

Рогожникова Е.Н., Аношкин А.Н., Бульбович Р.В. Расчет НДС и оценка прочности сегментированной цилиндрической оболочки из композиционных материалов с металлическими вкладышами // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2022. – № 1. – С. 102–114. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.1.09

Rogozhnikova E.N., Anoshkin A.N., Bulbovich R.V. Calculation of VAT and assessment of the strength of a segmented cylindrical shell made of composite materials with metal inserts. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2022, no. 1, pp. 102-114. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.1.09



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 1, 2022

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2022.1.09

УДК 539.3: 629.7.023

РАСЧЕТ НДС И ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ СЕГМЕНТИРОВАННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВКЛАДЫШАМИ

Е.Н. Рогожникова^{1,2}, А.Н. Аношкин¹, Р.В. Бульбович¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²Научно-производственное объединение «Искра», Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 11 ноября 2021 г.
Одобрена: 10 февраля 2022 г.
Принята к публикации:
01 апреля 2022 г.

Ключевые слова:

слоистый композиционный материал, цилиндрическая оболочка, метод намотки, закладные элементы, штифто-шпилечное соединение, узел стыка, численные модели, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, межслойные напряжения, прочность.

АННОТАЦИЯ

В работе рассматривается цилиндрическая сегментированная оболочка – баллон давления, изготовленный намоткой из однонаправленного ровинга. Оболочка имеет разную толщину и схему армирования по сегментам и металлические закладные элементы на переднем и заднем торцах оболочки для крепления крышек. Ставится задача расчета напряженно-деформированного состояния и оценки прочности оболочки при нагружении внутренним давлением. Для решения задачи разработана двухуровневая численная математическая модель оболочки. На первом уровне оболочка моделируется с использованием эффективных характеристик композиционного материала по сегментам. На втором уровне моделируется деформирование отдельных сегментов оболочки – передних и задних узлов стыка с металлическими закладными элементами и штифто-шпилечным соединением с явным описанием схемы армирования сегмента. Граничные условия для задачи деформирования сегмента определяются в результате расчета НДС оболочки по модели первого уровня. Проведено сравнение разработанной модели с результатами стендовых испытаний оболочки на действие внутреннего давления. По результатам решения задачи для сегментов оболочки выполнен анализ межслойных напряжений в зоне контакта композитная оболочка – металлический закладной и получены оценки прочности конструкции.

© ПНИПУ

© Рогожникова Елена Николаевна – инж.-кон., e-mail: rogozhnikova@59.ru.
Аношкин Александр Николаевич – д.т.н., проф., e-mail: anoshkin@pstu.ru.
Бульбович Роман Васильевич – д.т.н., проф., e-mail: bulbovich@pstu.ru.

Elena N. Rogozhnikova – Design Engineer, e-mail: rogozhnikova@59.ru.
Aleksandr N. Anoshkin – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: anoshkin@pstu.ru.
Roman V. Bulbovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: bulbovich@pstu.ru.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

CALCULATION OF VAT AND ASSESSMENT OF THE STRENGTH OF A SEGMENTED CYLINDRICAL SHELL MADE OF COMPOSITE MATERIALS WITH METAL INSERTS

E.N. Rogozhnikova^{1,2}, A.N. Anoshkin¹, R.V. Bulbovich¹

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²PJSC Research and Production Association "Iskra", Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 11 November 2021
Approved: 10 February 2022
Accepted for publication: 01 April 2022

Keywords:

layered composite material, cylindrical shell, winding method, embedded elements, pin-pin connection, joint assembly, numerical models, finite element method, stress-strain state, interlayer stresses, strength.

ABSTRACT

The paper considers a cylindrical segmented shell – a pressure cylinder made by winding from unidirectional roving. The shell has a different thickness and reinforcement scheme for segments, and metal embedded elements on the front and rear ends of the shell for fixing the covers. The problem of calculating the stress-strain state and estimating the strength of the shell under loading by internal pressure is posed. To solve the problem, a two-level numerical mathematical model of the shell is developed. At the first level, the shell is modeled using the effective characteristics of the composite material by segments. At the second level, the deformation of individual segments of the shell is modeled – the front and rear joint nodes with metal embedded elements and a pin-pin connection with an explicit description of the segment reinforcement scheme. The boundary conditions for the segment deformation problem are determined as a result of calculating the shell VAT using the first-level model. The developed model is compared with the results of bench tests of the shell for the effect of internal pressure. Based on the results of solving the problem for the shell segments, the analysis of interlayer stresses in the contact zone of the composite shell – metal embedded was performed and estimates of the structural strength were obtained.

© PNRPU

Введение

В настоящее время в высоконагруженных элементах конструкции широко используются композиционные материалы (КМ). Композиционные материалы обладают высокой прочностью и имеют небольшой вес, их удельная прочность практически на порядок превышает удельную прочность металлических сплавов [1–3]. Современный этап совершенствования конструктивно-компоновочных схем летательных аппаратов тесно связан с широким внедрением высокопрочных композиционных материалов [4–9]. В настоящее время доля композиционных материалов в конструкциях авиационного строения достигла уровня 45–50 %, что позволило достигнуть параметра эффективности силовой оболочки 50 км [4–6]. Разработка новых рациональных конструктивно-технологических схем (КТС) композитных оболочек связана с решением многопараметрических задач поиска наилучших схем армирования, максимально использующих высокую прочность волокна и обеспечивающих равную прочность конструкции при комбинированных нагрузках [9–12]. При этом обязательным условием является обеспечение эффективности изготовления таких конструкций на существующем технологическом оборудовании [13].

Баллоны давления, цилиндрические и конические оболочки, как правило, изготавливаются из однонаправленных ровингов методом намотки с применением полимерных связующих. В результате в стенке конструкции формируется слоистая структура композиционного материала [9–11]. Слоистые полимерные композиционные материалы (ПКМ) имеют ярко выраженные анизотропные свойства и обладают высокими характе-

ристиками в плоскости армирования, зависящими от принятой схемы армирования, и низкой межслоевой прочностью, характерной для всех схем армирования [14–16]. Проектирование и создание намотанных конструкций является сложной задачей, в которой надо учитывать комплекс нагрузок и воздействий на конструкцию и особенности свойств и структуры композиционных материалов. Особый интерес для таких конструкций представляет проектирование и расчет узлов стыка композитных элементов конструкции с металлическими деталями, участков технологических переходов и соединений различных поверхностей при формировании стенок сложной геометрии [17–21].

В узлах стыков и соединений композитных конструкций с металлическими закладными элементами часто используют дополнительные материалы со специальными свойствами, например, обладающие повышенной твердостью и износостойкостью, высокой прочностью на смятие и срез. Это может привести к появлению областей концентрации напряжений в композиционном материале в местах контакта с металлическими закладными элементами [21–23].

При проектировании конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов необходимо проведение расчетов, анализа напряженно-деформированного состояния и оценки запасов прочности при эксплуатационных и стендовых испытательных нагрузках. Современный подход к созданию крупногабаритных композитных конструкций предполагает интенсивное использование математических моделей деталей и узлов, учитывающих основные особенности механического поведения слоистого анизотропного композиционного материала в составе конструкции. При этом большое

значение имеют модели, описывающие совместную работу композиционных материалов и металлических закладных элементов, входящих в состав конструкций и выполняющих функцию соединительных узлов.

Внедрение металлических закладных элементов в технологический процесс формования композитных конструкций, как правило, приводит к возникновению технологических напряжений вследствие существенного различия их физико-механических свойств и различного характеру деформирования при нагреве и охлаждении конструкции во время полимеризации и стеклования композиционного материала [24–27]. Внедрение закладных элементов в композитную конструкцию после её формования требует механической обработки композиционного материала – сверления отверстий и/или токарной обработки мест посадки металлических деталей, и создание дополнительного клеевого соединения [13; 28]. Это неизбежно приводит к появлению микротрещин и повреждению связующего в слоистой структуре композиционного материала в зонах его механической обработки [29]. В клеевом шве, полимеризация которого, как правило, происходит при повышенной температуре, появляются технологические напряжения вследствие различных температурных деформаций композиционного материала и металлического закладного элемента. Повреждения и технологические напряжения в композиционном материале в зоне контакта с металлическими закладными элементами могут привести к возникновению расслоений в композитной конструкции еще до начала её эксплуатации [25; 26].

Поэтому задача разработки математических моделей и исследование с их помощью особенностей напряженно-деформированного состояния в узлах соединений конструкций из композиционных материалов с металлическими закладными элементами является актуальной. Настоящая работа посвящена разработке численной математической модели для расчета цилиндрической оболочки, выполненной намоткой однонаправленным ровингом, с металлическими закладными элементами и штифто-шпилечным соединением. Ставится задача разработки двухуровневой численной математической модели, позволяющей рассчитать напряженно-деформированное состояние, осредненное по толщине конструкции, оболочки в целом, и вычислить все компоненты тензора напряжения в слоях в зоне соединения композитной оболочки с металлическими закладными элементами. Проведено сравнение разработанной модели с результатами стендовых испытаний конструкции, выполнен анализ межслойных напряжений в зоне контакта «композитная оболочка – металлический закладной элемент» и получены оценки прочности конструкции.

1. Постановка задачи исследования НДС композитной конструкции

Объектом исследований в настоящей работе является слабо коническая (угол уклона менее 1°) сегментированная

цилиндрическая оболочка, показанная на рис. 1. Конструкция изготовлена методом намотки однонаправленного ровинга и представляет собой систему двойных переплетенных спиральных и кольцевых слоев с закладными металлическими элементами в узлах стыка. Узлы стыка корпуса дополнительно армируются слоями композиционного материала с текстильным наполнителем. Кроме металлических закладных элементов в узлах стыка присутствуют и элементы штифто-шпилечного соединения (ШШС).

Конструкция при испытаниях нагружается внутренним давлением и осевой силой, возникающей от действия давления на торцевые крышки по месту штифто-шпилечного соединения. Для проектирования, отработки и совершенствования конструкции оболочки необходимо создание методики расчета НДС и оценки его запасов прочности. Такая методика должна позволять определять общий характер деформирования композитной оболочки и особенности полей напряжений и деформаций в месте контакта композитной оболочки с металлическими закладными элементами в окрестности ШШС.

Оценка прочности сегмента конструкции с участком ШШС под воздействием модельной равномерно распределенной растягивающей нагрузки рассматривалась в работе [17]. В работе исследовалось влияние технологических расслоений на прочность ШШС. В результате решения задачи найдено распределение напряжений по слоям в сегменте корпуса с участком ШШС (рис. 2) и технологическим расслоением (30 и 50 мм), установлено, что расслоение не снижает несущей способности оболочки и ШШС.

При испытаниях конструкции на действие внутреннего давления обнаружена неравномерная деформация её элементов – значительная деформация и изменение размеров композитной оболочки и незначительная деформация металлических закладных элементов ввиду их высокой жесткости. Это приводит к смятию отверстий ШШС [17] (рис. 2), а также к появлению изгибающих и сдвиговых напряжений в окрестности контакта оболочки корпуса с закладными элементами.

Представляет интерес оценка реально действующей нагрузки на исследуемый сегмент конструкции с участком ШШС в процессе её испытаний и эксплуатации и проведение уточненного расчета НДС и оценки прочности этого наиболее нагруженного элемента конструкции.

2. Цель и задачи исследования

В настоящей работе ставится задача расчета НДС композитной цилиндрической оболочки с металлическими закладными элементами и последующего анализа общего характера деформирования композитной оболочки, полей напряжений в армирующих слоях и межслойных напряжений в месте контакта композитной оболочки с металлическими закладными элементами. Прочность



Рис. 1. Общий вид крупногабаритной многослойной сегментированной конструкции

Fig. 1. General view of a large-sized multi-layer structure

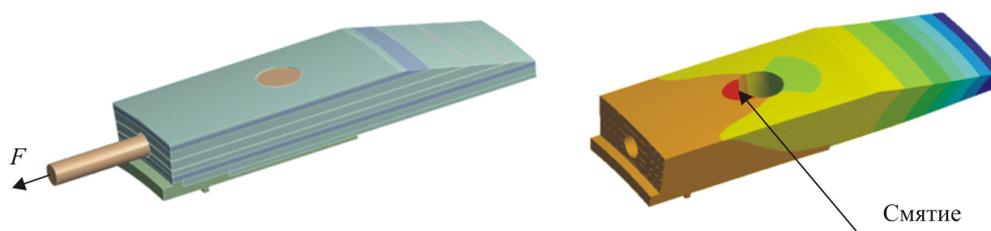


Рис. 2. Расчетная схема ШШС [13]

Fig. 2. The design scheme of the PPJ [13]

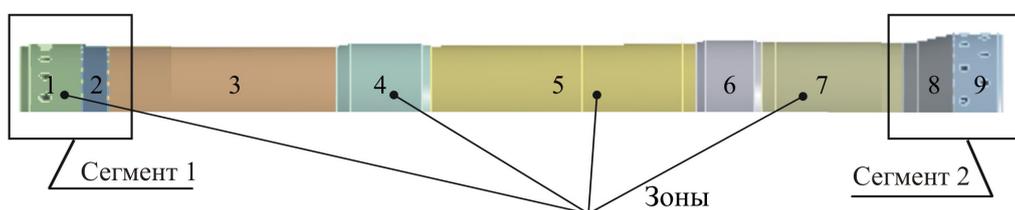


Рис. 3. 3D-модель крупногабаритной многослойной конструкции

Fig. 3. 3D model of a large-sized multi-layer structure

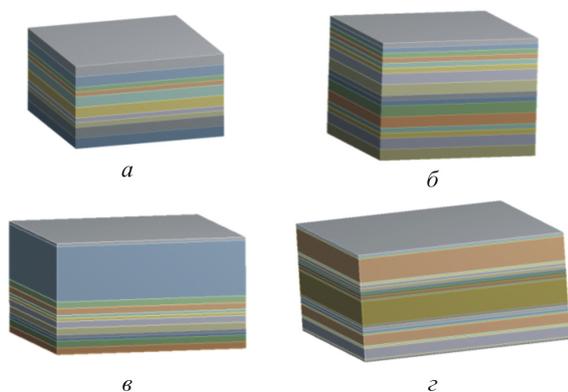


Рис. 4. Слоистый пакет: *a* – N_1 спиральных слоев с углами укладки $\pm \varphi_1$ и N_2 кольцевых; *б* – N_1 спиральных слоев с углами укладки $\pm \varphi_2$ и N_2 кольцевых слоев; *в* – N_1 спиральных слоев с углами укладки $\pm \varphi_3$, N_2 кольцевых слоев и пакет ткани из N_3 слоев; *г* – N_1 спиральных слоев с углами укладки $\pm \varphi_1$, N_2 кольцевых слоев и пакета ткани

Fig. 4. Layered package: *a* – N_1 spiral layers with stacking angles $\pm \varphi_1$ and N_2 ring layers; *б* – N_1 spiral layers with laying angles $\pm \varphi_2$ and N_2 ring layers; *в* – N_1 spiral layers with laying angles $\pm \varphi_3$, N_2 ring layers and a fabric package of N_3 layers; *г* – N_1 spiral layers with laying angles $\pm \varphi_1$, N_2 ring layers and fabric packages

композитной оболочки на разрыв при этом можно оценить по напряжениям в армирующих слоях, а прочность на расслоение – по межслойным напряжениям в зонах контакта армирующих слоев с металлическими закладными элементами и ШШС.

Поставленная задача решается в два этапа. На первом этапе решается задача расчета НДС конструкции в целом, моделируя её в виде трехмерного тела из однородного анизотропного материала с эффективными характеристиками. На втором этапе решается трехмерная задача теории упругости для анизотропного неоднородного сегмента, «вырезанного» из конструкции, при этом по контуру сегмента прикладываются перемещения или нагрузка взамен «отброшенной части», полученная в результате решения первой задачи. В результате решения задачи для сегмента можно получить полное поле напряжений в слоях и межслойных напряжений и оценить прочность сегмента на расслоение.

3. Разработка параметризованной модели композитной конструкции

Для решения поставленной задачи была разработана параметрическая модель конструкции, которая позволяет варьировать её схему армирования (количество слоев, материал и углы намотки) и геометрические параметры, основанная на геометрической модели, построенной в инженерном пакете CAD-систем. На рис. 3 показана геометрическая модель и исходная схема армирования конструкции, в которой можно выделить девять сегментов – зон, отличающихся количеством и углами армирования слоев. На рис. 4 показаны характерные пакеты слоев в различных зонах конструкции.

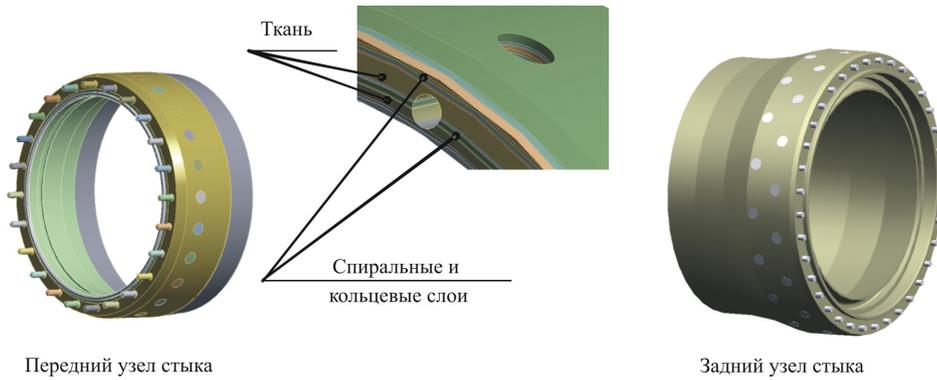


Рис. 5. Геометрическая модель сегмента конструкции с металлическим закладным элементом и ШШС

Fig. 5. Geometric model of a construction segment with a metal embedded element and PPJ

Разработанная модель использовалась для решения задачи на первом этапе. На втором этапе для решения задачи второго уровня была построена модель сегмента переднего и заднего узлов стыка конструкции (рис. 5) с металлическим закладным элементом и элементами ШШС. В моделях учитывалось, что на переднем узле стыка штифты расположены в один ряд, а на заднем узле стыка штифты расположены в два ряда в шахматном порядке.

В построенной модели сегмента конструкции для задачи второго этапа описывалась полная схема армирования слоев, геометрия закладных элементов, шпилек и штифтов. Расстояние от края закладного элемента до плоскости отсечения части конструкции, на которой задавались перемещения, полученные из решения задачи первого этапа, принималось равным 120 мм. Последующие расчеты показали, что зона концентрации полей напряжений и деформаций вследствие краевого эффекта, обусловленного характером приложения перемещений к исследуемому сегменту на границе с «отброшенной» частью конструкции, составляет 15 мм. Таким образом, принятый размер сегмента конструкции позволяет устранить влияние краевого эффекта на НДС в исследуемой зоне ШШС.

4. Математическая постановка задачи расчета НДС композитной конструкции

Математическая постановка задачи расчета НДС многослойной конструкции из композиционных материалов соответствует задаче теории упругости для неоднородного анизотропного тела. В вариационной формулировке эта постановка заключается в отыскании минимума функционала Лагранжа с дополнительными условиями [30]. Вариация функционала при отсутствии массовых сил имеет вид:

$$\delta J_u = \int_V \epsilon_{ij} C_{ijkl} \delta \epsilon_{kl} dV - \int_{S_i} F_i \cdot \delta u_i dS, \quad (1)$$

где ϵ_{ij} и $\delta \epsilon_{ij}$ – тензор и вариация тензора деформаций, C_{ijkl} – тензор упругих модулей, δu_i – вариация вектора перемещений, F_i – вектор внешних сил. Дополнительными условиями для функционала (1) являются геометрические уравнения Коши:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (2)$$

Многосвязная область V конструкции имеет внешнюю границу $S = S_u + S_b$, на которой заданы силовые и кинематические граничные условия, и состоит из подобластей $V^{(p)}$, соответствующих различным материалам (p). В модели первого уровня подобласти соответствуют сегментам – зонам с разными схемами армирования конструкции, в модели второго уровня – слоям с межслойными границами $S_{d,n}$.

При решении задачи для конструкции в целом (модель первого уровня) на первом этапе для выделенных девяти зон (см. рис. 3, 4) определялись эффективные свойства слоистого композиционного материала. При этом использовались соотношения теории слоистых пластин [14] и комплекс упругих характеристик однонаправленных и текстильных слоев, рассчитанный по моделям микромеханики, приведенным в работах [15; 31; 32]. Характеристики однонаправленного композиционного материала верифицировались по результатам экспериментов на растяжение однонаправленных кольцевых образцов.

Прочность конструкции оценивалась по напряжениям в слоях с использованием критерия максимальных напряжений

$$S_{11}^{c-} \leq \sigma_{11} \leq S_{11}^{c+}, \quad S_{22}^{c-} \leq \sigma_{22} \leq S_{22}^{c+}, \\ S_{33}^{c-} \leq \sigma_{33} \leq S_{33}^{c+}, \quad S_{12}^c \leq \sigma_{12}, \quad S_{13}^c \leq \sigma_{13}, \quad S_{23}^c \leq \sigma_{23}. \quad (3)$$

Компоненты $S_{ij}^{c\pm}$ равняются предельным напряжениям материала ортотропного слоя при простых видах статического нагружения. В модели первого уровня напряжения в слоях рассчитывались по найденным средним напряжениям для пакета слоев в разных зонах конструкции. Запас прочности по различным составляющим напряженного состояния и материалам слоев (p) можно оценить с помощью коэффициентов n_{ij} , а минимальное значение по всем коэффициентам n_{ij} и материалам p позволяет получить оценку запаса прочности конструкции в целом

$$n_{ij}^{(p)} = \min_{\mathbf{r} \in V^{(p)}} \left(\frac{S_{ij}^{c(p)}}{\sigma_{ij}^{(p)}(\mathbf{r})} \right). \quad n = \min_{i,j,p} (n_{ij}^{(p)}). \quad (4)$$

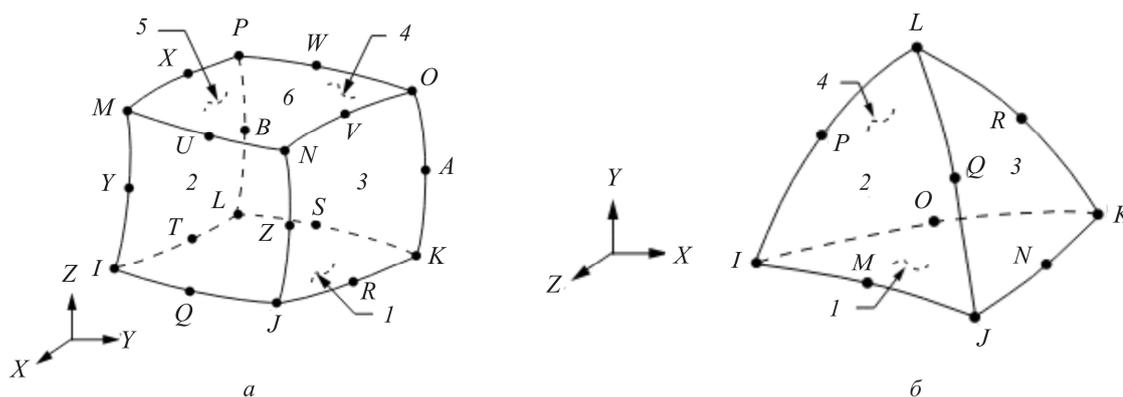


Рис. 6. Конечные элементы SOLID186 (а) и SOLID187 (б)

Fig. 6. End elements SOLID186 (a) and SOLID187 (b)

5. Построение дискретных моделей конструкции и ее сегмента

Решение поставленной задачи расчета НДС проводилось с помощью МКЭ в пакете ANSYS. На первом этапе решалась задача для конструкции в целом (см. рис. 1). На втором этапе решалась задача для двух сегментов оболочки, соответствующих зонам переднего и заднего узлов стыка (см. рис. 3). Компьютерные модели конструкции для задачи первого и второго уровня были построены по параметрическим моделям, показанным на рис. 3–5. Дискретизация моделей выполнялась с помощью трехмерных призматических и тетраэдрических конечных элементов SOLID186 и SOLID187 (рис. 6) [33].

В расчетные модели оболочки и ее сегментов было включено соединение переднего узла стыка с крышкой. Крышка моделировалась явным образом, контактируя с оболочкой посредством шпилечного соединения без трения и зазора. При решении задачи задавалось давление на внутреннюю поверхность оболочки и передней крышки, к заднему узлу стыка прикладывалась сила от внутреннего давления, имитирующая отсутствие задней крышки. Закладные металлические элементы, расположенные на переднем и заднем узлах стыка, в модели сегмента описывались конечными элементами типа SOLID186 (см. рис. 6). Между конечными элементами композитной оболочки и металлическими закладными элементами задавался идеальный контакт.

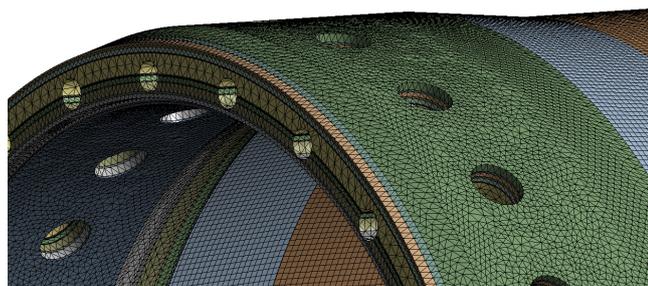


Рис. 7. Вид фрагмента конечно-элементной модели

Fig. 7. View of a fragment of a finite element model

Параметры конечно-элементной сетки выбирались по результатам исследования сходимости численного решения: максимальный размер элемента при этом составлял 2 мм, минимальный – 0,03 мм (при толщине слоя композиционного материала 0,32 мм), общее количество конечных элементов составляло более 7 млн. При этом линейные размеры соседних конечных элементов отличались не более чем в 2 раза. Общий вид фрагмента конечно-элементной модели конструкции показан на рис. 7.

6. Расчет и анализ НДС композитной конструкции в целом

На первом этапе решалась задача расчета НДС конструкции в целом. В качестве граничных условий задавали давление по всей внутренней поверхности цилиндрической оболочки и передней крышки и осевую силу, возникающую от действия давления на заднюю крышку по месту штифто-шпилечного соединения. Упругие характеристики однонаправленных и текстильных слоев оценивались по характеристикам матрицы и волокон с использованием моделей механики композиционных материалов [15; 31; 32] (табл. 1). Упругие характеристики материала в модели оболочки задавались как эффективные и рассчитывались по уравнениям теории слоистых пластин [14] в соответственной заданной схеме армирования конструкции по зонам (см. рис. 4) и характеристикам слоев (табл. 2). В моделях сегмента оболочки упругие свойства материала слоев задавались явным образом, для металлических закладных элементов задавался модуль Юнга 200 ГПа и коэффициент Пуассона 0,3.

В результате численного решения задачи были получены поля напряжений и деформаций для конструкции. Анализ поля напряжений показывает, что наиболее нагруженной является зона 7, в которой окружные, осредненные по пакету слоев напряжения достигают значения 602,5 МПа, а осевые – 304,8 МПа. Это соотношение окружных и осевых напряжений соответствует известной оценке напряжений для баллонов давления [9]. Следует отметить, что поле напряжений однородно по

Характеристики слоя и ткани

Layer and fabric characteristics

| Материал | Модуль упругости, МПа | | | Коэффициент Пуассона | | | Модуль сдвига, МПа | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|-------|----------------------|------------|------------|--------------------|----------|----------|
| | E_x | E_y | E_z | μ_{xy} | μ_{yz} | μ_{xz} | G_{xy} | G_{yz} | G_{xz} |
| Однонаправленный слой | 113118 | 6133 | 6133 | 0,29 | 0,46 | 0,29 | 2648 | 2016 | 2645 |
| Ткань | 34880 | 26000 | 26000 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 6236 | 6236 | 6236 |

Таблица 2 / Table 2

Эффективные характеристики зон

Effective zone characteristics

| № зоны | Модуль упругости, МПа | | | Коэффициент Пуассона | | | Модуль сдвига, МПа | | |
|--------|-----------------------|-------|-------|----------------------|------------|------------|--------------------|----------|----------|
| | E_x | E_y | E_z | μ_{xy} | μ_{yz} | μ_{xz} | G_{xy} | G_{yz} | G_{xz} |
| 1 | 43166 | 13593 | 25288 | 0,21 | 0,15 | 0,18 | 4190 | 4064 | 7992 |
| 2 | 31136 | 7173 | 30016 | 0,33 | 0,12 | 0,27 | 2211 | 2390 | 14919 |
| 3 | 35659 | 7182 | 29286 | 0,33 | 0,13 | 0,27 | 2310 | 2299 | 14220 |
| 4 | 35348 | 11394 | 27930 | 0,24 | 0,14 | 0,20 | 4456 | 4354 | 10058 |
| 5 | 31112 | 7178 | 31548 | 0,34 | 0,12 | 0,25 | 2203 | 2394 | 14245 |
| 6 | 52391 | 7071 | 25523 | 0,33 | 0,17 | 0,27 | 2509 | 2166 | 10911 |
| 7 | 31095 | 7183 | 33092 | 0,35 | 0,11 | 0,23 | 2204 | 2368 | 11498 |
| 8 | 35621 | 7198 | 32137 | 0,35 | 0,12 | 0,23 | 2301 | 2285 | 11004 |
| 9 | 32238 | 7209 | 29539 | 0,31 | 0,13 | 0,29 | 2295 | 2322 | 12818 |

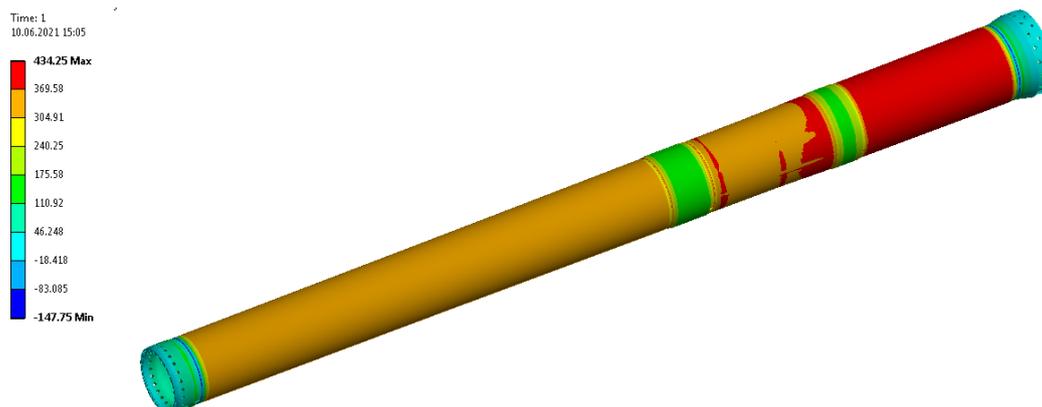


Рис. 8. Напряжения осевые в различных зонах конструкции

Fig. 8. Axial stresses in different areas of the structure

зонам, отличие этих напряжений между зонами 3, 5, 7 составляет в среднем 10 % (рис. 8). Отличие напряжений и деформаций по зонам вызвано изменением количества слоев по зонам и углов армирования оболочки и, как следствие, разной жесткостью в каждой зоне. В зонах 4 и 6 напряжения снижаются из-за введения металлических вкладышей для увеличения жесткости этих зон, а в зонах 1 и 9 из-за большого количества слоев ткани для увеличения толщины стенки под штифт и увеличения эффективных упругих свойств этих зон в осевом направлении.

Результаты расчетов сравнивались с данными регистрации окружных и продольных перемещений на поверхности корпуса при его испытаниях на внутреннее давление. Сравнение показало, что измеренные значения максимального изменения диаметра и длины корпуса составляют 4,09 и $-0,74$ мм, а расчетные зна-

чения, 3,8 и $-0,68$ мм соответственно. Отличие измеренных и расчетных значений не более 8 % доказывает адекватность разработанной модели сегментированной оболочки.

Анализ полей НДС показал, что в зоне контакта композитной оболочки с металлическими закладными элементами возникают высокие напряжения сдвига в плоскости слоя – 78 МПа. Для снижения этих напряжений между закладными элементами и композитной оболочкой было предложено ввести слой резины.

Представляет интерес детальный анализ межслойных напряжений в окрестности штифто-шпилечного соединения у «переднего» и «заднего» узлов торцевого стыка, поскольку эта зона подвергается механической обработке – вскрытию отверстий под штифты, вследствие чего в композиционном материале возможно появление локальных повреждений по краям отверстий [34; 35].

Высокие межслоевые напряжения являются наиболее опасными для последующего развития расслоений, вызванных механической обработкой. Для расчета этих напряжений в соответствии с вышерассмотренной постановкой была решена задача второго уровня для двух сегментов, вырезанных из общей оболочки.

7. Расчет и анализ НДС сегментов оболочки со штифто-шпильчным соединением

Численное решение задачи расчета НДС сегментов оболочки выполнялось с использованием разработанного двухступенчатого алгоритма и построенной конечно-элементной модели. На границе сегмента с «отброшенной частью» оболочки задавались перемещения, полученные из решения вышерассмотренной краевой задачи для оболочки в целом. Решение задачи для сегментов выполнялось в трехмерной постановке с явным описанием слоев композиционного материала, упругие свойства слоев приведены в табл. 1. В результате решения были получены поля напряжений и деформаций в армирующих слоях сегмента, а также в металлических закладных элементах, штифтах и шпильках.

Анализ полученного решения показал, что вблизи границы сегмента с «отброшенной» частью оболочки поля напряжений имеют локальные максимумы. По мере удаления от границы, напряжения уменьшаются, достигая постоянного значения на расстоянии порядка 7 % от диаметра. Таким образом, можно считать, что в указанной области сегментов на значения напряжений оказывает влияние «краевой эффект», поэтому данная область исключалась из последующего анализа.

В качестве примера на рис. 9 показаны поля окружных и осевых напряжений в нескольких слоях сегмента заднего узла стыка с наибольшими значениями напряжений, в других слоях сегмента распределения напряжений

аналогичны. Анализ полей напряжений показал, что окружные напряжения достигают максимальных значений 254,5 МПа в спиральных слоях и 141,5 МПа – в кольцевых слоях в зоне отверстия для шпильки и штифта (рис. 9, а). Осевые напряжения достигают максимального значения 177,9 МПа (рис. 9, б) в слоях с тканым армированием на внутренней поверхности штифтового отверстия. Обращает на себя внимание, что области максимальных значений этих напряжений в зоне штифтовых отверстий очень малы – порядка 0,8 мм (несколько конечных элементов), при двух-, трехкратном коэффициенте концентрации напряжений относительно их средних значений в слое.

Штифтовые отверстия являются наиболее опасным местом в рассматриваемом сегменте, так как при механической обработке происходит повреждение композиционного материала на кромке и внутренней поверхности отверстий, что может привести к образованию микротрещин и развитию расслоений под действием межслойных напряжений.

Поля сдвиговых σ_{xy} и нормальных σ_{zz} межслойных напряжений в слоях с максимальными осевыми напряжениями на переднем узле стыка показаны на рис. 10. Анализ выявил, что сдвиговые напряжения σ_{xy} принимают наибольшее значение 38,2 МПа в кольцевом слое (рис. 10, а). Нормальные межслоевые напряжения σ_{zz} в исследуемом сегменте не превышают значений 14,97 МПа (рис. 10, б). Максимальные значения этих напряжений также локализованы на малом участке в зоне штифтовых отверстий, средний уровень этих напряжений в слое в 3–4 меньше. Кроме того, опасными для возникновения и развития расслоений в окрестности отверстий являются напряжения межслойного сдвига σ_{yz} , σ_{xz} , принимающие значения от 15,5 до 37,5 МПа в локальных зонах с характерным размером 0,3 мм (размер конечного элемента).

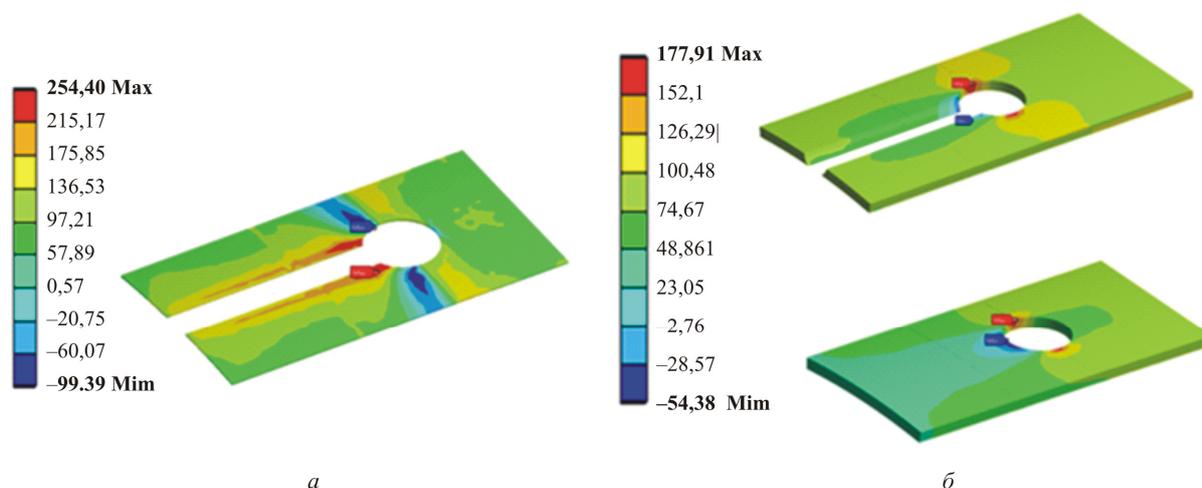


Рис. 9. Распределение окружных напряжения в спиральном слое (а) и осевых напряжений в слоях, армированных тканью (б), МПа

Fig. 9. Distribution of circumferential stresses in a spiral layer (а) and axial stresses in a layer reinforced with fabric (б), MPa

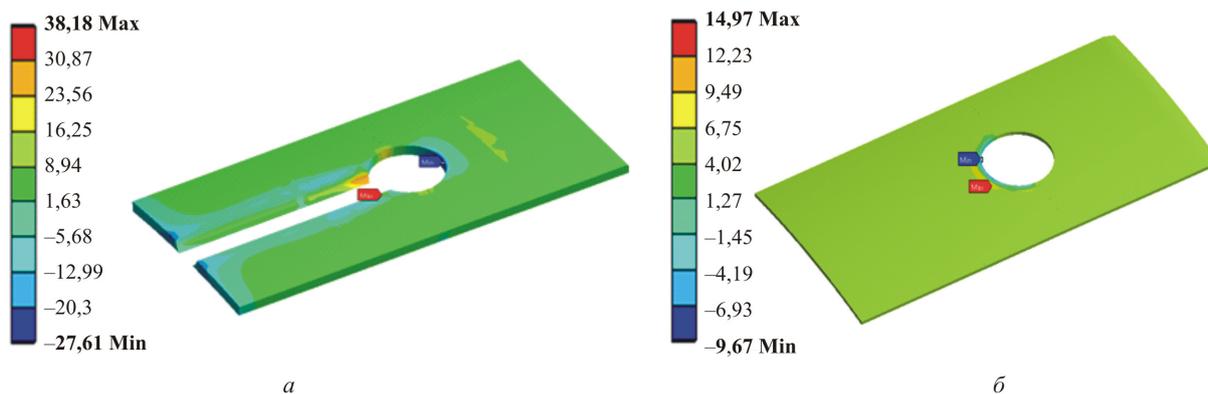


Рис. 10. Поля сдвиговых σ_{xy} напряжений в кольцевом слое № 5 (а) и нормальных межслойных напряжений σ_{zz} в спиральном слое № 2 (б) на переднем узле стыка, МПа

Fig. 10. Fields of interlayer shear (a – annular layer No. 5) and normal (σ – spiral layer No. 2) stresses in a layer with maximum axial stresses at the front joint, MPa

Таблица 3 / Table 3

Максимальные напряжения в слоях (МПа)
Maximum layer stresses (MPa)

| № | Слой | Передний узел стыка | | | | | Задний узел стыка | | | | |
|----|------------|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | σ_{xx} | σ_{yy} | σ_{xy} | σ_{yz} | σ_{xz} | σ_{xx} | σ_{yy} | σ_{xy} | σ_{yz} | σ_{xz} |
| 1 | Кольцевой | 76,95 | 42,4 | 18,6 | 4,6 | 7,7 | 82,6 | 49,9 | 13,6 | 8,1 | 31,2 |
| 2 | Спиральный | 174,2 | 49,5 | 29,9 | 4,8 | 25,8 | 173,2 | 48,4 | 27,2 | 19,7 | 28,1 |
| 3 | Кольцевой | 254,3 | 19,8 | 24,9 | 4,5 | 6,6 | 215,9 | 46,9 | 20,2 | 15,5 | 11,5 |
| 4 | Спиральный | 153,6 | 44,8 | 12,1 | 3,2 | 37,5 | 254,5 | 49,1 | 27,5 | 23,1 | 28,2 |
| 5 | Кольцевой | 253,7 | 23,6 | 38,2 | 7,5 | 8,7 | 234,9 | 50,0 | 29,7 | 23,5 | 11,4 |
| 6 | Ткань | 38,3 | 69,5 | 10,7 | 6,7 | 3,8 | 60,2 | 177,9 | 16,6 | 31,1 | 25,7 |
| 7 | Кольцевой | 162,3 | 22,8 | 25,2 | 5,9 | 14,6 | 250,8 | 49,2 | 32,2 | 22,2 | 16,8 |
| 8 | Спиральный | 59,9 | 29,6 | 15,7 | 2,9 | 16,5 | 216,7 | 47,9 | 27,4 | 22,4 | 25,1 |
| 9 | Кольцевой | 72,7 | 18,9 | 21,2 | 5,5 | 21,1 | 168,0 | 47,2 | 35,3 | 23,9 | 13,7 |
| 10 | Ткань | 46,6 | 58,5 | 18,6 | 12,1 | 13,8 | 50,0 | 177,3 | 12,7 | 23,5 | 28,5 |
| 11 | Кольцевой | 131,8 | 12,7 | 18,8 | 6,4 | 10,9 | 141,5 | 48,5 | 17,3 | 14,7 | 18,4 |

Примечание: σ_{xx} – напряжения вдоль армирования; σ_{yy} – напряжения поперек армирования; σ_{xy} – сдвиговые напряжения в плоскости слоя; σ_{yz} , σ_{xz} – сдвиговые поперечные напряжения.

Максимальные значения напряжений в армирующих слоях в локальной системе координат слоя OXYZ, где ось OX соответствует направлению армирования, ось OY поперек армирования, приведены в табл. 3. Поперечные межслойные напряжения σ_{zz} в таблице не приведены вследствие их малости (напряжения не превышают 14,97 МПа).

Изменения напряжения по толщине пакета объясняются разной жесткостью и соответственно разным уровнем нагружения слоев с разным направлением армирующих волокон при их совместном деформировании. Максимальные значения напряжений вдоль армирования наблюдаются вблизи отверстий в кольцевых и спиральных слоях, достигая значений $\sigma_{xx} = 230\text{--}254$ МПа (см. рис. 9, а), как у переднего, так и у заднего узла стыка (табл. 3). Сдвиговые напряжения в плоскости слоя σ_{xy} на переднем узле стыка больше межслойных и в основном не превышают 30 МПа, исключение составляют один слой у переднего и два слоя у заднего узла стыка, в которых напряжения σ_{xy} достигают значений порядка

32–38 МПа. В тканевых слоях на заднем узле стыка возникают высокие, до 177,9 МПа, напряжения по σ_{yy} (см. табл. 3), ориентированные вдоль оси сегмента (рис. 9, в). На рис. 9, в видно, что напряжения $\sigma_{yy} = 177$ МПа возникают в очень малой зоне – одном элементе, при этом среднее значение напряжения в этой зоне составляет приблизительно 75 МПа. Именно эти напряжения обеспечивают передачу осевых усилий от цилиндрической оболочки на торцевые крышки (рис. 9, в). Локальная зона высокой концентрации напряжений σ_{yy} частично объясняется заданием идеального контакта на границе «штифт – композит», анализ оценки влияния условий контакта с трением по границе «штифт – композит» на максимальные напряжения планируется продолжить в последующих исследованиях.

Интенсивность напряжений σ_i в металлическом закладном элементе приведена на рис. 11, максимальное значение $\sigma_i = 255,3$ МПа – в 2,7 раза меньше предела текучести материала.

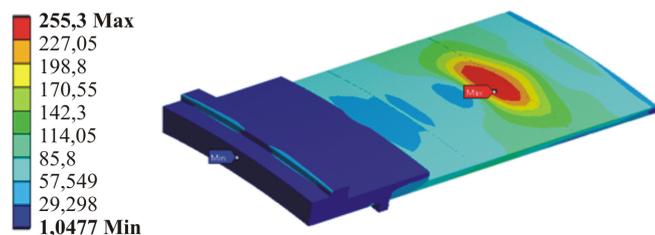


Рис. 11. Интенсивность напряжений в закладном элементе, МПа

Fig. 11. Stress intensity in the embedded element, MPa

Для оценки прочности композиционного материала в исследуемых сегментах использовались критерии максимальных напряжений в виде соотношений (3), (4) и критерий Хашина [36] в виде

$$fd(h) = \left(\frac{\sigma_{xx}}{S_{xx}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xz}}{S_{xz}}\right)^2, \quad (5)$$

где σ_{xx} , σ_{xy} и σ_{xz} – нормальные и касательные межслойные напряжения; S_{xx} , S_{xy} , S_{xz} – соответствующие пределы прочности материала. Значение критерия $fd \geq 1$ соответствует межслоевому разрушению. Критерий Хашина позволяет учесть возможное взаимное влияния нескольких компонент напряжений на межслоевую прочность. Пределы прочности материалов слоев приведены в табл. 4.

Таблица 4 / Table 4

Пределы прочности материалов (МПа)

Strength limits of materials (MPa)

| Армирование слоя | S_{xx} | S_{yy} | S_{xy} | S_{yz} | S_{xz} |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Однонаправленный ровинг | 2374 | 50 | 40 | 40 | 40 |
| Ткань | 620 | 320 | 32 | 32 | 32 |

Оценка запасов прочности исследованных сегментов по критерию максимальных напряжений (3) показала, что по напряжениям вдоль армирования ровингом или основой ткани во всех слоях запас прочности больше 10. В трех слоях, армированных тканью, запас прочности по напряжениям вдоль утка составляет порядка 1,8. Запас прочности в однонаправленных слоях, армированных ровингом, по поперечным напряжениям составляет порядка 1,1. Запас прочности по сдвиговым напряжениям σ_{xy} , σ_{yz} , σ_{xz} составил 1,4–1,6, запас прочности по межслойным нормальным напряжениям – 3,3.

Значение критерия Хашина (5) для межслойных напряжений в исследуемых сегментах не превышает 1 (см. табл. 5). Следовательно, можно предположить, что межслоевого разрушения композитной оболочки в окрестности закладных элементов с учетом комбинированного воздействия нормальных и касательных напряжений не происходит.

Обращают на себя внимание высокие значения сдвиговых напряжений σ_{xy} , σ_{yz} , σ_{xz} (табл. 3) в окрест-

ности отверстий на переднем и заднем узлах стыка. По критерию максимальных напряжений запас прочности по этим напряжениям составляет 1,4–1,6, а значение критерия Хашина в этих слоях достигает 0,96–0,99. Можно предположить, что эти напряжения являются потенциально опасными для возникновения и развития расслоений в этой зоне после повреждения композиционного материала в результате механической обработки.

Таблица 5 / Table 5

Значения по критерию Хашина

Values by Khashin's criterion

| № | Слой | Передний узел стыка | Задний узел стыка |
|----|------------|---------------------|-------------------|
| 1 | Кольцевой | 0,25 | 0,73 |
| 2 | Спиральный | 0,98 | 0,96 |
| 3 | Кольцевой | 0,43 | 0,35 |
| 4 | Спиральный | 0,97 | 0,98 |
| 5 | Кольцевой | 0,99 | 0,64 |
| 6 | Ткань | 0,13 | 0,92 |
| 7 | Кольцевой | 0,53 | 0,99 |
| 8 | Спиральный | 0,32 | 0,99 |
| 9 | Кольцевой | 0,56 | 0,97 |
| 10 | Ткань | 0,53 | 0,96 |
| 11 | Кольцевой | 0,30 | 0,45 |

Таким образом, расчет по модели второго уровня показал сложное напряженное состояние композитной оболочки в зоне штифто-шпилечного соединения и высокий уровень сдвиговых напряжений как в плоскости слоя, так межслойных, что может оказать влияние на прочность композитной конструкции. Межслойные напряжения являются наиболее опасными для возникновения и развития расслоений, поэтому при оценке прочности их необходимо учитывать. Представляет интерес использование разработанной двухуровневой модели для оценки влияния технологических дефектов типа расслоений, возникающих, например, по краям отверстий для штифтового соединения после механической обработки, на запасы прочности конструкции при эксплуатационной нагрузке, что будет являться предметом последующих исследований.

Заключение

1. Разработаны компьютерные модели, методика двухэтапного расчета НДС и оценки прочности крупногабаритной конструкции из композиционных материалов. На первом этапе решается задача для конструкции в целом и оцениваются напряжения и деформации, осредненные по толщине пакета слоев. На втором этапе для наиболее нагруженных сегментов конструкции решается трехмерная задача МДТТ, определяется полный набор напряжений в слоях конструкции.

2. Показано, что наиболее опасными для конструкции являются межслойные и сдвиговые напряжения в

плоскости слоев, локализованные в малых зонах в окрестности штифтового соединения. Эти напряжения могут вызвать появление и развитие расслоений, особенно после снижения прочности материала в результате механической обработки отверстий корпуса.

3. Представляет интерес дальнейшее развитие разработанных моделей для учета влияния наличия техно-

логических дефектов типа расслоения на НДС и прочность рассматриваемой конструкции.

4. Разработанная методика расчета НДС и оценки прочности композитной конструкции может использоваться для проектирования и диагностики технического состояния корпусов баллонов высокого давления из композиционных материалов.

Библиографический список

1. Полимерные композиционные материалы / С.Л. Баженов [и др.]. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2010. – 352 с.
2. Миллс Н. Конструкционные пластики – микроструктура, характеристики, применения. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. – 512 с.
3. Технические свойства полимерных материалов: уч.-справ. пос. / В.К. Крыжановский [и др.]. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. – 240 с.
4. Соколовский М.И. Композиты – основной материал ракетного твердотопливного двигателестроения (опыт ОАО «НПО «Искра») // Ракетные двигатели и проблемы освоения космического пространства. Т. 1 / под ред. И.Г. Ассовского, О.Д. Хайдена. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2005. – 520 с.: ил. (Космический вызов XXI века).
5. Конструкции ракетных двигателей на твердом топливе / Л.Н. Лавров, М.И. Соколовский, А.А. Болотов, В.И. Гапаненко. – М.: Машиностроение, 1993. – 215 с.
6. Сверхлегкие металлокомпозитные баллоны высокого давления для воздушных судов гражданской авиации / И.К. Лебедев, К.Н. Лебедев, Н.Г. Мороз, В.В. Никонов // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2015. – № 9. – С. 84–92.
7. Применение композитов в баллонах воздушных судов гражданской авиации / О.В. Дроздова, И.К. Лебедев, С.В. Лукьянец, В.В. Никонов // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2017. – № 16. – С. 45–50.
8. Flower H.M., Soutis C. Materials for airframes // *Aeronautical Journal*. – 2003. – Vol. 107, № 1072. – P. 331–341.
9. Образцов И.Ф., Васильев В.В., Бунаков В.А. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 144 с.
10. Смердов А.А. Оптимизация композитных структур в ракетно-космической технике. – М.: МВТУ, 2019. – 150 с.
11. Смердов А.А., Шон Ф.Т. Анализ эффективности оптимальных композитных оболочек многостеночной и трехслойной схем для отсеков ракет-носителей и разгонных блоков // Конструкции из композиционных материалов. – 2016. – № 3 (143). – С. 58–65.
12. Цифровое проектирование терморазмеростабильных конструкций из слоистого углепластика / В.А. Комаров, Е.А. Кишов, О.Г. Лайкова, А.А. Павлов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2021. – Т. 20, № 1. – С. 75–86.
13. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 514 с.
14. Скудра А.М., Булавс Ф.Я. Прочность армированных пластиков. – М.: Химия, 1982. 216 с.
15. Аношкин А.Н., Ташкинов А.А. Прогнозирование несущей способности композитных фланцев корпусных деталей авиадвигателей. – Пермь. Перм. гос. техн. ун-т, 1998. – 101 с.
16. Сапожников С.Б. Дефекты и прочность армированных пластиков: монография / под ред. О.Ф. Чернявского. – Челябинск: ЧГПУ, 1994. – 162 с.
17. Рогожников Е.Н. Влияние кольцевых расслоений на прочность штифто-шпилечного соединения в органопластиковых корпусах // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. – М.: НТЦ «Информатика» — филиал ФГУП «НИИСУ», 2017. – № 2 (185). – С. 3–6.
18. Гагауз Ф.М. Проблемы технологии формирования соединительных узлов конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Сборник научных трудов. ХАИ. – 2012. – № 4 (72). – С. 15–20.
19. Вашуков Ю.А., Климов Е.А. Анализ и моделирование напряженно-деформированного состояния отверстий с подкреплением в листовых деталях из композиционных материалов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 89–104.
20. Насонов Ф.А. Подкрепление крепежных отверстий в композитных деталях с помощью установки неметаллических втулок термокомпрессионным способом // Перспективные материалы и структурообразующие технологии. – 2019. – С. 460–463.
21. Ужва А.В., Сергиенко А.В., Шаповаленко В.А. Особенности проектирования закладных элементов несущих систем, применяемых для разъемных соединений в композитных элементах // Автомобиле- и тракторостроение: материалы международной научно-практической конференции: в 2 т., Минск, 14–18 мая 2018 года / отв. ред. Д.В. Капский. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2018. – С. 70–72.
22. Степанец Д.В. Исследование влияния близкого расположения закладных втулок к торцу сотовой панели на ее прочность методом конечных элементов // Уральский научный вестник. – 2019. – Т. 6, № 3. – С. 63–65.
23. Расчет на прочность трехслойной конструкции и закладных элементов / Г.Д. Кесельман, И.И. Зимин, Е.Н. Данилов [и др.] // Конструкции из композиционных материалов. – 2006. – № 1. – С. 6–15.
24. Болотин В.В., Воронцов А.Н. Образование остаточных напряжений в изделиях из слоистых композитов в процессе отверждения // Механика полимеров. – 1976. – № 5. – С. 790–795.
25. Расчет технологических напряжений в процессе производства бипластмассовых труб / А.Н. Аношкин, А.А. Ташкинов, А.Ф. Ларионов, А.Б. Поспелов // Вестник ПГТУ. Полимерные материалы. – Пермь: ПГТУ. – 1997. – № 3. – С. 24–32.
26. Безмельницын А.В., Сапожников С.Б. Многомасштабное моделирование и анализ механизма возникновения технологических межслойных напряжений в толстостенных кольцах из стеклопластика // Вестник Пермского национально-

го исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 2. – С. 5–22.

27. Сахабутдинова Л.Р., Сметанников О.Ю., Ильиных Г.В. Разработка методики расчета НДС композиционной оболочки в процессе изготовления // Прикладная математика и вопросы управления. – 2019. – № 3. – С. 84–99. DOI 10.15593/2499-9873/2019.3.05.

28. Бегеев Т.К., Гришин В.И., Литвинов В.Б. Исследование контактного взаимодействия в механических и клеевых соединениях // Ученые записки ЦАГИ. – 1992. – Т. 23, № 1. – С. 104–108.

29. Макаров В.Ф., Мешкас А.Е., Ширинкин В.В. Оптимизация процесса обработки высокотехнологичных композиционных материалов методом фрезерования // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: материалы VII Всероссийской науч.-техн. конф. (Уфа, 23–24 марта 2017 г.) / Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2017. – С. 9–17.

30. Абовский Н.П., Андреев Н.П., Деруга А.П. Вариационные принципы теории упругости и теории оболочек. – М.: Наука, 1978. – 287 с

31. Аношкин А.Н. Микромеханический анализ неупругого деформирования однонаправленных волокнистых компо-

зитов при многоосном нагружении и сдвиге // Механика композитных материалов. – 2003. – Т 39, № 5. – С. 575–586.

32. Аношкин А.Н. Модели нелинейного деформирования и разрушения композиционных материалов и конструкций // Вестник ПГТУ. Динамика и прочность машин. – Пермь: ПГТУ. – 2001 – № 2. – С. 11–19.

33. Басов К.А. ANSYS для конструкторов. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 247 с.

34. Бульбович Р.В., Ознобишин А.Б., Рогожникова Е.Н. Численно-экспериментальное исследование многослойных цилиндрических корпусов с локальными расслоениями // Вестник ПНИПУ Аэрокосмическая техника. – 2020. – № 63. – С. 40–51.

35. Карташова Е.Д., Муйземнек А.Ю. Технологические дефекты полимерных слоистых композиционных материалов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 2. – С. 79–89.

36. Гриневиц Д.В., Яковлев Н.О., Славин А.В. Критерии разрушения полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. – 2019. – № 7 (79). – С. 92–111. – DOI 10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111.

References

1. Bazhenov S.L. Polymer composite materials – *Dolgoprudny: Publishing house Intellect*, 2010. 352 p.

2. Mills N. Structural plastics-microstructure, characteristics, applications. *Dolgoprudny: Publishing House Intellect*. 2011, 512 p.

3. Kryzhanovsky V.K. Technical properties of polymer materials: Uch-sprav. pos. *Saint Petersburg, Publishing house "Profession"*, 2003-240 p.

4. Sokolovsky M.I. Composites - the main material of rocket solid-fuel engine building (the experience of JSC NPO Iskra). In the collection "Rocket engines and problems of space exploration". Volume 1. *Moscow, TORUS PRESS*, 2005, 520 p.: ill. (Space challenge of the XXI century).

5. Lavrov L.N. Designs of rocket engines on solid fuel. *Moscow, Mashinostroenie*, 1993, 215 p.

6. Lebedev I.K., Lebedev K.N., Moroz N.G., Nikonov V.V. Ultralight metal-composite high-pressure cylinders for civil aircraft. *Scientific Bulletin of GosNII GA*, 2015, no. 9, pp. 84-92.

7. Drozdov O.V., Lebedev I.K., Lukyanets S.V., Nikonov V.V. The Use of composites in cylinders civil aircraft. *Scientific Bulletin of GosNII GA*, 2017, No. 16, Pp. 45-50.

8. Flower, H. M., Soutis C. *Materials for airframes, Aeronautical Journal*, 2003, vol. 107, no. 1072 pp. 331-341.

9. Obraztsov I.F., Vasiliev V.V., V.A. Bunakov Optimal reinforcement of shells of revolution made of composite materials. *Moscow, Mashinostroenie*, 1977, 144 p.

10. Smerdov A.A. Optimization of composite structures in rocket and space technology. *MVTU*, 150 p, 2019.

11. Smerdov A.A., Shon F.T. Analysis of the effectiveness of optimal composite shells of multi-wall and three-layer schemes for compartments of launch vehicles and upper stages. *Constructions from composite materials*. 2016. No. 3 (143). pp. 58-65.

12. Komarov V.A., Kishov E.A., Laikova O.G., Pavlov A.A. Digital design of thermo-dimensionally stable structures made of layered carbon fiber. *Bulletin of the Samara University. Aerospace engineering, technologies and mechanical engineering*. 2021. Vol. 20. No. 1. pp. 75-86

13. Bulanov I.M., Vorobey V.V. Technology of rocket and aerospace structures made of composite materials. *Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University*, 1998, 514 p.

14. Skudra A.M., Bulavs F.Ya. Strength of reinforced plastics. *Moscow, Chemistry*, 1982, 216 p.

15. Anoshkin A.N., Tashkinov A.A. Forecasting the bearing capacity of composite flanges of aircraft engine body parts. *Perm, Perm National Research Polytechnic University.*, 1998, 101 p.

16. Sapozhnikov S.B. Defects and strength of reinforced plastics: Monograph. *Chelyabinsk, CHGPTU*, 1994, 162 p.

17. Rogozhnikova E.N. The influence of ring bundles on the strength of the pin-pin joint in organoplastic cases. *Questions of defense equipment. Ser. 15. Composite non-metallic materials in mechanical engineering. Moscow: STC "Informatika" - branch of FSUE "NIISU"*, 2017, no. 2 (185), pp. 3-6.

18. Gagauz F.M. Problems of technology of formation of connecting nodes of aircraft structures made of composite materials. *Issues of design and production of aircraft structures. Collection of scientific works. KHAI*, 2012, no. 4 (72), pp. 15-20.

19. Vashukov Yu.A., Klimov E.A. Analysis and modeling of the stress-strain state of holes with reinforcement in sheet parts made of composite materials. *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2018, no. 1 (25), Pp. 89-104.

20. Nasonov F.A. Reinforcement of mounting holes in composite parts by installing non-metallic bushings by thermocompression method. *Promising materials and structure-forming technologies*. 2019, pp. 460-463.

21. Uzhva A.V., Sergienko A.V., Shapovalenko V.A. Features of designing embedded elements of load-bearing systems used for detachable joints in composite elements. *Automobile and tractor construction. Materials of the International scientific and practical Conference in 2 volumes*, Minsk, May 14-18, 2018. Minsk: Belarusian National Technical University, 2018, pp. 70-72.

22. Stepanets D.V. Investigation of the influence of the proximity of the embedded bushings to-end honeycomb for her strength by finite element method. *Ural scientific Bulletin*, 2019, vol. 6, No. 3, pp. 63-65.

23. Keselman H.J., Zimin I., Danilov E.N. The calculation of the strength of three-layer design, and embedded elements. *Construction of composite materials*. 2006, no. 1, pp. 6-15.
24. Bolotin V.V., Vorontsov A.N. The formation of residual stress in the products of composite laminates during curing. *Mechanics of polymers*, 1976, No. 5, pp. 790-795.
25. Anoshkin A.N., Tashkinov A.A., Larionov A.F., Pospelov A.B. Calculation of technological stresses in the production of biplast pipes. *Bulletin of PSTU. Polymer materials*. 1997, No. 3, p. 24-32.
26. Bezmelnitsyn A.V., Sapozhnikov S.B. Multiscale modeling and analysis of the mechanism of occurrence of technological interlayer stresses in thick-walled fiberglass rings. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*, 2017, No. 2, pp. 5-22.
27. Sahabutdinova L.R., Smetannikov O.Yu., Ilyinykh G.V. Development of a method for calculating the VAT of a composite shell in the manufacturing process. *Applied Mathematics and management issues*, 2019, No. 3, pp. 84-99, DOI 10.15593/2499-9873/2019.3.05.
28. Begeev T.K., Grishin V.I., Litvinov V.B. Investigation of contact interaction in mechanical and adhesive joints. *Scientific notes of TsAGI*, 1992, Vol. 23, No. 1, pp. 104-108.
29. Makarov V.F., Meshkas A.E., Shirinkin V.V. Optimization of the processing of high-tech composite materials by milling. *Ufa, Modern trends in metalworking technologies and structures of metalworking machines and components: materials of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference. conf. (Ufa, March 23-24, 2017) / Ufa State University. aviac. tech. un-t*, p. 9-17.
30. Abovsky N.P., Andreev N.P., Deruga A.P. Variational principles of the theory of elasticity and the theory of shells. *Moscow, Nauka*, 1978, 287 p.
31. Anoshkin A.N. Micromechanical analysis of inelastic deformation of unidirectional fibrous composites under multiaxial loading and shear. *Mechanics of composite materials*. 2003, vol. 39, no. 5. pp. 575-586
32. Anoshkin A.N. Models of nonlinear deformation and destruction of composite materials and structures. *Bulletin of PSTU. Dynamics and strength of machines*. 2001, no. 2, pp. 11-19.
33. Basov K.A. ANSYS for designers. *Moscow, DMK Press*, 2016, 247 p. ISBN 978-5-9706037-2-7.
34. Bulbovich R.V., Oznobishin A.B., Rogozhnikova E.N. Numerical and experimental study of multilayer cylindrical shells with local bundles. *Bulletin of PNRPU Aerospace Engineering*, 2020, no. 63, pp. 40-51.
35. Kartashova E.D., Muzyemnek A.Yu. Technological defects of polymer layered composite materials. *News of higher educational institutions. The Volga region. Technical sciences*, 2017, No. 2, pp. 79-89.
36. Grinevich D.V., Yakovlev N.O., Slavin A.V. Criteria for the destruction of polymer composite materials (review). *Proceedings of VIAM*, 2019, no. 7 (79), Pp. 92-111 – DOI 10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Financing. The study was not sponsored.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.