАНЕЛЕЙ**

Специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2015

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

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор,
Дудченко Александр Александрович

Официальные оппоненты: **Смердов Андрей Анатольевич,**
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Космические аппараты и
ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Хрущов Михаил Михайлович,
кандидат физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник ФГБУН «Институт
машиноведения им. А.А. Благонравова» Российской
академии наук (ИМАШ РАН).

Ведущая организация: ФГБУН «Институт прикладной механики»
Российской академии наук (ИПРИМ РАН).

Защита состоится «25» марта 2015 г. в «14⁰⁰» часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.05 в ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, дом 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте:

http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=53817

Автореферат разослан «24» января 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

 Федотенков Г.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Широкое применение нашли композиционные материалы в авиационной и космической технике, где используются такие их свойства, как высокие удельные характеристики прочности и жесткости, стойкость к воздействию температур и к вибрационным нагрузкам, малый удельный вес и др. Из этих материалов изготавливаются элементы планера самолета, отсеки ракет и космических аппаратов. При эксплуатации летательные аппараты и космические объекты, которые находятся на околоземной орбите и в затененных областях космоса, подвергаются неоднократным воздействием нестабильных температурных режимов (диапазон изменения температур лежит в пределах $113\text{ K} - 393\text{ K}$). В результате конструкции из композиционных материалов за срок службы испытывают в полете многократные циклические температурные перепады, которые воздействуют как нагрузки от температурного поля. Из-за разницы между коэффициентом линейного температурного расширения волокна и матрицы на порядок и более композит будет испытывать переменные термические воздействия, что в результате приводит к значительному изменению его механических характеристик (модулей упругости) и разрушению конструкций. К исследованию температурных воздействий и исследованию поведения разрушения композитов под действием циклических механических и температурных нагрузок приступили сравнительно недавно. Однако все, известные нам работы ограничивались, как правило, изучением закономерностей термоусталостного разрушения в условиях стационарных режимов циклических термических напряжений. В связи с этим исследования процессов накопления и деградации механических характеристик композиционных материалов при термоциклировании имеют важное значение для обеспечения безопасного полета летательных аппаратов и увеличения их надежности и ресурса. Поэтому, тема диссертации, посвященная исследованием влияния термоциклических нагрузок на механические характеристики материала композитных панелей является **актуальной.**

Степень разработанности диссертации.

Степень разработанности диссертации полностью соответствует названию диссертации и поставленной цели работы.

Цель работы. Целью диссертационной работы является исследование влияния циклического воздействия температуры на характер накопления дефектов и изменение величин механических характеристик материала. Поставленная цель достигается на основании решения следующих задач:

1. Построение градиентной модели термоупругости многослойной композитной панели для определения НДС.
2. Построение моделей деградации механических характеристик (модулей упругости) слоев и эффективных характеристик многослойных композиционных материалов при циклическом нагружении с учетом воздействия температуры.
3. Проведение экспериментальных исследований по определению изменения величин механических характеристик при термоциклировании и сравнение

полученных опытных данных испытания с теоретическими результатами для проверки адекватности разработанного метода.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана методика расчета НДС для многослойной композитной панели в рамках градиентной модели термоупругости.
2. Построена модель деградации механических характеристик слоистого композита при циклическом нагружении.
3. Проведено исследование влияния воздействия температуры на изменение свойств механических характеристик.
4. Проведено сравнение влияния циклических нагрузок без учета температуры и с учетом температуры на изменение значений механических характеристик композиционного материала.
5. Проведенные автором экспериментальные исследования подтвердили правильность выбора модели деградации для решения задачи определения накопления дефектов, влияющих на свойства материала композитных панелей при термоциклировании.

Теоретическая и практическая значимость работы заключаются в разработке расчетного метода, основанного на использовании градиентной модели термоупругости, позволяющего получить изменение НДС и механических характеристик в многослойном композиционном материале и оценить влияние температурного воздействия на свойства композиционного материала при эксплуатации авиационной техники.

Методы исследования.

При решении поставленных задач использовались вариационный принцип и аналитические методы моделирования процессов деградации механических характеристик композиционного материала. Для идентификации свойств монослоя композита привлекалась система компьютерного моделирования свойств композиционных материалов «DIGIMAT». Для проведения конечно-элементных расчетов был использован программный комплекс «ANSYS». Для аналитических расчетов привлекалась система символьных вычислений «MATHEMATICA». Экспериментальное исследование процессов деградации свойств композитов при термоциклировании проводилось на испытательной машине «INSTRON» с применением программы обеспечения «BLUEHILL 3» для измерений и регистрации параметров.

Достоверность результатов обосновывается использованием строгих подходов градиентной модели теории упругости, механики слоистых композитов и математических методов, а также совпадением результатов аналитических и численных расчетов, полученных автором, с экспериментальными данными, приведенными в литературе, с результатами расчетов других авторов, а также с результатами экспериментальных исследований, проведенных самим автором.

На защиту выносятся результаты проведенных автором исследований по вопросам теории расчета НДС многослойного композита, методики моделирования процессов деградации механических свойств с учетом циклического воздействия температуры, результаты экспериментальных исследований влияния термоциклирования на механические характеристики

образцов из ПКМ, сравнение результатов испытаний с результатами моделирования.

Материалы диссертации **внедрены** в читаемый курс «Термоупругость композиционных материалов» на кафедре «Прочность авиационных и ракетно–космических конструкций».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены на международных конференциях, семинарах и симпозиумах, в том числе:

1. Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновация в авиации и космонавтике–2013», 16–18 апреля 2013 г., Москва, Российская Федерация.

2. XIX международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкции и сплошных сред» им. А. Г. Горшкова, 18–22 февраля 2013 г., Кременки, Калужская область, Российская Федерация.

3. Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновация в авиации и космонавтике–2014», 22–24 апреля 2014 г., Москва, Российская Федерация.

4. Международная конференция «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций», 10–13 ноября 2014 г., Москва, Российская Федерация.

5. Международный научный семинар «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы», 8–10 декабря 2014 г., Москва, Российская Федерация.

Публикации. По результатам научных исследований в рамках диссертационной работы опубликовано 7 работ, в том числе 3 статьи в периодических изданиях, включенных в перечень ВАК РФ [1, 2, 3]; 4 публикации в тезисах докладов международных конференций, семинаров и симпозиумов [4, 5, 6, 7].

Личный вклад. Постановка задач исследования; расчет НДС многослойного композита с учетом межслоевых прослоек при температурном воздействии; постановка задачи для среды, состоящей из ортотропных слоев, с использованием модели градиентной теории термоупругости; тестирование аналитической модели на основе сопоставления с результатами конечно-элементного моделирования; результаты разработки метода выбора параметров модели деградации механических характеристик слоистых композитов; программная реализация используемых математических моделей; проведенные расчеты и сравнение расчетных данных с известными экспериментальными данными; проведение испытания, обработка и сравнение теоретического расчета с данными испытания в диссертационной работе выполнены лично соискателем.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 121 страницу, из них 8 занимает список использованных источников. Список используемой литературы включает 72 наименований (из них 26 на иностранном языке).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертации, формулируются цели работы, проанализированы основные проблемы. Отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Приведены основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту, сведения об апробации результатов работы и описана структура диссертации.

В первой главе представлен обзор литературы по поставленным в диссертационной работе задачам. Отмечены, что основные достижения в механике деформирования композиционных материалов связаны с работами А. Л. Абибова, С. А. Амбарцумяна, Ф. П. Белянкина, В. В. Болотина, Л. Браутмана, В. В. Васильева, А. Н. Гузя, А. А. Дудченко, В. И. Королева, С. Г. Лехницкого, А. К. Малмейстера, И. Ф. Образцова, Ю. М. Тарнопольского, Г. А. Тетерса и других российских и зарубежных ученых.

Основные результаты по задаче термоупругости в рамках градиентной теории построены и развиты в работах Э. Л. Аэро, П. А. Белова, Д. Б. Волков-Богородского, Е. В. Кувшинского, С. А. Лурье, Л. И. Седова, Р. А. Тупина, Е. С. Aifantis, E. Cosserat, R. D. Mindlin, G. Z. Voyiadjis и других исследователей.

Модели деградации свойств в многослойных волокнистых и наполненных материалов при статическом, повторно-статическом и циклическом нагружениях и их анализ изучались в работах В. В. Болотина, Г. А. Ванина, С. А. Лурье, А. М. Скудры и других.

Изучение усталости композитов при термоциклировании отражено в экспериментальные данные зарубежных работ С. Цуй, L. F. Donald, F. Gao, С. Henaff-Gardin, M. С. Lafarie-Frenot, G. Lubineau и других авторов.

Во второй главе диссертации дается решение задачи термоупругости в рамках градиентной модели для слоистых изотропных и ортотропных сред. Математическая постановка модели однопараметрического варианта градиентной теории межфазного слоя (которую можно рассматривать, как вариант теории упругости среды Тупина) в общем виде определяется следующим функционалом Лагранжа

$$L = A - U_V = \frac{1}{2} \iiint_V [C_{ijmn} \frac{\partial R_i}{\partial x_j} \frac{\partial R_m}{\partial x_n} + \left(C_{ijrk} \frac{\partial^2 R_i}{\partial x_k \partial x_j} \right) \left(C_{mnrl} \frac{\partial^2 R_m}{\partial x_l \partial x_n} \right) \frac{1}{C}] dV. \quad (1)$$

где L – Лагранжиан модели, $A = \iiint_V P_i^V R_i dV + \iint_F P_i^F R_i dF$ – работа внешних объемных P_i^V и поверхностных сил P_i^F , R_i – вектор перемещений, U_V – потенциальная энергия деформаций среды, C_{ijmn} – тензор классических модулей упругости, C – один неклассический физический градиентный параметр, определяющий масштабные эффекты когезионного взаимодействия в объеме, x_j – компоненты пространственного радиус-вектора, V – рассматриваемый объем.

Запишем вариационное уравнение

$$\begin{aligned} \delta L = & \iiint_V [C_{ijrk} \frac{\partial^2(\dots)}{\partial x_j \partial x_k} \left(R_r - \frac{1}{C} C_{mnrl} \frac{\partial^2 R_m}{\partial x_l \partial x_n} \right) + P_i^V] \delta R_i + \\ & + \oint_F [P_i^F - C_{ijrk} n_j \frac{\partial}{\partial x_k} (R_r - \frac{1}{C} C_{mnrl} \frac{\partial^2 R_m}{\partial x_l \partial x_n})] \delta R_i dF - \\ & - \oint_F \frac{1}{C} C_{rqmn} \frac{\partial^2 R_m}{\partial x_q \partial x_n} \delta (C_{rpij} n_p \frac{\partial R_i}{\partial x_j}) dF = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Контактная задача: Индексами «1» и «2» определяют переменные и физические параметры контактирующих тел. В соответствии с (2) на поверхности контакта должны отсутствовать скачки вектора перемещений и вектора полных напряжений. При этом полная система условий контакта принимает вид

$$\begin{aligned} R_m^{(1)} &= R_m^{(2)}; \\ C_{ijmn}^{(1)} n_j \frac{\partial R_m^{(1)}}{\partial x_n} &= C_{ijmn}^{(2)} n_j \frac{\partial R_m^{(2)}}{\partial x_n}; \\ C_{ijrk}^{(1)} n_j \frac{\partial}{\partial x_k} (R_r^{(1)} - \frac{1}{C_{(1)}} C_{mnrl}^{(1)} \frac{\partial^2 R_m^{(1)}}{\partial x_l \partial x_n}) &= C_{ijrk}^{(2)} n_j \frac{\partial}{\partial x_k} (R_r^{(2)} - \frac{1}{C_{(2)}} C_{mnrl}^{(2)} \frac{\partial^2 R_m^{(2)}}{\partial x_l \partial x_n}); \\ \frac{1}{C_{(1)}} C_{rqmn}^{(1)} \frac{\partial^2 R_m^{(1)}}{\partial x_q \partial x_n} &= \frac{1}{C_{(2)}} C_{rqmn}^{(2)} \frac{\partial^2 R_m^{(2)}}{\partial x_q \partial x_n}. \end{aligned} \quad (3)$$

Основные соотношения термоупругости

Пусть задано распределение температуры $T = T(x, y, z)$. Полная деформация ε_{mn} есть сумма упругой ε_{mn}^e и температурной ε_{mn}^t составляющихся

$$\begin{aligned} \varepsilon_{mn} &= \varepsilon_{mn}^e + \varepsilon_{mn}^t; \\ \varepsilon_{mn}^e &= \varepsilon_{mn} - \varepsilon_{mn}^t, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\varepsilon_{mn}^t = \alpha_{mn} T$, α_{mn} – компоненты тензора коэффициентов линейного температурного расширения для анизотропного тела.

Будем рассматривать линейные, обратимые процессы. Для заданной температуры аргументами потенциальной энергии U являются полные деформации. Определяющие соотношения имеют вид

$$\begin{aligned} \sigma_{ik} &= \left(\frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{ik}} \right)_T; \\ \sigma_{ik} &= C_{ikmn} \varepsilon_{mn}^e. \end{aligned} \quad (5)$$

Согласно (4) $\varepsilon_{mn}^e = \varepsilon_{mn} - \alpha_{mn} T$ (ε_{mn} – полные деформации). Равенство (5) запишем в виде

$$\left(\frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{ik}} \right)_T = C_{ikmn} (\varepsilon_{mn} - \alpha_{mn} T). \quad (6)$$

Следовательно, потенциальная энергия с точностью до постоянной определяется равенством

$$U = \frac{1}{2} C_{ikmn} (\varepsilon_{ik} \varepsilon_{mn} - 2\varepsilon_{ik} \alpha_{mn} T). \quad (7)$$

Полные деформации связаны с перемещениями соотношениями Коши. Для изотропного тела

$$\begin{aligned} \alpha_{ij} &= 0, \quad i \neq j; \\ \alpha_{ij} &= \alpha, \quad i = j. \end{aligned} \quad (8)$$

Расчетная модель многослойной среды, в которой каждый слой изотропный. Запишем постановку задачи градиентной термоупругости для плоской деформации многослойной системы, образованной из n -слоев различных изотропных материалов. Функция температуры зависит от только z ($T = T(z)$). В таком случае следует принять, что $\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = e_x = const$; $w = w(z)$. Разрешающее уравнение при этом имеет вид

$$(\lambda_i + 2\mu_i) \frac{\partial^2 w_i}{\partial z^2} - \frac{(\lambda_i + 2\mu_i)^2}{C_i} \frac{\partial^4 w_i}{\partial z^4} + \alpha_i \left(\frac{(\lambda_i + 2\mu_i)^2}{C_i} \frac{\partial^3 T_i}{\partial z^3} - 3K_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) = 0. \quad (9)$$

Краевые условия:
при $z = 0$

$$\begin{aligned} w_1 &= 0; \\ \frac{(\lambda_1 + 2\mu_1)^2}{C_1} \left(\frac{\partial^2 w_1}{\partial z^2} - \alpha_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \right) &= 0; \end{aligned} \quad (10)$$

при $z = z_i$

$$\begin{aligned} w_i &= w_{i+1}; \\ \frac{\partial w_i}{\partial z} &= \frac{\partial w_{i+1}}{\partial z}; \\ \frac{(\lambda_i + 2\mu_i)^2}{C_i} \left(\frac{\partial^2 w_i}{\partial z^2} - \alpha_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) &= \frac{(\lambda_{i+1} + 2\mu_{i+1})^2}{C_{i+1}} \left(\frac{\partial^2 w_{i+1}}{\partial z^2} - \alpha_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z} \right); \\ (\lambda_i + 2\mu_i) \varepsilon_{zi} + \lambda_i e_x + \lambda_i e - \frac{(\lambda_i + 2\mu_i)^2}{C_i} \frac{\partial^3 w_i}{\partial z^3} + \\ + \alpha_i \left(\frac{(\lambda_i + 2\mu_i)^2}{C_i} \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} (-3K_i T_i) \right) &= (\lambda_{i+1} + 2\mu_{i+1}) \varepsilon_{z(i+1)} + \lambda_{i+1} e_x + \lambda_{i+1} e - \\ - \frac{(\lambda_{i+1} + 2\mu_{i+1})^2}{C_{i+1}} \frac{\partial^3 w_{i+1}}{\partial z^3} + \alpha_{i+1} \left(\frac{(\lambda_{i+1} + 2\mu_{i+1})^2}{C_{i+1}} \frac{\partial^2 T_{i+1}}{\partial z^2} (-3K_{i+1} T_{i+1}) \right); \end{aligned} \quad (11)$$

при $z = H$

$$\begin{aligned}
& (\lambda_n + 2\mu_n)\varepsilon_{zn} + \lambda_n e_x + \lambda_n e - \frac{(\lambda_n + 2\mu_n)^2}{C_n} \frac{\partial^3 w_n}{\partial z^3} + \\
& + \alpha_n \left(\frac{(\lambda_n + 2\mu_n)^2}{C_n} \frac{\partial^2 T_n}{\partial z^2} (-3K_n T_n) \right) = 0; \\
& \frac{(\lambda_n + 2\mu_n)^2}{C_n} \left(\frac{\partial^2 w_n}{\partial z^2} - \alpha_n \frac{\partial T_n}{\partial z} \right) = 0.
\end{aligned} \tag{12}$$

Выражения для нормальных напряжений в каждом i -ом слое и интегральные уравнения равновесия в направлении осей x и y имеют вид

$$\sigma_x^i = (\lambda_i + 2\mu_i)e_x + \lambda_i e + \lambda_i \frac{\partial w_i}{\partial z} - 3K_i \alpha_i T_i; \tag{13}$$

$$\sigma_y^i = (\lambda_i + 2\mu_i)e + \lambda_i e_x + \lambda_i \frac{\partial w_i}{\partial z} - 3K_i \alpha_i T_i.$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^n \int_{ih}^{(i+1)h} \sigma_x^i(z) dz = 0; \\
& \sum_{i=1}^n \int_{ih}^{(i+1)h} \sigma_y^i(z) dz = 0.
\end{aligned} \tag{14}$$

В качестве примера была рассмотрена задача определения НДС двухслойной изотропной структуры (рис. 1), неравномерно-нагретой в направлении нормали к поверхности. Исходные данные для расчета: $T_1 = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_1 = 0,2 \text{ мм}$, $h_2 = 1 \text{ мм}$, $E_1 = 210 \text{ ГПа}$, $\nu_1 = 0,23$, $\alpha_1 = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $C_1 = 10^7 \text{ ГПа/мм}^2$, $E_2 = 200 \text{ ГПа}$, $\nu_2 = 0,3$, $\alpha_2 = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $C_2 = 10^7 \text{ ГПа/мм}^2$. На рис. 2а-2б представлено тестовое сравнение по напряжениям полученного аналитического решения с расчетами, проведенными в системе «ANSYS».

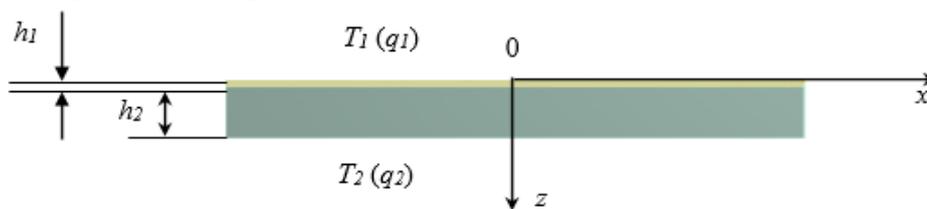


Рис. 1. Двухслойная структура

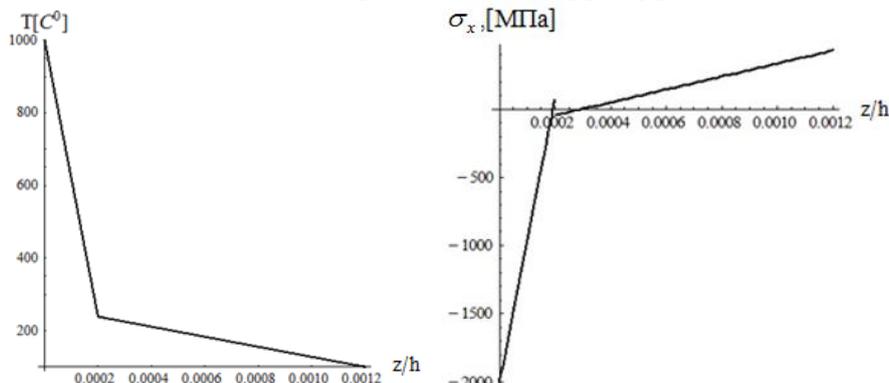


Рис. 2а. Аналитическое моделирование термоупругих напряжений в двухслойной композитной структуре.

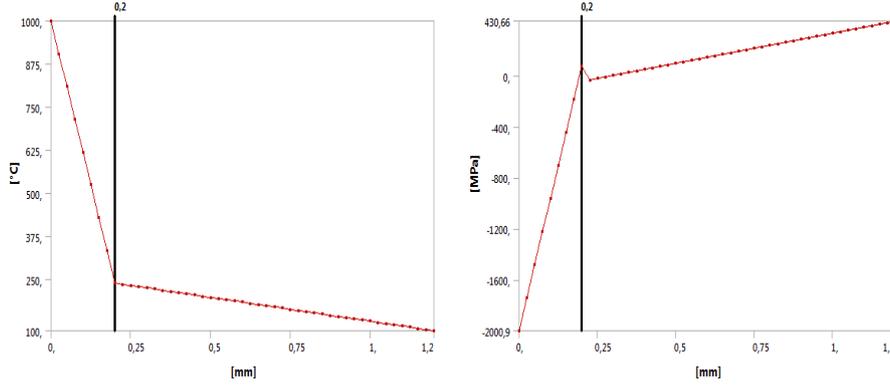


Рис. 2б. Конечно-элементное моделирование термоупругих напряжений в двухслойной композитной структуре.

Расчетная модель многослойной композитной панели под действием температуры. Модели расчета (рис. 3) представляют симметричные слоистые композиты из n -х слоев с прослойкой между слоями. Предполагаем что,

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = e_x = const, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = e_y = const \quad \text{и} \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = g_{xy} = const.$$

Разрешающие уравнения для n слоев и $n-1$ прослоек

$$b_{33}^i \frac{\partial^2 w_i^c}{\partial z^2} - \frac{(b_{33}^i)^2}{C_i^c} \frac{\partial^4 w_i^c}{\partial z^4} + \alpha_3 \frac{(b_{33}^i)^2}{C_i^c} \frac{\partial^3 T_i^c}{\partial z^3} - b_{T3}^i \frac{\partial T_i^c}{\partial z} = 0; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & (2\mu_j + \lambda_j) \frac{\partial^2 w_j^{np}}{\partial z^2} - \frac{(2\mu_j + \lambda_j)^2}{C_j^{np}} \frac{\partial^4 w_j^{np}}{\partial z^4} + \\ & + \alpha_j \left(\frac{(2\mu_j + \lambda_j)^2}{C_j^{np}} \frac{\partial^3 T_j^{np}}{\partial z^3} - 3K_j \frac{\partial T_j^{np}}{\partial z} \right) = 0, \end{aligned} \quad (16)$$

где $i = 1 \dots n, j = 1 \dots (n-1)$.

Граничные условия:

при $z = 0$

$$w_1^c = 0;$$

$$\frac{(b_{33}^1)^2}{C_1^c} \frac{\partial^2 w_1^c}{\partial z^2} - \alpha_3^1 \frac{(b_{33}^1)^2}{C_1^c} \frac{\partial T_1^c}{\partial z} = 0. \quad (17)$$

при $z = nH + (n-1)\delta$

$$\frac{(b_{33}^n)^2}{C_n^c} \frac{\partial^2 w_n^c}{\partial z^2} - \alpha_3^n \frac{(b_{33}^n)^2}{C_n^c} \frac{\partial T_n^c}{\partial z} = 0;$$

$$b_{33}^n \frac{\partial w_n^c}{\partial z} + b_{13}^n e_x + b_{23}^n e_y + b_{36}^n t_{xy} - \frac{(b_{33}^n)^2}{C_n^c} \frac{\partial^3 w_n^c}{\partial z^3} + \alpha_3^n \frac{(b_{33}^n)^2}{C_n^c} \frac{\partial^2 T_n^c}{\partial z^2} - b_{T3}^n T_n^c = 0. \quad (18)$$

Контактные условия между слоем и прослойкой

при $z = iH + (i-1)\delta$ и $z = i(H+\delta), i = 1 \dots (n-1)$

$$\begin{aligned}
w_i^c &= w_i^{np}; \\
\frac{\partial w_i^c}{\partial z} &= \frac{\partial w_i^{np}}{\partial z}; \\
\frac{(b_{33}^i)^2}{C_i^c} \frac{\partial^2 w_i^c}{\partial z^2} - \alpha_3^i \frac{(b_{33}^i)^2}{C_i^c} \frac{\partial T_i^c}{\partial z} &= \frac{(\lambda_i + 2\mu_i)^2}{C_i^{np}} \left(\frac{\partial^2 w_i^{np}}{\partial z^2} - \alpha_i \frac{\partial T_i^{np}}{\partial z} \right); \\
b_{33}^i \frac{\partial w_i^c}{\partial z} + b_{13}^i e_x + b_{23}^i e_y + b_{36}^i t_{xy} - \frac{(b_{33}^i)^2}{C_i^c} \frac{\partial^3 w_i^c}{\partial z^3} + \alpha_3^i \frac{(b_{33}^i)^2}{C_i^c} \frac{\partial^2 T_i^c}{\partial z^2} - \\
-b_{T3}^i T_i^c &= (2\mu_i + \lambda_i) \frac{\partial w_i^{np}}{\partial z} + \lambda_i e_y + \lambda_i e_x - 3K_i \alpha_i T_i^{np}.
\end{aligned} \tag{19}$$

Выражения для нормальных напряжений в каждом i -ом слое и интегральные уравнения равновесия в направлении осей x и y имеют вид

$$\begin{aligned}
\sigma_{xi}^c &= b_{11}^i e_x + b_{12}^i e_y + b_{13}^i \frac{\partial w_i^c}{\partial z} + b_{16}^i g_{xy} - b_{T1}^i T_i^c; \\
\sigma_{yi}^c &= b_{12}^i e_x + b_{22}^i e_y + b_{23}^i \frac{\partial w_i^c}{\partial z} + b_{26}^i g_{xy} - b_{T2}^i T_i^c; \\
\tau_{xyi}^c &= b_{16}^i e_x + b_{26}^i e_y + b_{36}^i \frac{\partial w_i^c}{\partial z} + b_{66}^i g_{xy} - b_{T6}^i T_i^c; \\
\sigma_{xj}^{np} &= (2\mu_j + \lambda_j) e_x + \lambda_j e_y + \lambda_j \frac{\partial w_j^{np}}{\partial z} - 3K_j \alpha_j T_j^{np}; \\
\sigma_{yj}^{np} &= (2\mu_j + \lambda_j) e_y + \lambda_j e_x + \lambda_j \frac{\partial w_j^{np}}{\partial z} - 3K_j \alpha_j T_j^{np}; \\
\tau_{xyj}^{np} &= G \cdot g_{xy}.
\end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^n \left(\int_{(i-1)(H+h)}^{H+(i-1)(H+h)} \sigma_{xi}^c dz + \int_{H+(i-1)(H+h)}^{i(H+h)} \sigma_{xi}^{np} dz + \int_{n(H+h)}^{H+n(H+h)} \sigma_{xn}^{np} dz \right) &= 0; \\
\sum_{i=1}^n \left(\int_{(i-1)(H+h)}^{H+(i-1)(H+h)} \sigma_{yi}^c dz + \int_{H+(i-1)(H+h)}^{i(H+h)} \sigma_{yi}^{np} dz + \int_{n(H+h)}^{H+n(H+h)} \sigma_{yn}^{np} dz \right) &= 0; \\
\sum_{i=1}^n \left(\int_{(i-1)(H+h)}^{H+(i-1)(H+h)} \tau_{xyi}^c dz + \int_{H+(i-1)(H+h)}^{i(H+h)} \tau_{xyi}^{np} dz + \int_{n(H+h)}^{H+n(H+h)} \tau_{xyn}^{np} dz \right) &= 0.
\end{aligned} \tag{21}$$

Рассмотрим симметричные слоистые композиты (рис. 3) с продольно-поперечной укладкой слоев типа $[0, 90_2^o]_s$, с укладкой слоев только 0° и 45° типа $[0, \pm 45^o]_s$ и с квазиизотропной укладкой типа $[0, \pm 45^o, 90^o]_s$. В расчете используем следующие материалы с известными свойствами: температурные коэффициенты линейного расширения i -го композитного слоя $\alpha_1^i = 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_2^i = 30 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_3^i = 25 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, градиентные параметры оценивают величиной $C_i^c = 10^6 \text{ ГПа/мм}^2$, температурный коэффициент линейного расширения

прослойки $\alpha = 60 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, толщина слоя $H = 100 \text{ мкм}$, толщина прослойки $\delta = 10 \text{ мкм}$, градиентный параметр прослойки оценивает величиной $C_i^{np} = 10^7 \text{ ГПа/мм}^2$, приращение температуры среды $\Delta T = -50 \text{ } ^\circ\text{C}$. Механические характеристики композитного материала и прослойки, использованные в расчетах представляют в диссертации (таблице 2.1). Результаты расчета со сравнением в программе «ANSYS» показаны на рис. 4-6.

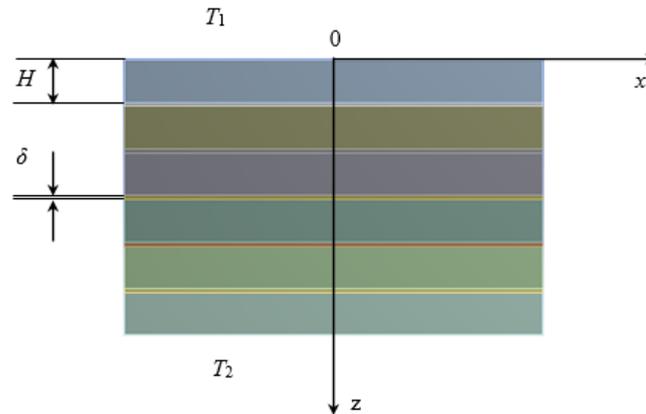


Рис. 3. многослойный композит

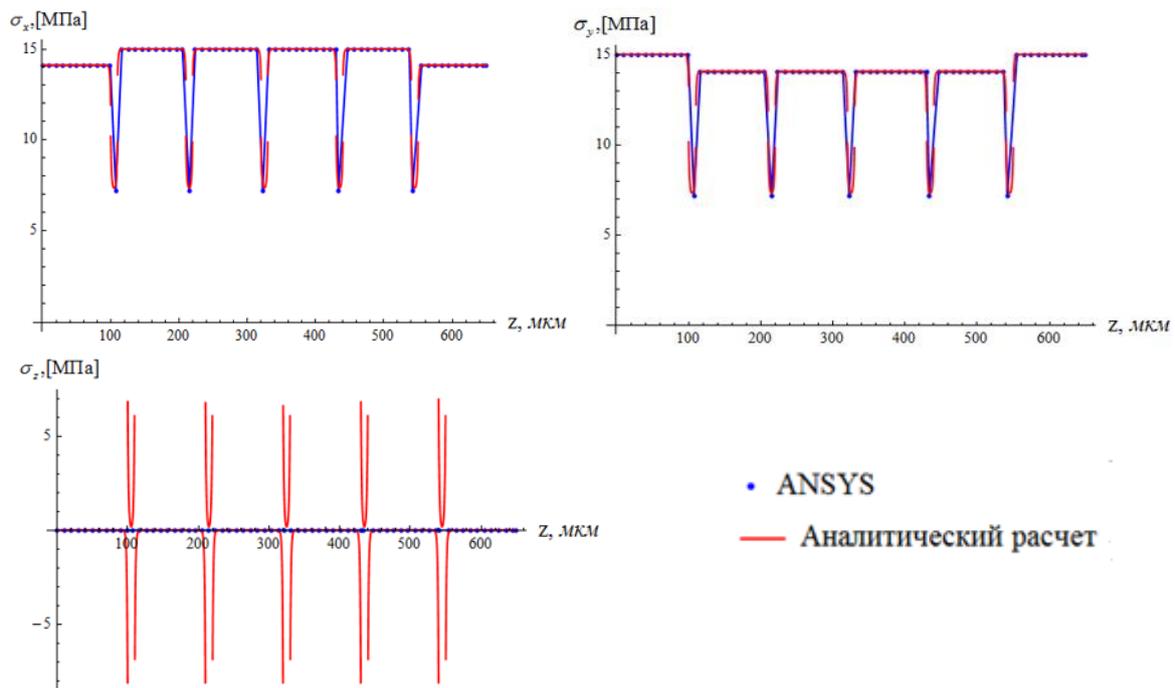


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений σ_x , σ_y и σ_z по толщине слоистого композита с продольно-поперечной укладкой слоев типа $[0, 90_2]_s$.

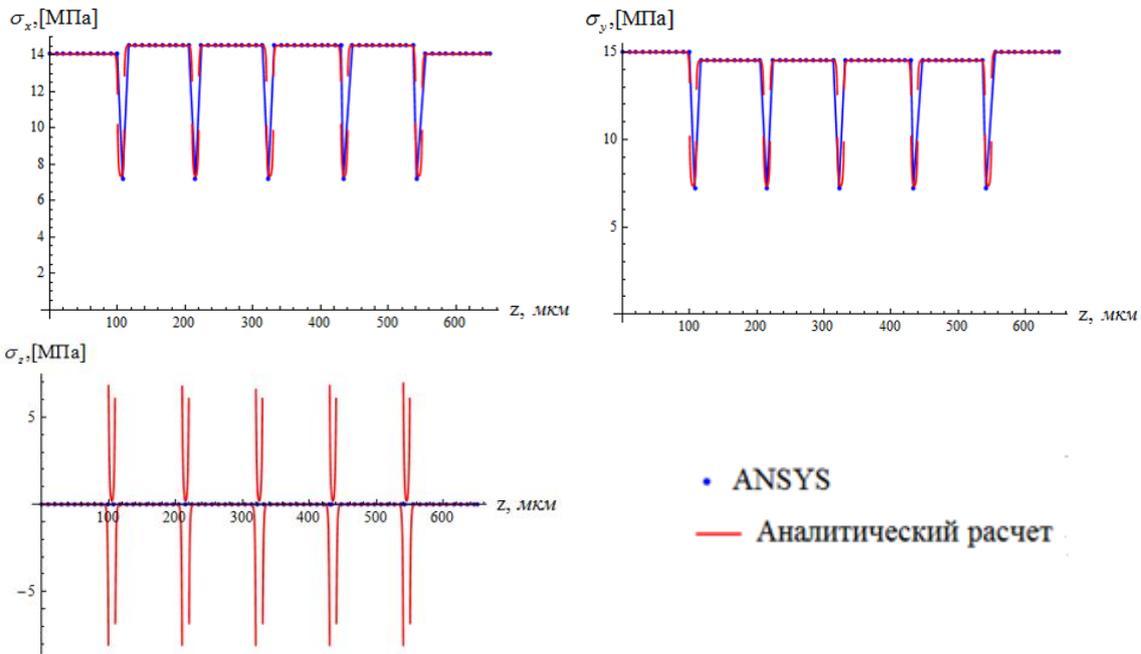


Рис. 5. Распределение нормальных напряжений σ_x , σ_y и σ_z по толщине слоистого композита с укладкой слоев только 0° и 45° типа $[0, \pm 45^\circ]_s$.

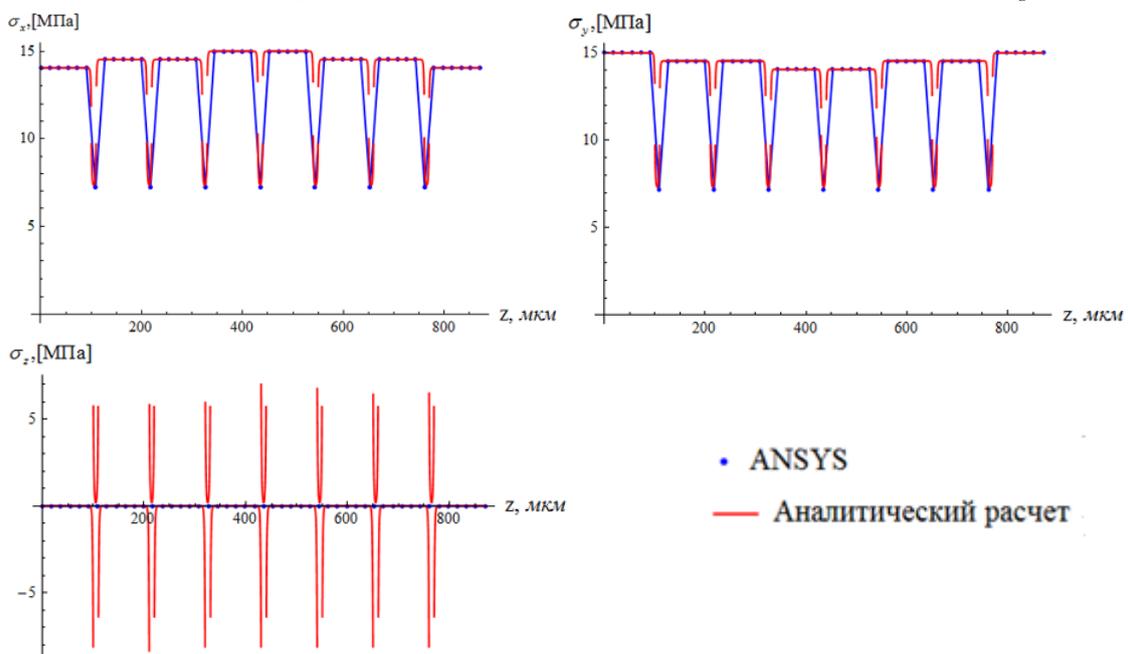


Рис. 6. Распределение нормальных напряжений σ_x , σ_y и σ_z по толщине слоистого композита с квазиизотропной укладкой типа $[0, \pm 45^\circ, 90^\circ]_s$.

В третьей главе развивается модель накопления повреждений при циклическом нагружении с учетом воздействия температуры. Рассмотрим микромеханический метод описания накопления повреждений, учитывающий особенности микродефектов. Микродефект определяется с помощью микропараметра s_i , под которым можно понимать площадь или длину микротрещины в матрице, длину отслоения волокна от матрицы, площадь или длину трещины между слоями, объем или площадь сечения поры. Для описания процесса накопления повреждений следует ввести монотонно возрастающий параметр t в качестве которого, в зависимости характера нагружения, может

рассматриваться как время либо напряжение или деформация, длина дуги нагружения или дуги деформирования и пр. Для циклического нагружения с таким параметром является номер цикла n . Введем характеристику общей поврежденности S , под которой понимается сумма всех характеристик микродефектов. Будем считать, что процессы деградации механических свойств композитов определяются величиной поврежденности S . Необходимо учитывать одновременно два процесса, являющиеся причиной приращения микромеханической поврежденности: процесса зарождения новых дефектов и процесса роста имеющихся микродефектов. Получена следующая система кинетических уравнений, описывающих процесс накопления повреждений

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= s_0 v(t, S) + b(t, S)S + a(t, S)N; \\ \frac{ds}{dt} &= f(t, s, S) \approx a(t, S) + b(t, S)s; \\ \frac{dN}{dt} &= v(t, S).\end{aligned}\quad (22)$$

С начальными условиями: $S|_{t=0} = S_0$; $s|_{t=0} = s_0$; $v|_{t=0} = v_0$.

Здесь S —характеристика общей поврежденности, под которой понимается сумма всех характеристик микродефектов, N —количество дефектов, s —микродефект, v —скорость зарождения микродефекта, $f(t, s, S)$ —функция характеризует процесс развития микродефектов.

В общем случае для модели (22) в предположении, что $v(t) = v = const$; $s(t) = s_0 = const$, то величина S имеет вид

$$S = \left[-\left(1 + \frac{m}{b_0}\right) e^{-b_0 t} + mt + \left(1 + \frac{m}{b_0}\right) \right] s_0 c, \quad (23)$$

где $m = \frac{a}{b}$, $c = \frac{v}{b}$, m, b_0, s_0, c —параметры модели.

В рассматриваемом частном случае $a = 0, b \neq 0$ (23) можно принять

$$S = (1 - e^{-b_0 t}) s_0 c, \quad (24)$$

где b_0, s_0, c —постоянные.

Вводятся модели деградации для трансверсального модуля упругости и модуля сдвига для слоистых композитов

$$E_2^i = E_{2o} \left[1 - K_E^i (1 - e^{-b_E n}) \right]; \quad G_{12}^i = G_{12o} \left[1 - K_G^i (1 - e^{-b_G n}) \right]; \quad (25)$$

$$K_E^i = K_{Eo} \left\{ \frac{\sigma_2^i + |\sigma_2^i|}{2\sigma_{2b}} \right\}^{m_0}; \quad K_G^i = K_{Go} \left\{ \left(\frac{\tau_{12}^i}{\tau_b} \right)^{m_\tau} + \alpha \left(\frac{\sigma_2^i + |\sigma_2^i|}{2\sigma_{2b}} \right)^{m_\sigma} \right\}, \quad (26)$$

где $b_E, b_G, K_E, K_G, m_0, m_\tau, m_\sigma$ —микропараметры модели, определяемые по данным испытания, E_{2o}, G_{12o} —модули упругости неповрежденного материала слоев, σ_{2b}, τ_b —предельные напряжения в слоях.

Приводятся расчеты оценки деградации механических свойств для трех исследуемых структур: слоистый композит с продольно-поперечной укладкой слоев типа $[0, 90_2]_s$, слоистый композит с укладкой слоев только 0° и 45° типа $[0, \pm 45^\circ]_s$ и слоистый композит с квазиизотропной укладкой типа $[0, \pm 45^\circ, 90^\circ]_s$. В расчете используем углерод-эпоксидный композит с свойствами, приведенными в таблице 2.1. Максимальная нагрузка при циклическом растяжении будет составлять около 0,7 от предельного напряжения данного слоистого композита при квазистатическом нагружении [11] ($\sigma_b = 547$ МПа). Предельные напряжения в слоях $\sigma_{2b} = 60$ МПа и $\tau_b = 70$ МПа. При этом известно экспериментальное значение эффективного модуля E_x (экспериментальные точки взяты из [12]).

Используя алгоритм (без учета воздействия температуры), описанный в разделах 3.4 для слоистого композита с продольно-поперечной укладкой слоев типа $[0, 90_2]_s$, находим параметры модели деградации: $K_{Eo} = 0,538$; $m_0 = 3,17$; $b_E = 8,78$; $\alpha = 0,1$. Остальные параметры модели не влияют на результат расчета для данного типа и они будут уточнять при расчете для слоистого типа $[0, \pm 45^\circ]_s$. Результаты расчета показаны на рис. 7-9.

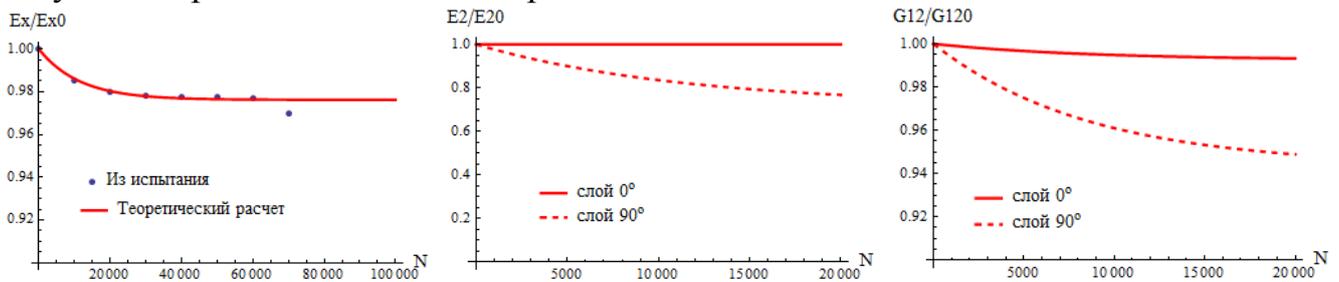


Рис. 7. Изменение эффективного модуля, поперечных модулей и модулей сдвига слоистого композита с продольно-поперечной укладкой слоев типа $[0, 90_2]_s$.

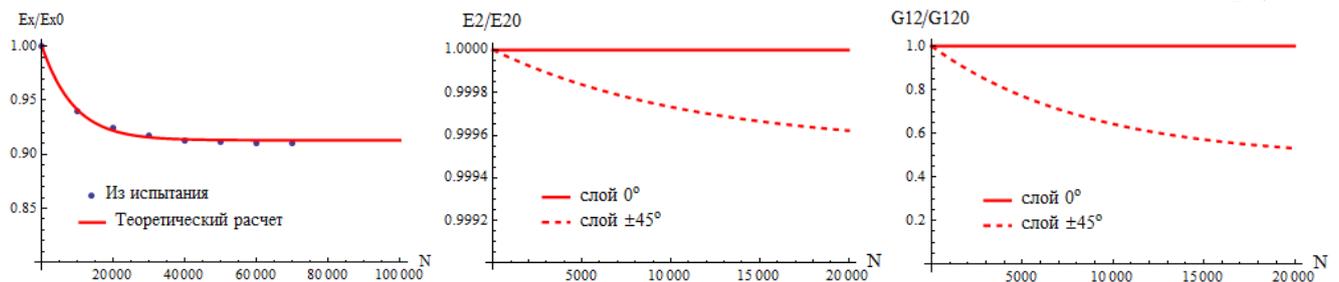


Рис. 8. Изменение эффективного модуля, поперечных модулей и модулей сдвига слоистого композита с укладкой слоев только 0° и 45° типа $[0, \pm 45^\circ]_s$.

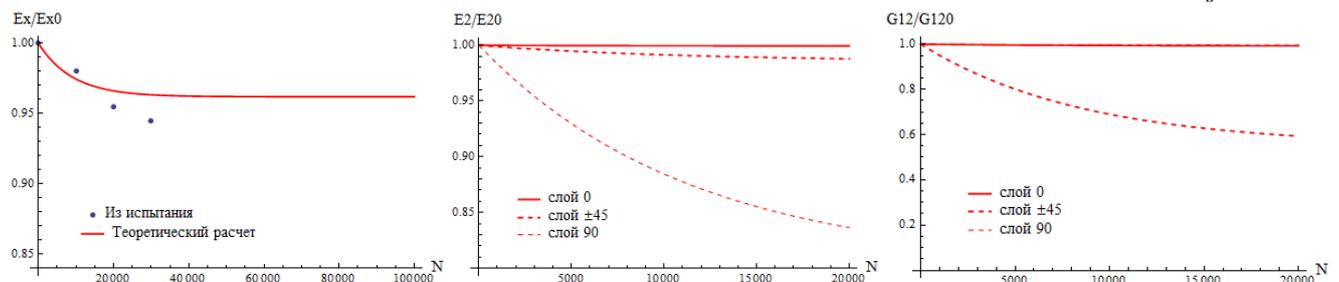


Рис. 9. Изменение эффективного модуля, поперечных модулей и модулей сдвига слоистого композита с квазиизотропной укладкой типа $[0, \pm 45^\circ, 90^\circ]_s$.

Приведем расчет изменения модуля структуры материала с учетом воздействия температуры с помощью найденных параметров модели. Результаты расчета представлены на рис. 10-12.

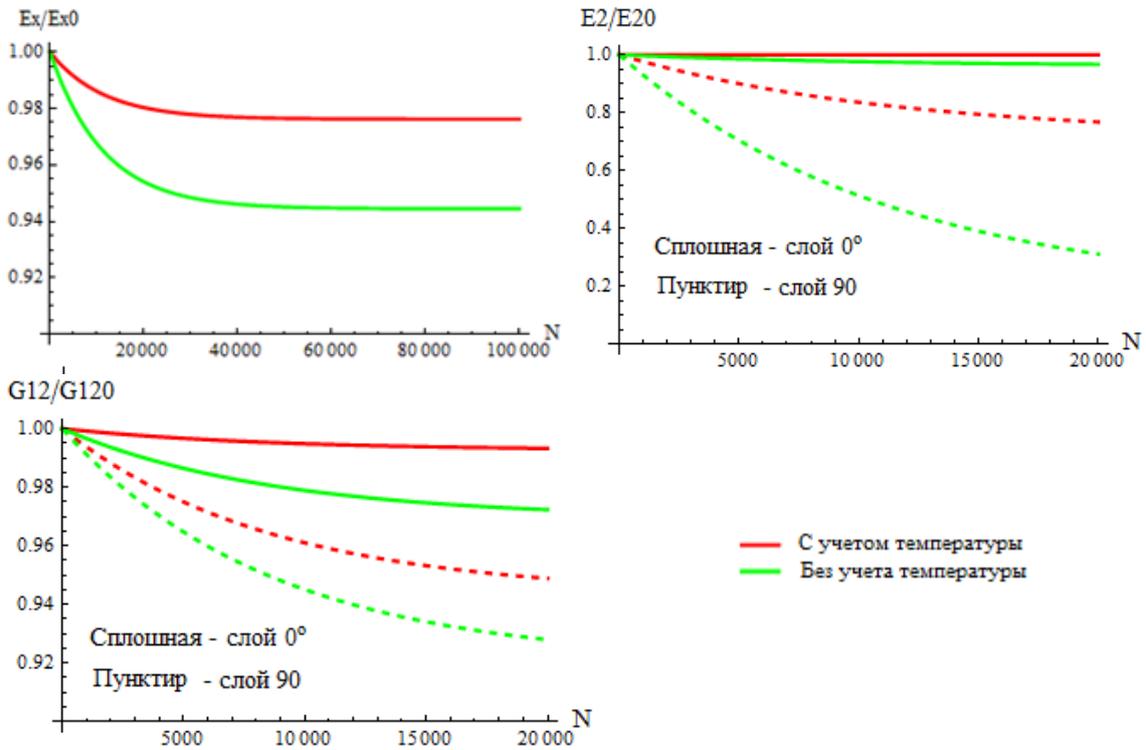


Рис. 10. Изменение эффективного модуля, поперечных модулей и модулей сдвига слоистого композита с продольно-поперечной укладкой слоев типа $[0, 90_2]_s$ с учетом воздействия температуры.

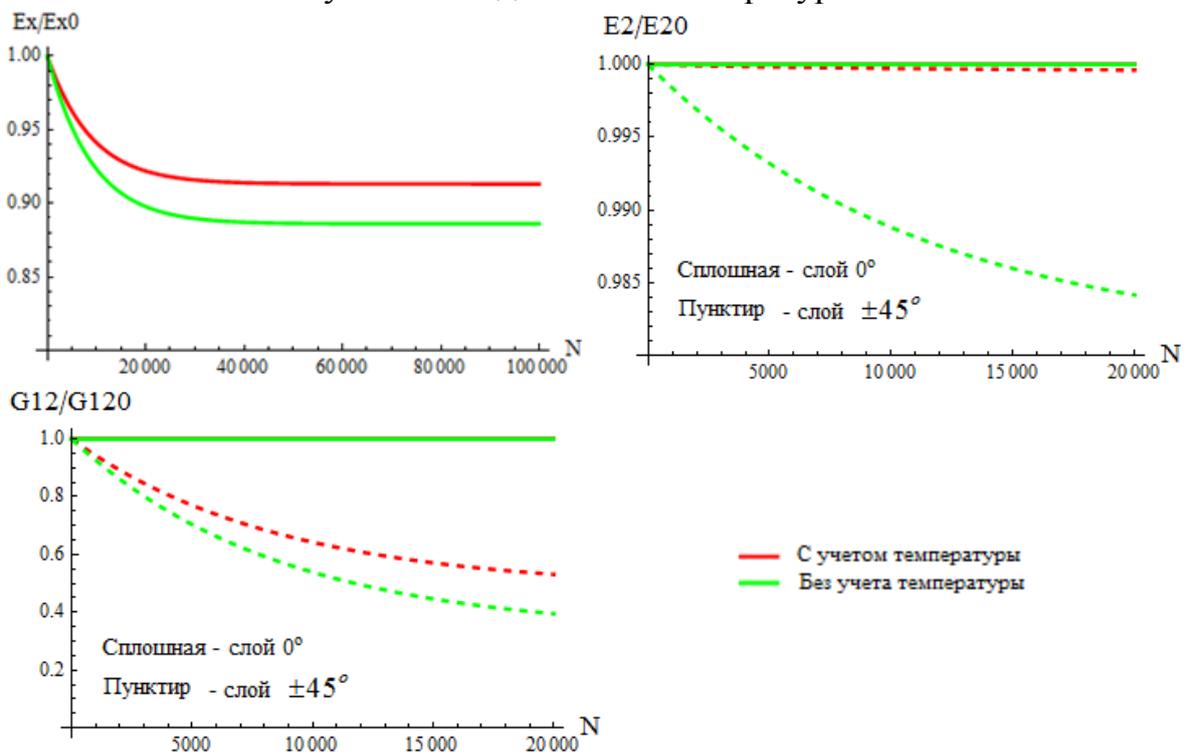


Рис. 11. Изменение эффективного модуля, поперечных модулей и модулей сдвига слоистого композита с укладкой слоев только 0° и 45° типа $[0, \pm 45]_s$ с учетом воздействия температуры.

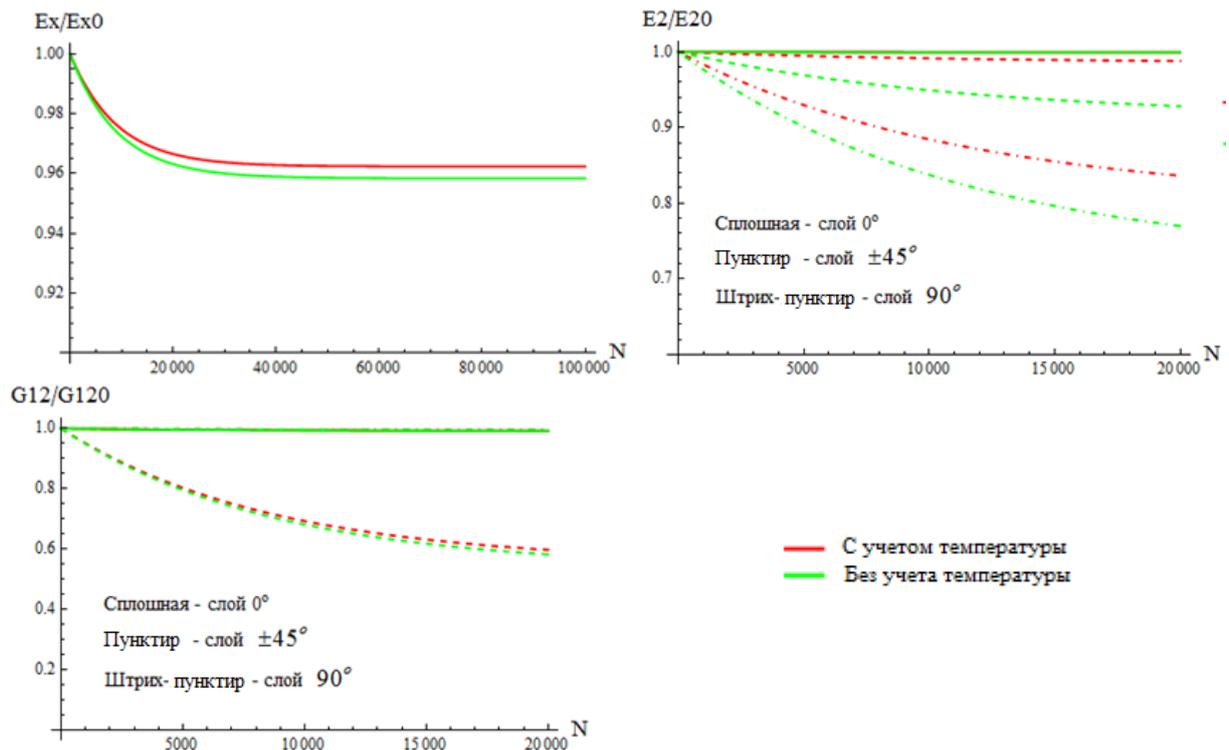


Рис. 12. Изменение эффективного модуля, поперечных модулей и модулей сдвига слоистого композита с квазиизотропной укладкой типа $[0, \pm 45^\circ, 90^\circ]_s$, с учетом воздействия температуры.

В четвертой главе приведено описание испытательной машины «INSTRON» для проведения экспериментальных исследований деградации механических свойств образцов углепластика при термоциклировании. Дается описание последовательности проведения экспериментов, представлены основные результаты, приводятся идентификация свойств материала с помощью программы «DIGIMAT» и расчет деградации механических характеристик образцов при термоциклировании с сопоставлением с данными испытания.

Универсальная испытательная машина «INSTRON» (рис. 13) позволяет проводить испытания композитов (многослойных образцов) на растяжение, сжатие, сдвиг и изгиб при температурах от -80°C до $+300^\circ\text{C}$ и скоростях деформирования $0,001-1000$ мм/мин. Машина управляется с помощью компьютера и специального программного обеспечения «BLUEHILL 3», которое включает в себя множество стандартных вычислений, например: условного предела текучести, временного сопротивления при разрыве, модуля Юнга, предельного равномерного удлинения, относительного удлинения после разрыва и др. Все результаты, которые полученные с помощью программного обеспечения «BLUEHILL 3» включают прочность при растяжении, деформацию при разрушении и модуль упругости, выдаются в виде отчета и экспортируются в программные продукты «MICROSOFT».

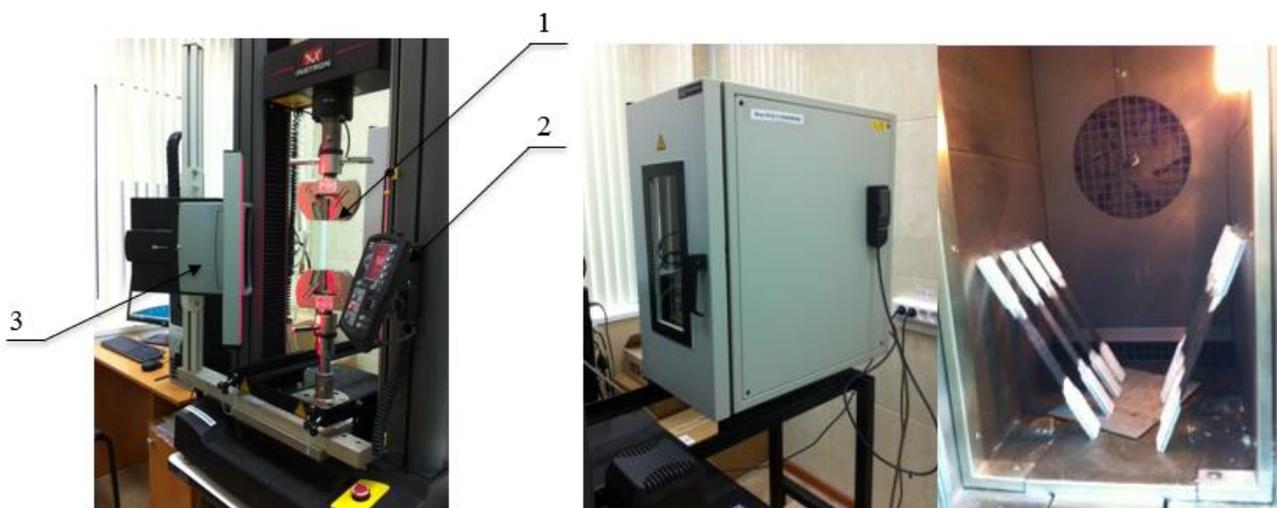


Рис. 13. Испытательная машина «INSTRON» с климатической камерой.

1. Механические клиновые захваты; 2. Пульта управления гидравлическим приводом захватов; 3. Бесконтактный оптический видеозкстензометр.

Образцы (рис. 14) для испытания подготовлены методом формования ручной укладкой из углеродных волокон HTA-40 и эпоксидной матрицы ЭДТ-10 с однонаправленной и симметричной укладкой типа $[0^\circ, 90^\circ]_s$. Размеры и количество образцов представлены в табл. 1-2.

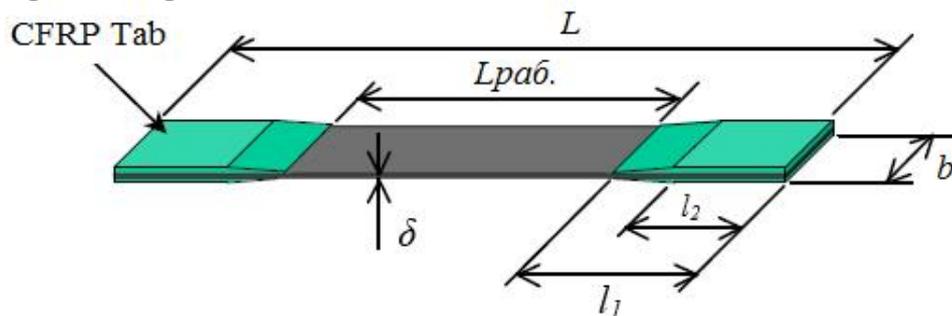


Рис. 14. Геометрическая форма образцов для испытаний.

Таблица 1

Размеры образца для испытания.

L , мм	$L_{\text{раб.}}$, мм	b , мм	δ , мм	l_1 , мм	l_2 , мм
250	150	20	1,6	40	50

Таблица 2

Количество образцов для испытаний.

№	Наименование	Число	Укладка	Монослой	Толщина, δ
1	Однонаправленный	5 шт.	0°	4 слоя по 0,2 мм	0,8 мм
2	Ортотропный	39 шт.	$[0^\circ, 90^\circ]_s$	0° : 2 слоя по 0,2 мм 90° : 4 слоя по 0,2 мм 0° : 2 слоя по 0,2 мм	1,6 мм

Испытание образцов на термоциклирование. Образцы сначала укладываются в климатической камере (рис. 13), которая позволила нам провести

испытание при $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ с помощью внутреннего нагревательного элемента в течение времени 10 мин. , потом образцы остужаются до комнатной температуры, далее охлаждают образцы жидким азотом при температуре $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение времени 3 мин. , после этого образцы остужаются до комнатной температуры. Процесс повторяется до ожидаемого числа температурных циклов. Результаты испытания на термоциклирование представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результат испытания на термоциклировании.

№ партия	Количество образцов в партии	Обозначения образцов	Число циклов
1	3	0-1;0-2;0-3	0
2	4	3-1;3-2;3-3;3-4	3
3	4	10-1;10-2;10-3;10-4	10
4	4	20-1;20-2;20-3;20-4	20
5	4	30-1;30-2;30-3;30-4	30
6	4	40-1;40-2;40-3;40-4	40
7	4	60-1; 60-2; 60-3;60-4	60
8	4	80-1; 80-2; 80-3;80-4	80
9	4	100-1; 100-2; 100-3;100-4	100
10	4	120-1; 120-2; 120-3;120-4	120

Испытание образцов на растяжение. После термоциклирования проводилось испытание образцов на испытательной машине «INSTRON» на растяжение. На рис. 16 показаны диаграммы σ – ε при испытании нескольких партий образцов, а на рис. 15 показана диаграмма σ – ε при испытании однонаправленного образца. В табл. 5 представлены результаты испытания для испытываемого пакета типа $[0^{\circ},90^{\circ}]_s$, а в табл. 4 показаны данные при испытании однонаправленного образца

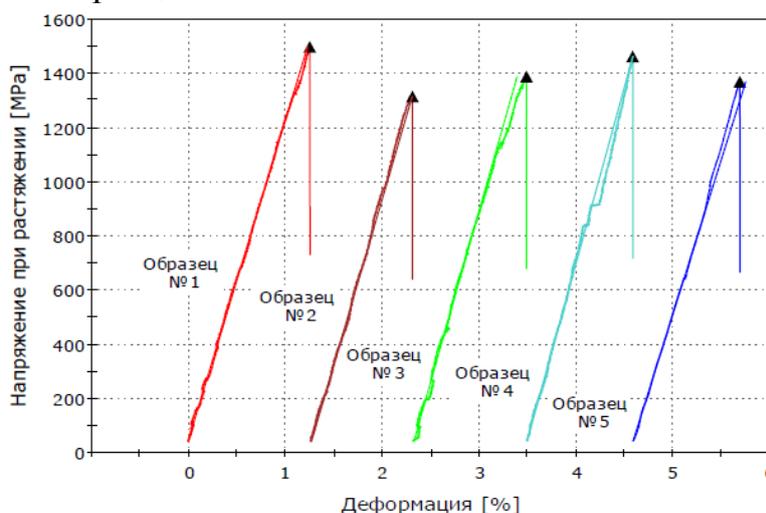


Рис. 15. Диаграмма σ – ε при испытании однонаправленного образца.

Результат испытания однонаправленного образца.

	Метка образца	Модуль ГПа	Пределная прочность МПа
	01	117,69	1495,69
	02	122,03	1313,13
	03	126,02	1386,74
	04	129,59	1461,20
	05	113,4	1367,67
Среднее		121,84	1404,89

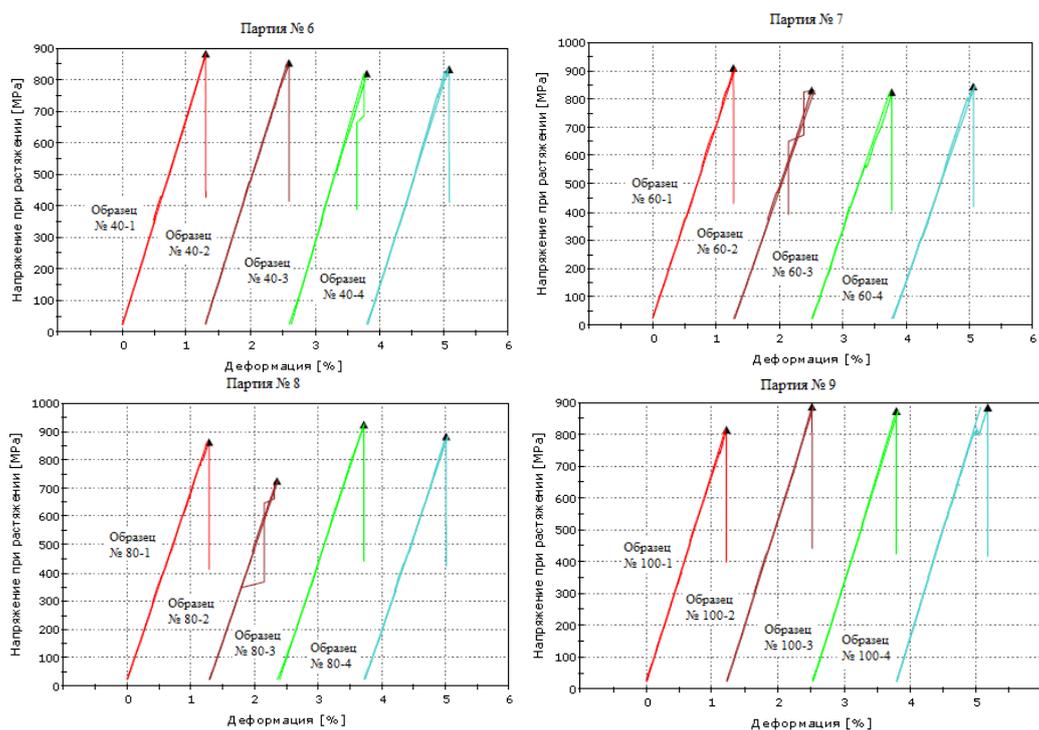
Рис. 16. Диаграмма σ – ε нескольких партий при испытании образцов типа $[0^{\circ}, 90^{\circ}]_s$

Таблица 5

Результат испытания образцов на растяжение.

№ партии	Количество циклов	Пределная деформация	Модуль ГПа	Пределные прочности МПа
1	0	0,0122	74,23	838,00
2	3	0,0126	71,37	841,36
3	10	0,0124	70,18	861,73
4	20	0,0119	72,20	897,29
5	30	0,0123	71,81	856,99
6	40	0,0127	66,58	847,44
7	60	0,0125	66,58	852,68
8	80	0,0125	66,61	848,69
9	100	0,0129	66,50	864,95
10	120	0,0124	65,52	837,63

Идентификация свойств материала с помощью программы «DIGIMAT». Исходными данными для моделирования процесса деградации механических свойств испытываемых образцов являются характеристики монослоя. Задача определения свойств монослоя, основанного на свойствах волокна НТА-40 и матрицы ЭДТ-10, решается с помощью программы «DIGIMAT». На рис. 17 показаны диаграммы σ – ε , полученные в результате КЭ анализа в связке с «DIGIMAT». Были приведены 2 анализа: однонаправленный образец и образец с продольно-поперечной укладкой типа $[0^\circ, 90^\circ]_s$. Эти диаграммы точно совпадали с диаграммами, которые получили при проведении испытания этих двух типов образцов. В итоге моделирования получим свойства монослоя, которые представляются в табл. 6.

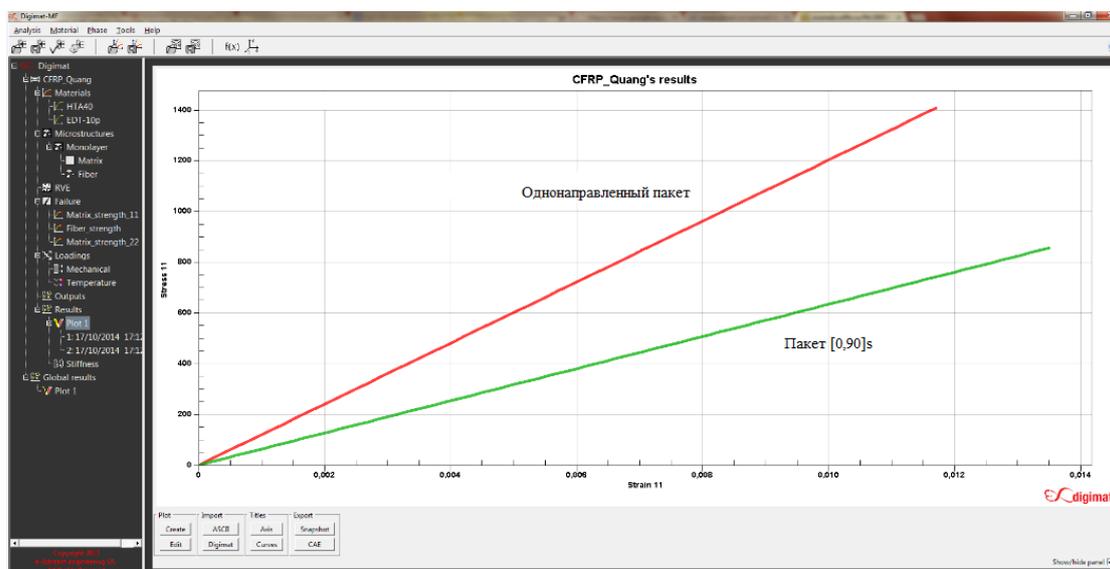


Рис. 17. Диаграмма σ – ε однонаправленного образца и образца с укладкой типа $[0^\circ, 90^\circ]_s$ (в «DIGIMAT»).

Таблица 6

Свойства монослоя.

Характеристики	Единица	Значение
E_1	МПа	120510
E_2	МПа	28000
G_{12}	МПа	2870
μ_{12}	-----	0,33
α_1	$^\circ C^{-1}$	$0,796 \cdot 10^{-6}$
α_2	$^\circ C^{-1}$	$42 \cdot 10^{-6}$
$[\sigma_2]$	МПа	32
$[\tau]$	МПа	30

Расчет деградации механических характеристик образцов при термоциклировании. В разделе 4.5 диссертации описан алгоритм расчета накопления повреждения испытываемых образцов при условии термоциклирования. При этом отмечаем, что возникающие напряжения в каждом слое только за счет воздействия температуры. Процесс расчета повторяется до числа циклов испытания и результаты представляются на рис. 18-19.

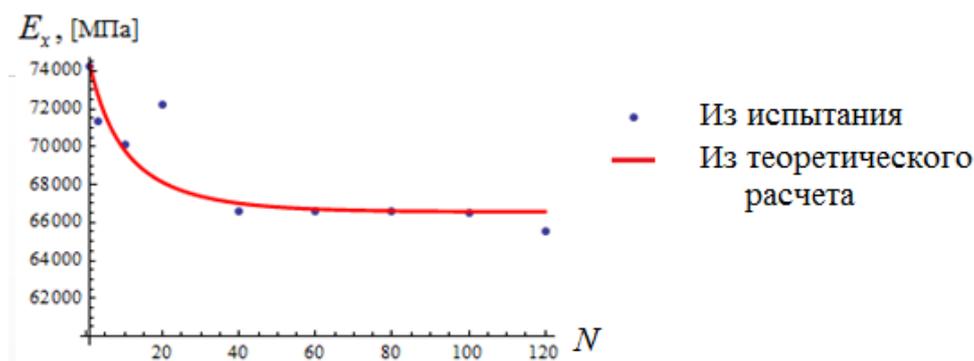


Рис. 18. Изменение эффективного модуля испытуемого пакета с укладкой типа $[0^\circ, 90^\circ]_s$.

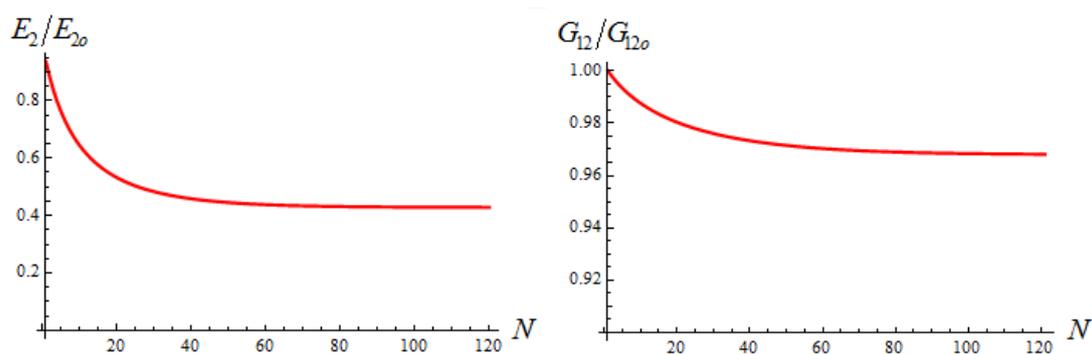


Рис. 19. Изменение поперечных модулей и модулей сдвига испытуемого пакета с укладкой типа $[0^\circ, 90^\circ]_s$.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Показано, что градиентная модель Тупина позволяет уточнить НДС для многослойных структур, слои которых состоят из изотропных или ортотропных композитных слоев.

2. Показано, что полученные результаты аналитических расчетов НДС и распределение температуры по толщине с учетом изотропных прослоек подтвержденных расчетом МКЭ.

3. Показано, что используемая методика справедлива для различных многослойных структур с различными углами направления волокон в слоях.

4. Решена новая задача термоупругости позволяющая определить падение механических характеристик композитного материала при воздействии температуры.

5. Произведено сравнение падения механических характеристик при силовом воздействии без учета и с учетом воздействия температуры.

6. Показано, что воздействие температуры существенно уменьшает механические характеристики рассматриваемых структур, т.е. оказывает существенное влияние на процесс деградации механических свойств слоистых композитов.

7. Проведены испытания образцов из углепластика на термоциклирование в диапазоне от $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ для изучения влияния температурной цикличности на механические характеристики материала.

8. Показано, что перепады температуры существенно сказываются на механические свойства, приводя к растрескиванию связующего в поперечном слое, что приводит к существенному уменьшению приведенного модуля материала ($\sim 10\%$) при дальнейшем увеличении числа циклов до 40. Дальнейшее увеличение числа циклов термоциклирования не оказывает влияния на значение модуля материала.

9. Полученные экспериментальные данные показывают падение приведенного модуля материала по числу циклов. Расчетами, которые были выполнены на основе использованной методики в диссертации, была подтверждена корректность и эффективность разработанного теоретического подхода.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Нгуен, Д. К. Исследование локальных эффектов в распределении температурных напряжений на контактных границах слоистых сред / С. А. Лурье, Ю. О. Соляев, Д. К. Нгуен, А. Л. Медведский, Л. Н. Рабинский // Электронный журнал «Труды МАИ». — 2013. — № 71. — Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=47084>.

2. Нгуен, Д. К. Градиентная модель термоупругости для слоистой композитной структуры / С. А. Лурье, А. А. Дудченко, Д. К. Нгуен // Электронный журнал «Труды МАИ». — 2014. — № 75. — Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=49674>.

3. Нгуен, Д. К. Моделирование влияния параметров вискеризации волокон на остаточное напряженно-деформированное состояние слоистых композитов / А. В. Афанасьев, Д. К. Нгуен, Ю. О. Соляев, Л. Н. Рабинский, А. А. Дудченко // Механика композиционных материалов и конструкций. — 2014. — Т. 20. — № 3. — С. 333–342.

4. Нгуен, Д. К. Исследование влияния термоциклирования на механические свойства образцов углепластика / Д. К. Нгуен, Ю. О. Соляев, А. А. Дудченко, А. В. Артемеьев // Сборник тезисов докладов международного научного семинара «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы». — М. — 2014. — С. 95.

5. Нгуен, Д. К. Распределение температуры по толщине слоев в композите с учетом межслоевой прослойки / Д. К. Нгуен, А. А. Дудченко // Сборник тезисов докладов Московской молодежной научно-практической конференции «Инновация в авиации и космонавтике–2013». Москва, МАИ, 16–18 апреля 2013 г., — М.: ООО «Принт–салон» 2013, — С. 63.

6. Нгуен, Дак Куанг. Исследование распределения нестационарных температурных полей по толщине композитной панели при воздействии теплового

удара / Дак Куанг Нгуен, А. А. Дудченко // Материалы XIX международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкции и сплошных сред» им. А. Г. Горшкова. Т. 2. Москва, 18–22 февраля 2013 г., — М.: ООО «ТР–принт» 2013.

7. Нгуен, Дак Куанг. Исследование напряженно-деформированного состояния композиционной панели под действием перепада температуры с использованием градиентной теории / Дак Куанг Нгуен // Сборник тезисов докладов Московской молодежной научно-практической конференции «Инновация в авиации и космонавтике–2014». Москва, МАИ, 22–24 апреля 2014 г., — М.: ООО «Принт–салон» 2014, — С. 85–86.