

Р. А. Турусов^{а,б,}, И. А. Поликарпова^{а,б}, М. А. Орлов^б, А. Ю. Сергеев^а,
В. И. Солодилов^{а,б}*

*^аФедеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семенова РАН,
Москва, Россия*

^бФГБОУ ВО “МГТУ им. Н. Э. Баумана”, Москва, Россия

^аМосковский государственный строительный университет, Россия

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРЕФОРМЫ ПРИ ПОСЛОЙНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ НАШИВКЕ РОВИНГА

R. A. Turusov, I. A. Polikarpova, M. A. Orlov, A. Yu. Sergeev, and V. I. Solodilov*

STRESS-STRAIN STATE OF A PREFORM MADE BY THE TAILORED FIBER PLACEMENT

Keywords: tailored fiber placement, composite material, mathematical model, contact layer, residual stresses

Simple theoretical models are proposed that describe the kinetics of stress changes in the process of tailored fiber placement and take into account technological parameters. Based on the results of experimental studies of the stress-strain state of the sewn material, the tangential and normal stresses (edge effects) that occur in its structure during layer-by-layer stitching are performed. It is shown that the magnitude and nature of the stress distribution depend on the properties of the substrate and its material, and the thickness and the compaction of the material during stitching of the roving layer.

Ключевые слова: нашивка ровинга автоматизированная, материал композитный, модель математическая, слой контактный, напряжения остаточные

Предложены простейшие теоретические модели, описывающие кинетику изменения напряжений в процессе послойной автоматизированной нашивки ровинга и учитывающие технологические

*Автор, с которым следует вести переписку: ia-polikarpova@mail.ru
Corresponding author: ia-polikarpova@mail.ru

параметры процесса. По результатам экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния нашивного материала проведены расчеты касательных и нормальных напряжений (краевые эффекты), возникающих в его структуре при послойной нашивке. Показано, что величина и характер распределения напряжений зависят от упругих свойств подложки и материала, толщины подложки и материала, а также уплотнения материала в процессе нашивки слоя ровинга.

Введение

Повышение массовой эффективности деталей и узлов ракетно-космической, авиационной, морской и транспортной техники — актуальная задача на сегодняшний день. Особый интерес представляют технологии получения изделий с неоднородными свойствами, заданными в строгом соответствии с условиями напряженного состояния изделия в ходе его эксплуатации. Одна из таких ключевых технологий — способ автоматизированной нашивки ровинга (Tailored Fiber Placement — TFP). Данный способ позволяет осуществлять укладку ровинга в строгом соответствии с заранее рассчитанной траекторией. При этом сначала определяют напряженно-деформированное состояние изделия с учетом его геометрии и условий эксплуатации, а затем рассчитывают траекторию укладки ровинга и разрабатывают управляющую программу. После этого изготовливают преформы на соответствующем оборудовании с числовым программным управлением. На следующем этапе полученная преформа пропитывается связующим под давлением (RTM) или под вакуумом (VaRTM) с последующим отверждением по заданному температурному режиму. Далее производится механическая обработка заготовки, если необходимо.

В научной литературе отмечен интерес к исследованию изделий и испытаний их с целью улучшения физико-механических свойств. В [1] представлены результаты исследования образцов с использованием процесса TFP, армированных в соответствии с рассчитанной траекторией, с целью применения их в составе суппортов, рам и других элементов конструкций велосипедов. В [2] представлены результаты оценки влияния ортогонального армирования преформ на их физико-механические свойства. Преформы были получены нашивкой ровинга из углеродного волокна, а прошиты арамидными, полиэтиленовыми и полиэфирными волокнами и пропитаны связующим под вакуумом. Также исследовали влияние натяжения нити, расстояния между соседними проходами и частоты прошивки. Результаты показали, что прошивка арамидными волокнами снижает прочность при растяжении и изгибе на 3—8%. Возможности применения технологии TFP для получения пластин с отверстиями изучали в работе [3]. Результаты исследования применения автоматизированной нашивки ровинга с целью увеличения прочности образцов с одиночным отверстием, представленные в [4], показали, что наличие отверстия в пластинах, полученных

способом прессования, снижают прочность при растяжении до 61% от прочности образца без отверстия. Однако дополнительное армирование преформы методом нашивки позволяет достичь прочности образцов до 94% от прочности образца без отверстия при незначительном увеличении массы. В [5] предложен программный комплекс, сочетающий в себе модуль для определения напряженно-деформированного состояния и модуль для разработки программы программируемой нашивки ровинга. Технология получения крыльчатки компрессора методом автоматизированной нашивки ровинга, работающей при более высоких частотах вращения, чем алюминиевый аналог, предложена авторами [6]. В работе [7] представлены результаты исследований образцов с отверстиями при растяжении и циклических испытаниях. Образцы были изготовлены на основе мультиаксиальных тканей, плетеных преформ и методом автоматизированной нашивки ровинга. Авторы отмечают, что прочность образцов со схемой нашивки $[\pm 45^\circ]$ была ниже, чем образцов без отверстий, но выше, чем образцов со схемой нашивки $[0^\circ/90^\circ]$ и $[45^\circ/0^\circ/-45^\circ]_n$. В [8] представлены результаты расчета напряжений, возникающих в структуре материала при TFR, при одноосном растяжении с использованием метода конечных элементов. В работе [9] представлены результаты оценки влияния ширины стежка и расстояния между двумя соседними проходами на степень волнистости (непрямолинейности) материала. Влияние различных схем нашивки ровинга на прочность и трещиностойкость образцов исследовали в [10]. Прочность при растяжении образцов с отверстием, полученных методом автоматизированной нашивки ровингом, — около 92,7% от прочности образца без отверстия, а образцов с просверленным отверстием — 38% от прочности образца без отверстия.

Одной из ключевых проблем технологии TFR является наличие волнистости, возникающей в результате прошивки ровинга нитью. В технологии композитных материалов известно, что искривление волокон в некоторой степени снижает несущую способность в этом направлении армирования. Другой важнейшей проблемой является уплотнение и изменение свойств слоя материала в результате прошивки. Более частое ортогональное армирование приводит к увеличению межслойной прочности материала, но в то же время это ведет к получению более плотной структуры материала и к неоднородности свойств по высоте преформы. Еще одной проблемой является появление напряжений в структуре преформы в процессе послойной нашивки слоев ровинга. Накапливаемые сжимающие остаточные напряжения в слоях обуславливают затруднение, а в некоторых случаях и к невозможности процесса пропитки преформы связующим, образованию зон, обедненных или обогащенных связующим. Возникающие напряжения наследуются готовым изделием и могут приводить к появлению расслоений и трещин в нем. Решение некоторых проблем возможно за счет подбора значений технологических параметров: шага нашивки, расстояния между соседними проходами, траектории проходов и т.д. на основе проведенных всесторонних исследований.

Настоящая работа посвящена изучению остаточных напряжений в преформе, возникающих в процессе послойной нашивки ровинга.

1. Постановка задачи

Особенность процесса автоматизированной нашивки ровинга — изменение свойств, прежде всего плотности материала в результате прошивки. Игла с нитью пришивает ровинг сначала к подложке в направлении, перпендикулярном подложке, затем каждый последующий слой пришивается к предыдущему пакету. В процессе нашивки ровинг претерпевает изменение плотности и свойств по высоте преформы. Таким образом, исследование процесса послойной нашивки ровинга приобретает важнейшее значение с точки зрения технологии получения изделий с задаваемыми высокими физико-механическими свойствами.

1.1. Напряженно-деформированное состояние в преформе при послойной нашивке ровинга. На упругую подложку 0 толщиной d с модулем упругости E_0 слой за слоем нашивается ровинг с одновременной прошивкой его сначала к подложке, затем каждый последующий слой нашивается на предыдущий слой и весь предыдущий пакет (рис. 1). Таким образом, иглы, прошивая каждый слой, разрыхляют его в плоскости, в результате чего он претерпевает относительную деформацию. При этом положительная деформация $\varepsilon_c > 0$ означает увеличение объема, но обязательно изменение плотности слоя, отрицательная деформация $\varepsilon_c < 0$ означает уменьшение объема преформы. Под усадкой будем полагать изменение габаритных размеров слоя материала в плоскости. Модуль Юнга наращиваемого материала E , толщина слоя Δ , номер наращиваемого слоя j .

Рассмотрим случай, когда иглы, пробивая верхний слой, не воздействуют на остальной пакет, а изменение плотности происходит лишь в наращиваемом (укладываемом) слое. Слой для простоты расчетов считаем изотропным.

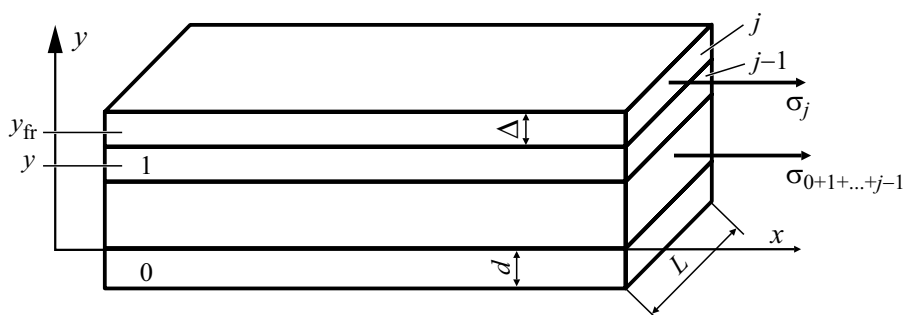


Рис. 1. Схема сил, действующих на элементарное тело: 0 — подложка; 1 — массив нашитого материала.

Примем следующие обозначения: 0 — упругая подложка; $[1, \dots, j, j+1, j_n]$ — наращиваемые слои материала толщиной Δ ; E_0 и E — модули Юнга подложки и наращиваемого слоя соответственно; y_{fr} — координата высоты полученного образца (координата фронта роста пакета); d — толщина подложки; L — длина модели по оси x ; по оси z длина равна L .

Пусть нарастили уже $(j-1)$ слоёв, каждый из которых имеет толщину Δ , и наращивается слой j . Запишем уравнение равновесия

$$\sigma_j \cdot \Delta \cdot L + \sigma_{0+1+\dots+j-1} \cdot [\Delta(j-1) + d] L = 0. \quad (1)$$

Условия совместности деформаций —

$$\varepsilon_j = \varepsilon_{0+1+\dots+(j-1)}. \quad (2)$$

При этом

$$\varepsilon_j = \frac{\sigma_j}{E} + \varepsilon_c, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{0+1+\dots+(j-1)} = \frac{\sigma_{0+1+\dots+(j-1)}}{E_{0+1+\dots+(j-1)}}. \quad (3)$$

Подставив (3) в (2), имеем

$$\frac{\sigma_j}{E} + \varepsilon_c = \frac{\sigma_{0+1+\dots+j-1}}{E_{0+1+\dots+j-1}}. \quad (4)$$

Модуль всего пакета (включая прошитые слои и подложку) запишем как

$$\begin{aligned} E_{0+1+\dots+j-1} &= E \psi_{1+\dots+j-1} + E_0 \psi_0 = \\ &= E_{1+\dots+j-1} \frac{(j-1)\Delta}{(j-1)\Delta + d} + \frac{E_0 d}{(j-1)\Delta + d} = \\ &= \frac{1}{(j-1)\Delta + d} [E(j-1)\Delta + E_0 d]. \end{aligned} \quad (5)$$

Из уравнения (1) получим

$$\sigma_{0+1+\dots+j-1} = -\frac{\sigma_j \Delta}{[\Delta(j-1) + d]}. \quad (6)$$

Подставим (5), (6) в (4) и после преобразований получим

$$\sigma_j = -E\varepsilon_c \left(1 - \frac{\Delta E}{jE\Delta + dE_0} \right). \quad (7)$$

Для того чтобы найти напряжения в пакете, необходимо просуммировать σ_j в (7) от 1 до j . Для этого введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \lim(E \Delta) &= d\xi, \quad \lim(E_0 d + E\Delta j) = \xi, \\ \Delta j &= y. \end{aligned} \quad (8)$$

Тогда

$$\lim_{\Delta \rightarrow 0} \sum_j \frac{E\Delta}{E_0 d + E\Delta j} = \int_y^{y_{fr}} \frac{d\xi}{\xi} = \ln \frac{E_0 d + E y_{fr}}{E_0 d + E y}. \quad (9)$$

Подстановка (9) в (7) с учетом (8) дает

$$\sigma(y, y_{fr}) = -E\varepsilon_c \left(1 - \ln \frac{E_0 d + E y_{fr}}{E_0 d + E y} \right), \quad (10)$$

где ε_c — усадка слоя в результате нашивки. Из (10) можно получить ситуацию, когда напряжения в подложке ($y = 0$) будут равны нулю независимо от усадки:

$$y_{fr} = 1,73 \frac{E_0}{E} d. \quad (11)$$

1.2. Определение напряженно-деформированного состояния слоистого материала с учетом взаимодействия его с подложкой. В предыдущей задаче взаимодействие нашиваемого материала с подложкой полагали абсолютным — перемещения на границе считались непрерывными, а касательные напряжения на границе подложка—материал отсутствовали.

Важнейшими параметрами при получении изделий методом автоматизированной нашивки ровинга является шаг прошивки ровинга, расстояние между соседними проходами и натяжение нити при прошивке. Здесь примем допущение, что совокупность стежков на некоторой площади (n , шт/см²) можно заменить средой, состоящей из малых не касающихся друг друга стерженьков [11—20], расположенных перпендикулярно укладываемому слою, которые способны передавать усилия от подложки к слою и от одного слоя к последующему. Напомним, что слой считаем изотропной сплошной средой. Анизотропную среду, находящуюся между подложкой и первым слоем материала, будем называть контактным слоем [11—20]. Такой подход является развитием метода

контактного слоя, разрабатываемого в приложении к адгезии и адгезионной механике.

Понятие о контактном (или пограничном) слое введено в работах [13—16]. Это понятие характеризует взаимодействие адгезива с субстратом в адгезионных соединениях и композитах. Известно, что при строгом решении задач о напряженно-деформированном состоянии адгезионных соединений в угловых точках появляются бесконечные касательные напряжения (сингулярность) вместо реальных нулевых. И тогда граничные условия не выполняются, задача Коши оказывается нерешённой. Для устранения этого противоречия в случае клеевых соединений в [21] или сварных соединений в [22] слои адгезива (клея) или слои сварки представляли в виде соединяющих стержней. Но тогда слои адгезива или сварки нельзя рассматривать как активный материал, например, они не могут создавать напряжений в соединении при изменении температуры и влиять на результаты работы. Представления о контактном слое основываются на понимании того, что адгезионные связи редки, например, по отношению плотности атомов на поверхностях адгезива или субстрата, т.е. далеко не каждый атом субстрата задействован в образовании адгезионных связей с адгезивом. Например, плотность атомов на гладкой поверхности металла около 10^{14} . И, наверное, хорошо, если бы при смазывании эпоксидным клеем плотность получающихся связей оказывалась всего на несколько порядков меньше. Иными словами, главное — эти связи редки, и потому их можно моделировать, например, редкими упругими короткими стерженьками, не касающимися друг друга и нормальными к поверхностям субстрата и адгезива. В такой анизотропной среде отсутствуют нормальные к стерженькам напряжения. Есть лишь касательные напряжения, параллельные соединяемым поверхностям, и нормальные напряжения. В результате задача о НДС таких соединений решается точно с удовлетворением исходным уравнениям и граничным условиям [11—13]. Без сингулярности, т.е. задача Коши оказывается решенной, и решение — единственным. В теории появляются три параметра контактного слоя: модуль сдвига G^* , толщина контактного слоя h^* и истинная прочность адгезионной связи τ_{ad} . Эта теория позволяет также получать простые аналитические решения для задач адгезионной механики в одномерной постановке. (Следует заметить, что в одномерной постановке в решении о напряженно-деформированном состоянии адгезионного соединения появляются лишь два параметра: τ_{ad} и отношение G^*/h^* .) И это обстоятельство оказалось важным потому, что в экспериментах по характеристике адгезионной связи можем определить лишь среднюю прочность связи как отношение разрушающей нагрузки к площади склейки. Получаемая величина оказывается зависящей от геометрических параметров образца и температуры испытаний. Стандартизация размеров образцов не избавила пользователей от сомнений. Метод контактного слоя позволяет не только точно удовлетворять уравнениям и граничным условиям задачи, но и вводить физически ясные критерии разрушения и определять из теории и

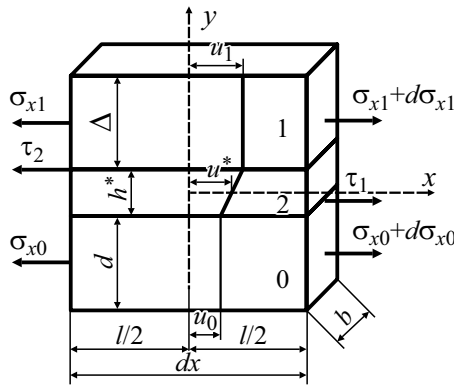


Рис. 2. Расчетная схема: 0 — подложка; 1 — слой 1 материала; 2 — контактный слой.

экспериментальных кривых стабильные параметры контактного слоя и истинную прочность адгезионной связи. Ситуация с пришиваемыми слоями похожа на адгезионную. По этой причине здесь и применяется метод контактного слоя из адгезии. Но, как известно, адгезия не реализуется без смачивания, поэтому одной из задач в ближайшем будущем станет развитие иного по сравнению с традиционным подхода к смачиванию. А пока вернемся к нашей проблеме. Контактный слой ввиду принятых допущений может передавать лишь касательные напряжения, образующиеся на границе взаимодействия слоев материала, и нормальные напряжения вдоль прошивающих нитей-стерженьков. Анизотропный контактный слой характеризуется толщиной h^* , модулем Юнга E^* и модулем сдвига G^* . Примем допущение, что в слое материала и в подложке возникают только нормальные напряжения σ_x .

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние в направлении оси x . Выделим элемент dx и обозначим все силы, действующие на него. Рассмотрим взаимодействие первого и пока единственного слоя прошивного материала с подложкой. Перемещения частиц слоёв вдоль направления x : u_0 — перемещение в подложке, u_1 — перемещение в слое 1.

Запишем уравнение равновесия для подложки 0 в соответствии с данными рис. 2:

$$-\sigma_{x0}db + \left(\sigma_{x0} + \frac{d\sigma_{x0}}{dx} dx \right) db + \tau_1 b dx = 0. \quad (12)$$

Уравнение для слоя 1 —

$$-\sigma_{x1}\Delta b + \left(\sigma_{x1} + \frac{d\sigma_{x1}}{dx} dx \right) \Delta b - \tau_2 b dx = 0, \quad (13)$$

для контактного слоя 2 —

$$-\tau(y)bdx + (\tau + d\tau)bdx = 0. \quad (14)$$

Из (14) следует, что

$$\tau(y) = \tau_1 = \tau_2 = \tau = \text{const}.$$

Тогда после преобразований (12), (13) получим

$$d \frac{d\sigma_{x0}}{dx} = -\tau, \quad \Delta \frac{d\sigma_{x1}}{dx} = \tau. \quad (15)$$

Приравнивая уравнения в (15), получаем

$$\frac{d\sigma_{x1}}{dx} = -\frac{d}{\Delta} \frac{d\sigma_{x0}}{dx}$$

или после интегрирования по dx окончательно имеем

$$\sigma_{x1} = -\frac{d}{\Delta} \sigma_{x0} + C. \quad (16)$$

В силу равновесия модели $C = 0$.

Перемещения в контактном слое в силу его малой толщины будем считать линейно зависящими от y :

$$u^* = ay + b. \quad (17)$$

Из граничных условий непрерывности перемещений имеем

$$u^*(y=0) = u_0, \quad u^*(y=h^*) = u_1. \quad (18)$$

Тогда перемещения в контактном слое запишем как

$$u^*(x, y) = \frac{u_1 - u_0}{h^*} y + u_0. \quad (19)$$

Полные деформации подложки 0 и слоя 1 —

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_{x0}}{E_0}, \quad \varepsilon_1 = \frac{\sigma_{x1}}{E_1} + \varepsilon_c, \quad (20)$$

соотношения Коши между перемещениями и деформациями —

$$\varepsilon_0 = \frac{du_0}{dx}, \quad \varepsilon_1 = \frac{du_1}{dx}. \quad (21)$$

Для сдвиговых деформаций в контактном слое из (19) имеем

$$\gamma^* = \frac{\partial u^*}{\partial y} = \frac{u_1 - u_0}{h^*}. \quad (22)$$

Закон Гука для сдвиговых деформаций —

$$\gamma^* = \frac{\tau^*}{G^*}. \quad (23)$$

Из уравнений (22), (23), (20), (21) получаем

$$\tau^* = \frac{G^*}{h^*}(u_1 - u_0). \quad (24)$$

Дифференцирование (24) и подстановка (21), (20) дает

$$\frac{\partial \tau^*}{\partial x} = \frac{G^*}{h^*} \left(\frac{\sigma_{x1}}{E_1} + \varepsilon_c - \frac{\sigma_{x0}}{E_0} \right). \quad (25)$$

Подстановка (4) и (5) в (14) и применение (25) дает

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_{x1}}{dx} &= -\frac{d}{\Delta} \frac{d\sigma_{x0}}{dx}, \\ \frac{\partial \tau^*}{\partial x} &= -\frac{G^*}{h^*} \left[\sigma_{x0} \left(\frac{d}{\Delta E_1} + \frac{1}{E_0} \right) - \varepsilon_c \right]. \end{aligned} \quad (26)$$

Из (25) и (26) получаем дифференциальное уравнение второго порядка

$$\frac{d^2 \sigma_{x0}}{dx^2} - \sigma_{x0} \frac{G^*}{dh^*} \left(\frac{d}{\Delta E_1} + \frac{1}{E_0} \right) + \frac{G^*}{dh^*} \varepsilon_c = 0.$$

Введем обозначения

$$\begin{aligned} \omega^2 &= \frac{G^*}{dh^*} \left(\frac{d}{E_1 \Delta} + \frac{1}{E_0} \right), \\ \beta &= \frac{G^*}{dh^*} \varepsilon_c. \end{aligned}$$

Тогда определяющее уравнение окончательно запишем в виде

$$\frac{d^2 \sigma_{x0}}{dx^2} - \omega^2 \sigma_{x0} + \beta = 0. \quad (27)$$

Решение уравнения (27) ищем в виде

$$\sigma_{x0}(x) = A \cdot \exp(\omega x) + B \cdot \exp(-\omega x) + \frac{\beta}{\omega^2} \quad (28)$$

или с использованием гиперболических функций —

$$\sigma_{x0}(x) = A_1 \cdot \operatorname{sh}(\omega x) + B_1 \cdot \operatorname{ch}(\omega x) + \frac{\beta}{\omega^2}. \quad (29)$$

Так как в рассматриваемой модели отсутствуют внешние нагрузки, а напряжения в плоскости склейки обусловлены только усадками материала, то граничными условиями будет отсутствие напряжений на концах:

$$\sigma_0(-l/2) = \sigma_0(l/2) = 0. \quad (30)$$

Задача симметричная, поэтому начало координат располагаем в середине длины модели, равной l (см. рис. 2).

Из (29) и (30) получаем константы

$$A_1 = 0, B_1 = -\frac{\beta}{\omega^2 \operatorname{ch}\left(\frac{\omega l}{2}\right)}. \quad (31)$$

После подстановки (31) в (29) получаем решение для нормального напряжения в подложке

$$\sigma_{x0}(x) = \frac{\beta}{\omega^2} \left(1 - \frac{\operatorname{ch}(\omega x)}{\operatorname{ch}\left(\frac{\omega l}{2}\right)} \right). \quad (32)$$

Подставим (32) в (16) и запишем

$$\sigma_{x1} = \frac{d}{\Delta} \frac{\beta}{\omega^2} \left(\frac{\operatorname{ch}(\omega x)}{\operatorname{ch}\left(\frac{\omega l}{2}\right)} - 1 \right). \quad (33)$$

Касательные напряжения в контактном слое с учетом (15) запишем как

$$\tau^* = \frac{d\beta}{\omega} \frac{\operatorname{sh}(\omega x)}{\operatorname{ch}\left(\frac{\omega l}{2}\right)}, \quad (34)$$

где по-прежнему

$$\omega^2 = \frac{G^*}{h^*} \left(\frac{1}{E_1 \Delta} + \frac{1}{d E_0} \right),$$

$$\beta = \frac{G^*}{h^*} \frac{\varepsilon_c}{d},$$

G^* / h^* — жесткость контактного слоя; d, Δ — толщина подложки и нашиваемых слоев соответственно; l — длина слоя.

2. Эксперимент

Образцы преформ получали на автоматической вышивальной машине с ЧПУ JCW 0100-500 (ZSK Stickmaschinen GmbH, Германия) путем укладывания углеродного ровинга HTS45 12K (Toho Tenax®, Япония) на водорастворимую подложку по схеме $[0^\circ/90^\circ]$ и одновременной прошивки его арамидной

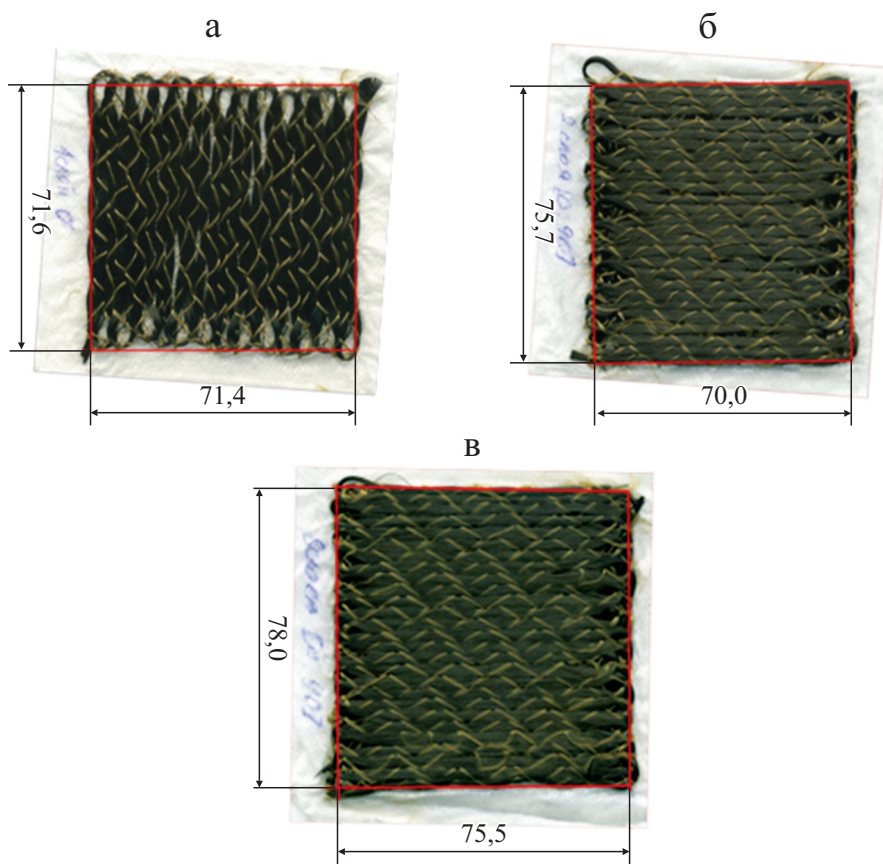


Рис. 3. Общий вид преформы в результате автоматизированной нашивки ровинга: а — один слой; б — два слоя; в — восемь слоев.

Результаты измерения усадки преформы в результате прошивки

Усадка, мм/мм	Количество слоев в преформе	
	два	восемь
По ширине слоя ε_w	-0,019	0,057
По длине слоя ε_l	0,057	0,089
По толщине слоя ε_{th}	-0,147	-0,840

нитью Русар-С (АО НПП “Термотекс”, Хотьково, Россия). Шаг прошивки 7 мм, расстояние между проходами — 47 условных единиц. Нашиваемые образцы преформ имели размер 80×80 мм. Каждая из нашитых преформ содержала один, два или восемь слоев (рис. 3). После нашивки измеряли длину, ширину и толщину преформы. Толщину нашивок определяли с использованием микрометра. Толщина образца, содержащего один слой, — 0,85 мм, два слоя — 1,45 мм, восемь слоев — 3,70 мм. Определение линейной усадки преформы в плоскости ε_c производили путем измерения габаритных размеров листа до и после нашивки дополнительных слоев с использованием фотографий высокого разрешения (см. рис. 3, таблицу).

Для определения модуля упругости E_0 из материала подложки на основе поливинилового полимера были вырезаны образцы в виде полосок размером 15×155 мм. Образцы растягивали в захватах испытательной машины “Instron 3365” при постоянной скорости деформации, регистрируемой с помощью экстензометра. По начальному участку диаграммы напряжение—деформация определяли модуль упругости. В результате экспериментов было установлено, что эффективный модуль упругости при растяжении подложки при схеме $[0^\circ/90^\circ]$ $E_{0;90}$ равен 30 МПа, при схеме $[45^\circ/-45^\circ]$ $E_{45;-45}$ — 53 МПа.

Для определения модуля упругости преформ, содержащих два или восемь слоев, был вырезан образец шириной 22 мм с рабочей длиной 30 мм, который подвергали шести нагружениям в упругой области деформирования, не доводя его до разрушения. По начальному участку кривой напряжения—деформации определяли эффективный модуль упругости преформы. Результаты расчета модулей упругости представлены в разделе 3 и на рис. 4. Толщины подложки и преформы измеряли с использованием микрометра.

3. Расчет и обсуждение результатов

С использованием выражения (33) и экспериментальных данных были произведены расчеты. Исходные данные для расчета следующие: модуль упругости подложки $E_{0;90} = 30$ МПа, $E_{45;-45} = 53$ МПа, модуль упругости образца, содержащего два слоя, — 852,7 МПа, содержащего восемь слоев — 341,4 МПа, толщина подложки $d = 0,25$ мм, координата высоты

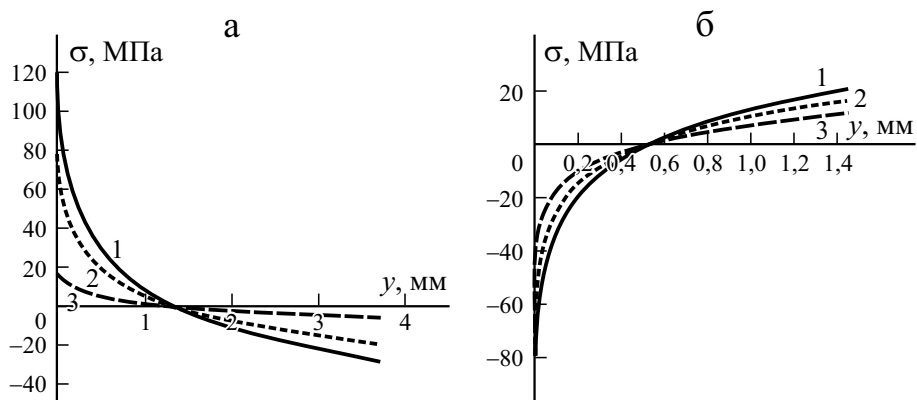


Рис. 4. Распределение остаточных нормальных напряжений σ по толщине преформы y , содержащей два слоя (а) и восемь (б) слоев. Для а — $E_1 = 600$ (1); $E_2 = 852,7$ (2); $E_3 = 1100$ МПа (3); для б — $E_1 = 500$ (1); $E_2 = 341,4$ (2); $E_3 = 100$ МПа (3).

полученного образца $y_{\text{н}} = 3,7$ мм, усадка слоя в результате нашивки $\varepsilon_c = 0,04\%$.

Из данных рис. 4—а следует, что нижние слои преформы, содержащей два слоя, оказываются сжатыми, верхние слои — растянутыми. Для преформы, содержащей восемь слоев, картина меняется (см. рис. 4—б). Нижние слои оказались растянутыми, верхние слои — сжатыми. Это следствие положительных усадок. Сжимающие напряжения, возникающие в толще материала, затрудняют пропитку преформы связующим. Зоны, в которых образуются растягивающие напряжения, наиболее склонны к появлению трещин и расслоений при растягивающих нагрузках. Таким образом, если напряжения в преформе наследуются готовым изделием, то эти зоны будут наиболее опасны при нагружении изделия растягивающими силами.

С использованием выражений (32), (33), (34) на рис. 5 построены графики напряжений в подложке σ_{x_0} , в толще материала σ_{x_1} и контактном слое τ_x . Исходные данные для расчета взяты из проведенных экспериментов: $E_1 = 852,7$ МПа, $E_0 = 30$ МПа, $d = 0,25$ мм, $\Delta = 1,45$ мм, $\varepsilon_c = -0,019$, $l = 100$ мм.

Как видно из данных рис. 5, возникающие в процессе уплотнения материала напряжения в материале 1 и подложке 0 оказываются сжимающими в результате уплотнения материала и распределены неоднородно по ширине заготовки.

Касательные напряжения τ , возникающие на границе подложки и материала, распределены неоднородно по длине взаимодействия. Анализ выражений показывает, что с увеличением интенсивности (частоты) прошивки будет расти отношение G^* / h^* , и значение касательных напряжений будет увеличиваться, а область изменения напряжений на краях

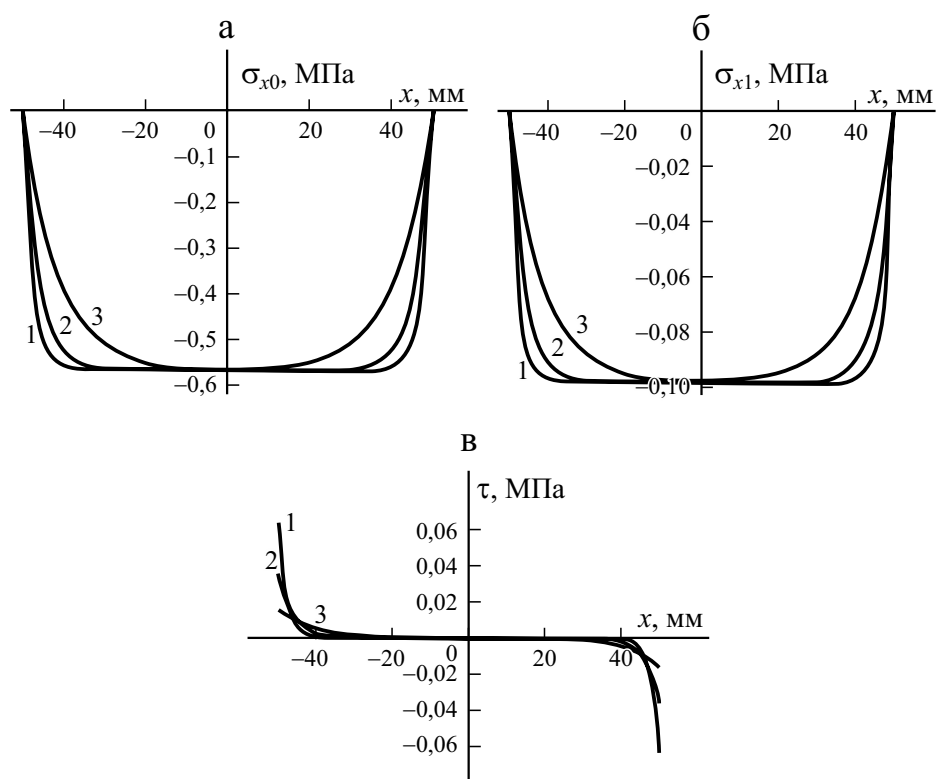


Рис. 5. Распределение нормальных напряжений σ_{x_0} в подложке по длине образца x (а) и в слое 1 σ_{x_1} (б), касательных напряжений τ_x в контактном слое в результате уплотнения материала (в). $G^* / h^* = 0,1$ (1); 0,5 (2); 1,5 МПа/мм (3).

взаимодействия резко сужаться. Таким образом, представленные модели позволяют подобрать такие параметры технологического процесса автоматизированной нашивки ровинга, которые бы позволили получить нужный уровень остаточных напряжений в преформе и наиболее высокие физико-механические свойства готового изделия.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования моделей нашивных композитов. В теоретическом плане в первом приближении предложены две простейшие модели формирования напряженно-деформированного состояния в настилаемых нашивкой материалах. В первой модели применен подход из механики фронтально растущих тел [14]. Взаимодействие подложки и слоев полагали абсолютным. Получено условие нулевых напряжений в подложке в зависимости от положения фронта (11) и не зависящее от усадки. Показано, что при послойной нашивке ровингом в структуре материала появляются напряжения, которые распределены неоднородно по толщине (на рисунке — по высоте) преформы. В слоях, близких к подложке, появля-

ются сжимающие напряжения, а в слоях, наиболее отдаленных от подложки, — растягивающие. Этот факт есть следствие положительных усадок слоев. Сжимающие напряжения приводят к затруднению, а в некоторых случаях — к невозможности пропитки их связующим. Растягивающие напряжения снижают несущую способность материала при приложении растягивающей нагрузки.

Во второй модели использовано представление о контактном анизотропном слое [11—13], передающем взаимодействие от одного слоя к другому при изменении плотности, например, одного из них по отношению к другому. По результатам проведенных исследований напряженно-деформированного состояния нашивного материала были проведены расчеты существенно неоднородно распределенных касательных и нормальных напряжений (краевые эффекты), возникающих в его структуре при послойной нашивке. Показано, что значения и характер распределения напряжений зависят от свойств подложки и материала, толщины подложки и материала, а также уплотнения материала в результате нашивки слоя ровинга.

Все расчеты проведены с использованием полученных в работе экспериментальных значений параметров.

Установлено, что на границе взаимодействия слоев материала и слоя 1 с подложкой появляются касательные напряжения, зависящие от технологических параметров процесса нашивки: шага прошивки и расстояния между соседними проходами. Увеличение интенсивности прошивки приводит к увеличению значения G^* / h^* и касательных напряжений, и область их изменения по длине (концентрация) взаимодействия резко сужается.

Авторы предлагают простейшие модели формирования напряженно-деформированного состояния фронтально растущего слоистого прошивного композита. В действительности все прошиваемые слои пакета получают разными по свойствам. Разными будут и “контактные” слои. Например, если выращен пакет из $n + 1$ слоя, то густота прошивок “нижнего” слоя у подложки будет в n раз выше частоты прошивок последнего “верхнего” пришиваемого слоя, так же и у нижнего контактного слоя число стерженьков-связей в n раз плотнее, чем верхнего. Эти и все иные особенности формирования прошивного композита предстоит учесть в последующем.

Работа выполнена по государственному заданию МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Работа посвящена 70-летию Лаборатории армированных пластиков ФИЦ ХФ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mattheij P., Gliesche K., Feltin D. Tailored fiber placement — mechanical properties and applications // *J. Reinf. Plast. Compos.* — 1998. — Vol. 17, No. 9. — P. 774—86.
2. Mattheij P., Gliesche K., Feltin D. 3D reinforced stitched carbon/epoxy laminates made by tailored fibre placement // *Composites: Part A.* — 2000. — Vol. 31, No. 6. — P. 71—81.

3. *Crothers P., Dreschler K., Feltin D., Herzberg I., Kruckenberg T.* Tailored fibre placement to minimise stress concentrations // *Composites: Part A.* — 1997. — P. 619—625.

4. *Gliesche K., Hubner T., Orawetz H.* Application of the tailored fibre placement (TFP) process for a local reinforcement on an open-hole tension plate from carbon/epoxy laminates // *Compos. Sci. Technol.* — 2003. — Vol. 63, No. 1. — P. 81—88.

5. *Spickenheuer A., Schulz M., Glietze K., Heinrich G.* Using tailored fibre placement technology for stress adapted design of composite structures // *Plastics, Rubber and Composites.* — 2008. — Vol. 37, Nos. 5/6. — P. 227—232.

6. *Uhlig K., Spickenheuer A., Bittrich L., Heinrich G.* Development of a highly stressed bladed rotor made of a CFRP using the tailored fiber placement technology // *Mech. Compos. Mater.* — 2013. — Vol. 49, No. 2. — P. 201—210.

7. *Uhlig K., Spickenheuer A., Glietze K., Karb I.* Strength of CFRP open hole laminated made from NCF, TFP and braided preforms under cyclic tensile loading // *Plastics, Rubber and Composites.* — 2010. — Vol. 39, No. 6. — P. 247—255.

8. *Uhlig K., Tosch M., Bittrich L., Leipprand A., Dey S., Spickenheuer A., Heinrich G.* Meso-scaled finite element analysis of fiber reinforced plastics made by tailored fiber placement // *Compos. Struct.* — 2016. — Vol. 143. — P. 53—62.

9. *Uhlig K., Bittrich L., Spickenheuer A., Almeida Jr. J. H. S.* Waviness and fiber volume content analysis in continuous carbon fiber reinforced plastics made by tailored fiber placement // *Compos. Struct.* — 2019. — Vol. 222. — p. 110910

10. *Koricho E. G., Khomenko A., Fristedt, Mahmoodul H.* Innovative tailored fiber placement technique for enhanced damage resistance in notched composite laminate // *Compos. Struct.* — 2015. — Vol. 120. — P. 378—385.

11. *Турусов Р. А.* Адгезионная механика — М.: НИУ МГСУ, 2016. — 230 с.

12. *Turusov R. A.* Elastic and thermal behavior of a layered structure I. Experiment and theory // *Mech. Compos. Mater.* — 2014. — Vol. 50, No 6. — P. 1119—1130.

13. *Turusov R. A.* Elastic and thermal behavior of a layered structure. II. Experiment and theory // *Mech. Compos. Mater.* — 2015. — Vol. 51, No 1. — P. 123—131.

14. *Метлов В. В., Турусов Р. А.* О формировании напряжений при фронтальном отверждении композитов // *Механика композит. материалов.* — 1985. — № 6. — С. 1079—1085.

15. *Турусов Р. А., Вуба К. Т., Фрейдин А. С.* Исследование влияния температурно-влажностных факторов на прочностные и деформационные свойства клеевых соединений древесины со стальной арматурой // *Тр. ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко.* — 1972. — Вып. 24 — С. 86—124.

16. *Турусов Р. А., Сакварелидзе Ж. Д., Малинский Ю. М., Вуба К. Т.* Растяжение составных стержней с учетом изгиба как модели клеевых соединений // *Тр. ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко.* — 1975. — Вып. 53. — С. 72—80.

17. *Турусов Р. А., Вуба К. Т., Фрейдин А. С. и др.* Некоторые аспекты исследования пограничных слоев в системах полимер—твердое тело // *Термодинамические и структурные свойства граничных слоев полимеров.* — Киев: Наукова думка, 1976. — С. 88—94.

18. *Турусов Р. А., Вуба К. Т.* Роль неоднородного напряженного состояния в оценке прочности моделей адгезионных соединений // *Физика прочности композиционных материалов.* — Л.: ЛИЯФ, 1976. — С. 75—84.

19. *Турусов Р. А., Вуба К. Т.* Напряженное состояние и особенности оценки прочности адгезионных соединений при сдвиге // *Физика и химия обработки материалов.* — 1979. — № 5. С. 87—94.

20. *Турусов Р. А., Вуба К. Т.* Напряженное состояние и особенности оценки прочности адгезионных соединений при отрыве // Физика и химия обработки материалов. — 1980. — № 2. С. 108—115.

21. *Рабинович А. Л.* Введение в механику армированных полимеров. — М.: Наука, 1970. — 482 с.

22. *Ржаницын А. Р.* Теория составных стержней строительных конструкций. — М.: Гос. изд-во строит. лит-ры, 1948. — 260 с.

Поступила в редакцию 06.04.2021

Окончательный вариант поступил 16.11.2021

Received Apr. 6, 2021 (Nov. 16, 2021)
