

**Р.В. Бульбович<sup>1</sup>, А.Б. Ознобишин<sup>2</sup>, Е.Н. Рогожникова<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Научно-производственное объединение «Искра», Пермь, Россия

## **ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОРПУСОВ С ЛОКАЛЬНЫМИ РАССЛОЕНИЯМИ**

Проведено численно-экспериментальное исследование закономерностей влияния наиболее вероятных дефектов типа локальных расслоений внутри многослойных цилиндрических крупногабаритных корпусов на деформационные и прочностные характеристики корпусов вблизи их торцевого соединения. Проведен статистический анализ несплошностей при изготовлении отверстий под штифто-шпильное соединение на переднем и заднем узлах стыка. Для формирования выборки были обработаны результаты сопроводительных паспортов более 200 корпусов. По результатам ультразвуковой дефектоскопии определены площади несплошностей на переднем и заднем узлах стыка и в результате статистической обработки построены диаграммы распределения несплошностей. Изготовлены физические модели корпусов в виде многослойных цилиндрических колец с наличием в структуре вероятных дефектов типа локальных расслоений и проведены по стандартной методике испытания колец для исследования влияния локальных расслоений на деформационные и прочностные характеристики кольца. Установлена связь между относительным пределом прочности и коэффициентом несплошности (отслоений) композитной структуры кольца с использованием полученных экспериментальных данных. Разработана математическая модель и на ее основе осуществлено численное исследование закономерностей влияния локальных расслоений внутри многослойной структуры корпуса на напряженно-деформированное состояние в окрестности штифто-шпильного соединения торцов корпусов в условиях статического нагружения. Результаты численного моделирования подтверждают установленную из экспериментальных исследований на кольцевых образцах с локальными расслоениями зависимость величины относительного предела прочности от коэффициента несплошности. Дефект в виде расслоения, с одной стороны, приводит к снижению механических характеристик материала, а с другой стороны, приводит к концентрации напряжений в зоне расслоения. Суммарный эффект от расслоения выражается в увеличении соответствующих напряжений, характеризующих состояние нагруженной конструкции и, соответственно, снижение ее несущей способности. Установленная функциональная зависимость может служить основой для экспресс-тестирования и оценки возможного снижения ресурса реальной многослойной цилиндрической оболочки корпуса.

**Ключевые слова:** композиционный материал, штифто-шпильное соединение, прочность, расслоение, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, цилиндрическая оболочка, дефекты, разрушение, деформации, кольцевой образец, коэффициент несплошности.

**R.V. Bulbovich<sup>1</sup>, A.B. Oznobishin<sup>2</sup>, E.N. Rogozhikova<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>Research and Production Association "Iskra", Perm, Russian Federation

## **NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF MULTILAYERED CYLINDRICAL BODIES WITH LOCAL BUNDLES**

A numerical and experimental study of the regularities of the influence of the most likely defects such as local bundles inside multilayer cylindrical large-sized housings on the deformation and strength characteristics of the housings near their end connection is carried out. A statistical analysis of discontinuities in the manufacture of holes for pin-pin connection at the front and rear junctions of the joint is carried out. To form a sample, the results of accompanying passports of more than 200 buildings were processed. Based on the results of ultrasonic flaw detection, the areas of discontinuities at the front and rear junctions of the joint were determined, and as a result of statistical processing, diagrams of the distribution of discontinuities were constructed. Physical models of cases in the form of multilayered cylindrical rings with the presence of probable defects in the structure such as local bundles are made and, further, to conduct ring tests according to the standard method to study the effect of local bundles on the deformation and strength characteristics of the ring. The relationship between the relative strength limit and the coefficient of discontinuity (delamination) of the composite structure of the ring is established using the obtained experimental data. A defect in the form of a bundle, on the one hand, leads to a decrease in the mechanical characteristics of the material, and on the other hand, leads to a concentration of stresses in the bundle zone. The total effect of stratification is expressed in an increase in the corresponding stresses that characterize the state of the loaded structure, and, accordingly, a decrease in its load-bearing capacity. A mathematical model is developed and numerical modeling is performed on its basis.

**Keywords:** composite (material), pin-stud connection, strength, delamination, finite element method (FEM), mode of deformation, cylindrical shell, defects, damage, deformations, ring pattern, discontinuity coefficient.

## Введение

Современные композиционные «материал-конструкции» изготавливают из полуфабрикатов: армирующих волокон (стекло-, боро-, угле-, органоволокна) и матрицы (полимерной, углеродной, металлической, керамической). Успеху в развитии производства и продвижения в практику современных волокнистых конструкционных материалов способствовала механика композитов. Именно она стала научной основой для понимания, описания, прогнозирования и контроля конструкционных свойств всего многообразия материалов и технологии формирования изделий из них [1]. В настоящее время для изготовления тонкостенных оболочечных конструкций ракетно-космической техники, к которым предъявляются требования по прочности, жесткости и другим эксплуатационным характеристикам, широко применяют композиционные материалы (КМ).

При создании конструкций из композитов вопросы проектирования, оптимального армирования и разработки технологического процесса выступают тремя сторонами единой проблемы и не могут рассматриваться изолированно [2, 3]. Структура композита на уровне армирующих элементов определяет механические свойства материала: управляя укладкой волокон, можно в определенных пределах управлять анизотропией деформационных (жесткостных) и прочностных свойств сопротивлением материала, подстраивая их под действующие усилия [4, 5]. Возможности совершенствования прочностных свойств конструкций с позиции технологии достаточно велики, но при этом следует учитывать технологические ограничения, которые играют более весомую роль, чем в случае проектирования конструкций из металлов [6].

В структуре КМ могут возникать различного рода дефекты как внутри структурных элементов, так и на их межфазных границах, в частности когезионное и адгезионное разрушения, которые приводят к локальным нарушениям целостности и снижению прочности композитных конструкций. Особую опасность для тонкостенных оболочечных конструкций, работающих на растяжение и под давлением, представляют дефекты в виде когезионных

расслоений. Эти дефекты вызваны особенностями технологических процессов и механических характеристик материала. Они возникают вследствие плохого сопротивления слоистых КМ межслоевому сдвигу и поперечному отрыву как на стадии изготовления изделия, так и в процессе его эксплуатации [7]. В связи с этим актуальным является разработка методов расчета для оценки влияния дефектов на напряженно-деформированное состояние (НДС). Следует отметить, что численный анализ еще достаточно дорогостоящий и продолжительный по времени для широкомасштабных инженерных расчетов [8]. Появление несплошностей следует отнести к стохастическим явлениям, подчиняющимся своим закономерностям, знание которых необходимо для получения количественных оценок размеров мест расслоений композиционного материала и последующего использования этих параметров для оценки НДС дефектного композитного корпуса в виде многослойной цилиндрической оболочки.

Цель – численно-экспериментальное исследование закономерностей влияния наиболее вероятных дефектов типа локальных расслоений внутри многослойных цилиндрических крупногабаритных корпусов на деформационные и прочностные характеристики корпусов вблизи их торцевого соединения.

## Объект исследования и постановка задач

Объектом исследования является крупногабаритный композитный корпус в виде многослойной цилиндрической оболочки с наличием вероятных несплошностей – локальных расслоений для переднего и заднего узлов торцевого стыка корпусов. Для определения влияния локальных расслоений на работоспособность композитного корпуса были сформулированы следующие задачи:

1. Провести статистический анализ полученных ранее акустическим методом контроля результатов дефектоскопии более 200 корпусов.
2. Изготовить физические модели корпусов в виде многослойных цилиндрических колец с наличием в структуре вероятных дефектов типа локальных расслоений и далее провести по стандартной методике испытания

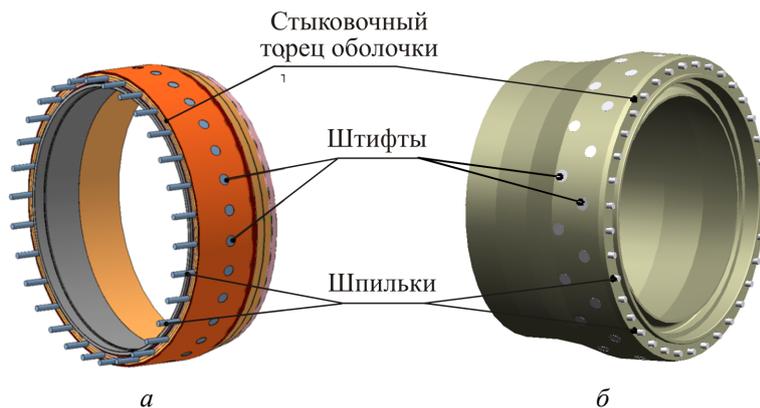


Рис. 1. Отверстия под штифто-шпилечное соединение на переднем (а) и заднем (б) узлах стыка

колец для исследования влияния локальных расслоений на деформационные и прочностные характеристики кольца.

3. Установить связь между относительным пределом прочности и коэффициентом несплошности  $k$  композитной структуры кольца с использованием полученных экспериментальных данных.

4. Разработать математическую модель и на ее основе осуществить численное исследование закономерностей влияния локальных расслоений внутри многослойной структуры корпуса на напряженно-деформированное состояние в окрестности штифто-шпилечного соединения торцов корпусов в условиях статического нагружения.

5. Подтвердить результатами численного моделирования установленную из экспериментальных исследований на кольцевых образцах с локальными расслоениями зависимость величины относительного предела прочности от коэффициента несплошности.

Для решения поставленных задач был проведен статистический анализ несплошностей при изготовлении отверстий под штифто-шпилечное соединение на переднем и заднем узлах стыка (рис. 1).

Для формирования выборки были обработаны результаты сопроводительных паспортов более 200 корпусов. Геометрия и место расположения дефектов представлены на деффектограмме (рис. 2) По результатам ультразвуковой дефектоскопии определены площади несплошностей на переднем и заднем узлах стыка и в результате статистической обработки построены диаграммы распределения несплошностей (рис. 3 и 4).

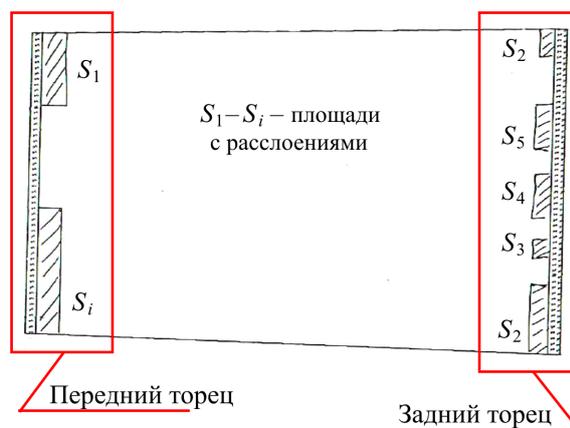


Рис. 2. Деффектограмма

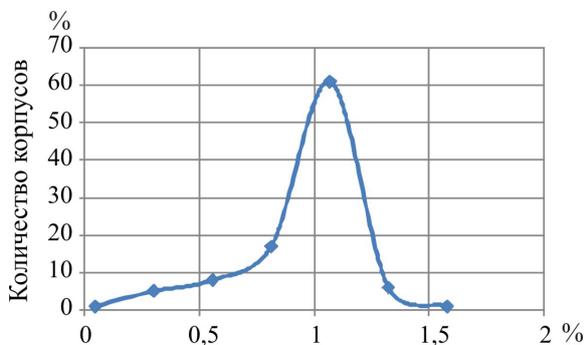


Рис. 3. Распределение несплошности по переднему узлу стыка

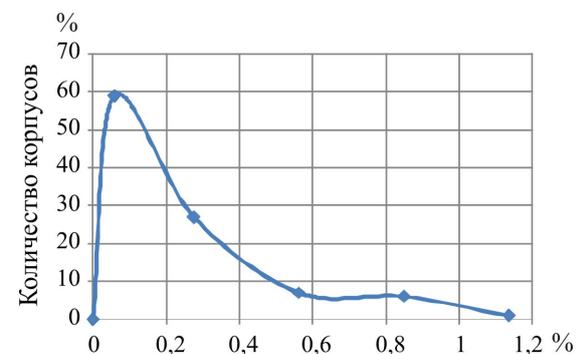


Рис. 4. Распределение несплошности по заднему узлу стыка

Таким образом, при анализе вероятностных диаграмм выявлена высокая вероятность расслоений в переднем узле стыка, при этом 50 % корпусов имеют 1 % расслоений от общей площади. На заднем узле стыка половина корпусов имеют незначительную площадь расслоения (менее 0,2 %).

Анализируя полученные данные для конструкций узлов стыков, можно сделать вывод о необходимости исследования влияния технологических напряжений на появление расслоений в области штифто-шпилечного соединения.

Поскольку технологические напряжения появляются в деталях на стадии формования в результате действия на полуфабрикат полимерного материала внешних сил, теплового воздействия, физических и химических процессов (кристаллизация, отверждение), которые протекают в материале одновременно и, как правило, сопровождаются изменением объема, после завершения указанных физических и химических процессов в конструкции появляются остаточные напряжения, которые действуют в течение всего срока предстартовой эксплуатации, улучшая или ухудшая эксплуатационные характеристики [9].

Согласно работам [10–12], при механической обработке (сверлении) деталей из КМ возникают дефекты, такие как отслоение и вырыв волокна. Из-за данных дефектов резко снижаются потенциальные возможности сформированной материальной структуры противодействовать усталостным напряжениям, что приводит к снижению ресурса конструкции и увеличивает вероятность появления отказа конструкции в процессе эксплуатации.

Вероятно, что при сверлении отверстий под штифты в первом ряду происходит перераспределение остаточных напряжений, поэтому при вскрытии отверстий второго ряда на заднем стыке расслоения не появляются.

В связи с существованием расслоений действующая технология изготовления высоконагруженных тонкостенных элементов конструкций летательных аппаратов из КМ требует решения вопросов регламентации (ограничений) возникающих дефектов. Для решения этой задачи необходимо оценить

влияние размеров и расположения локального расслоения по площади элемента конструкции на его НДС при характерных условиях нагружения [13].

### Результаты экспериментальных исследований

Для экспериментального изучения влияния расслоения на физико-механические характеристики были изготовлены кольцевые образцы с расслоениями (рис. 5).

Образцы были изготовлены из одной партии органожгута на эпоксидном связующем с внутренним диаметром 150 мм, шириной 12 мм и толщиной 1,2 мм (шесть слоев) (органоволокно Русар-С 600 А и связующее УП-2217). Изготовление кольцевых образцов производилось намоткой на металлическую оправку. Искусственные дефекты, моделирующие межслоевые расслоения, вносились в процесс намотки оболочек с помощью фторопластовой пленки. Размеры образцов и схемы расположения фторопластовой пленки приведены на рис. 5. Схемы расположения фторопласта (расслоения) в образце выбирались исходя из анализа встречающихся расслоений в цилиндрических оболочках. Образцы имели гладкую, ровную поверхность без вздутий, сколов, неровностей.

Образцы нагружали до разрушения с одновременной непрерывной записью значений текущей нагрузки, времени и перемещения полудисков. По полученным данным определялись: диаграмма деформирования в окружном направлении – зависимость окружного напряжения  $\sigma$  от деформации  $\epsilon$  (рис. 6); модуль упругости  $E$  и предел прочности  $\sigma_{пр}$ .

Для установления экспериментальной связи между характеристикой несплошности и относительным пределом прочности введем в рассмотрение коэффициент несплошности  $k$  (табл. 1), который характеризуется следующим выражением:

$$k = \frac{S_{\text{рассл}}}{S_{\text{общ}} n}, \quad (1)$$

где  $S_{\text{рассл}}$  – площадь поверхности расслоения;  $S_{\text{общ}}$  – площадь срединной поверхности образца;  $n$  – количество слоев в образце.

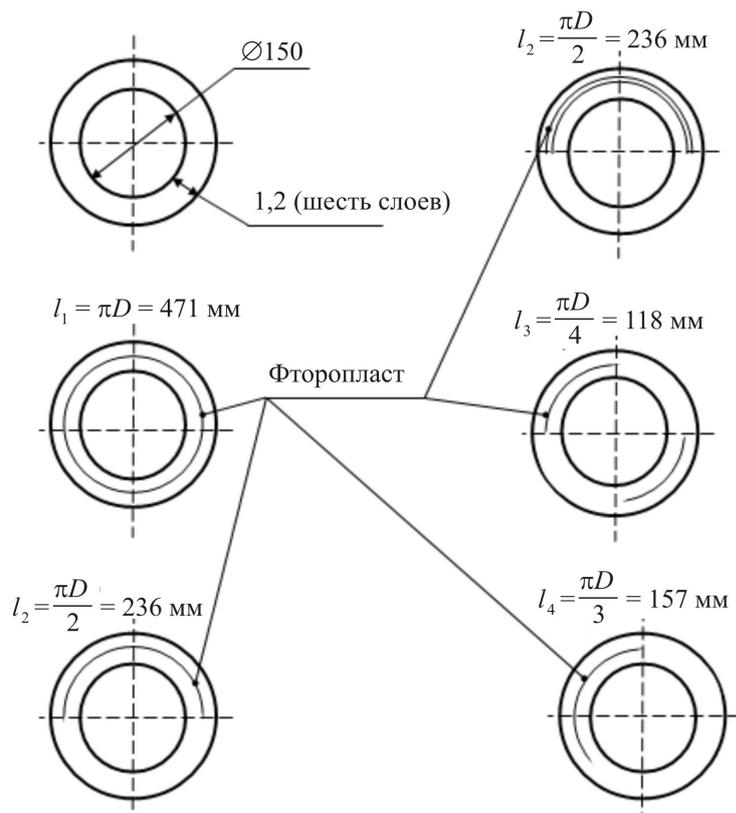


Рис. 5. Схемы образцов с расслоениями

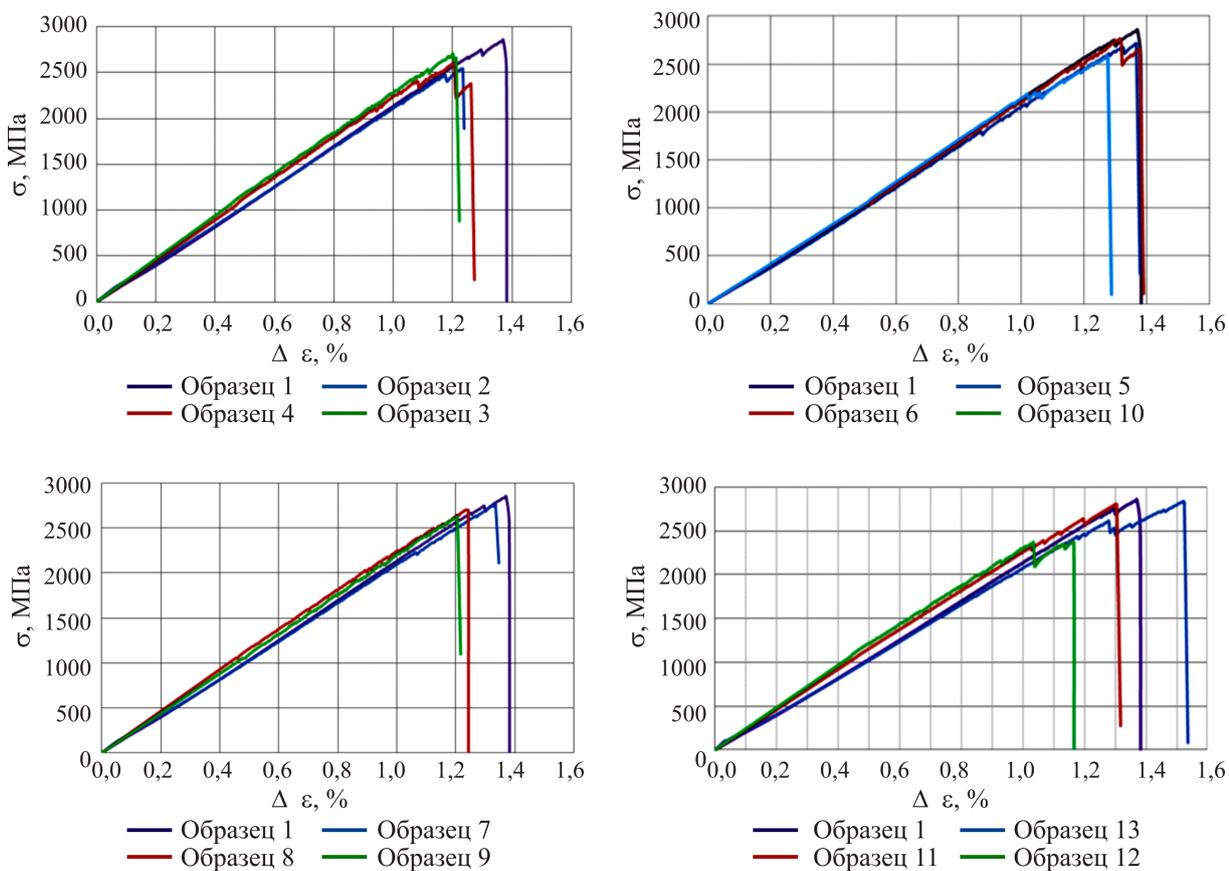


Рис. 6. Диаграммы растяжения образцов

Таблица 1

Площадь расслоения и коэффициент несплошности

Вид расслоения	$S_{\text{общ}}, \text{мм}^2$	$S_{\text{рассл}}, \text{мм}^2$	$n$	$k$
Сплошное	5652	5652	6	0,17
1/2 слоя	5652	2832	6	0,08
1/3 слоя	5652	1884	6	0,06

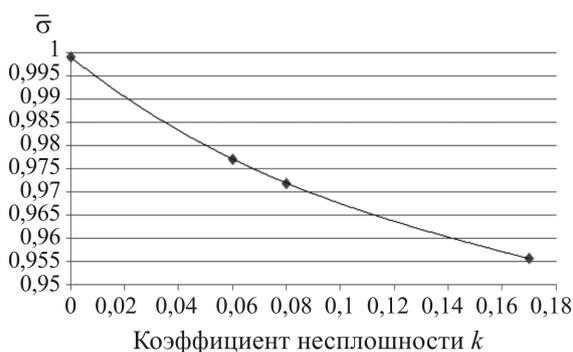


Рис. 7. Зависимость относительного предела прочности от коэффициента несплошности

Для описания зависимости относительного предела прочности от коэффициента несплошности, приведенной на рис. 7, была предложена полиномиальная зависимость

$$\bar{\sigma} = 0,9990 - 0,4622k + 1,8203k^2 - 3,5585k^3, \quad (2)$$

где  $\bar{\sigma}$  – относительный предел прочности,  $\bar{\sigma} = \sigma_{\text{в рассл}} / \sigma_{\text{в}}$ ;  $\sigma_{\text{в}}$ ,  $\sigma_{\text{в рассл}}$  – пределы прочности образца без расслоений и с внесенными расслоениями соответственно.

Полученная зависимость (2) может служить основой для экспресс-тестирования изготовленной композитной конструкции для оценки снижения предельных свойств материала конструкции при установленном уровне его несплошности.

### Результаты численного моделирования

НПО «Искра» совместно с ПНИПУ разработали методику расчета НДС крупногабаритной многослойной конструкции из разнородных материалов, позволяющую проводить численное исследование влияния расслоений на несущую способность корпусов. При помощи данной методики произведен расчет НДС корпуса (рис. 8), представляющего собой крупногабаритную многослойную конструкцию из разнородных материалов.

Для проведения численного расчета НДС были построены три геометрические модели в специализированном инженерном пакете САД-систем. Модель 1 построена в соответствии со схемой армирования конструкции без расслоений. 3D-модель корпуса разбита на сектора согласно схеме армирования, с отличающимися физико-механическими характеристиками (рис. 9). Для каждой области механические характеристики рассчитывались отдельно. Для расчета механических характеристик отдельных областей композитной конструкции использовались математические модели и компьютерные программы для упругих механических свойств однонаправленного и слоистого композиционных материалов.

В соответствии с методом локального приближения для прогнозирования упругих механических свойств волокнистых композитов рассматривались краевые задачи для фрагментов структурно неоднородной среды. В качестве моделей среды рассматривались структуры с тетрагональной укладкой волокон (рис. 10). Краевая задача осуществлялась на фрагментах моделей, содержащих волокно в центре и ближайший слой окружения (элементарная ячейка).

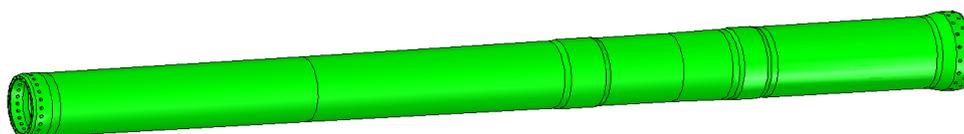


Рис. 8. Крупногабаритная многослойная конструкция



Рис. 9. 3D-модель крупногабаритной многослойной конструкции

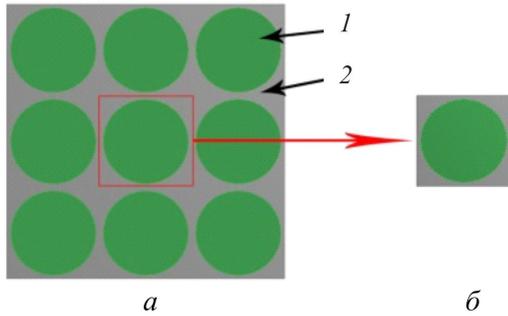


Рис. 10. Модель с тетрагональной укладкой волокон: *a* – представительный объем, *б* – ячейка периодичности; 1 – волокно, 2 – связующее

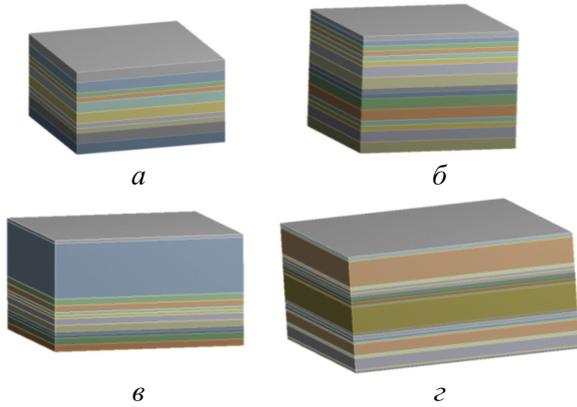


Рис. 11. Слоистый пакет из органопластика: *a* – шесть спиральных слоев с углами укладки [+26/-26], [+27/-27], [+28/-28] и четыре кольцевых; *б* – шесть спиральных слоев с углами укладки [+27/-27] и десять кольцевых слоев; *в* – шесть спиральных слоев с углами укладки [+28/-28], пять кольцевых слоев и пакет ткани из 18 слоев; *г* – шесть спиральных слоев с углами укладки [+26/-26], 15 кольцевых слоев и четыре пакета ткани

Для получения свойств многослойной конструкции использовались модули расчета эффективных упругих характеристик слоистых пакетов, секторов крупногабаритной многослойной конструкции из разнородных материалов. Построенные слоистые модели из органопластика для секторов приведены на рис. 11. В областях соприкосновения скрепленных элементов сборки задавался идеальный контакт (bonded). В местах расслоений между элементами конструкции задавались контактные граничные условия без трения.

Математическая постановка задачи соответствовала теории упругости анизотропного тела. В вариационной формулировке эта постановка для рассматриваемой неоднород-

ной конструкции заключается в отыскании минимума функционала Лагранжа с дополнительными условиями [14].

Вариация функционала при отсутствии массовых сил имеет вид

$$\delta J_u = \int_V \boldsymbol{\varepsilon}_{ij} C_{ijkl} \delta \boldsymbol{\varepsilon}_{kl} dV - \int_{S_i} \mathbf{F}_i \delta \mathbf{u}_i dS, \quad (3)$$

где  $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}$  и  $\delta \boldsymbol{\varepsilon}_{kl}$  – тензор и вариация тензора деформаций;  $C_{ijkl}$  – тензор упругих модулей;  $\delta \mathbf{u}_i$  – вариация вектора перемещений;  $\mathbf{F}_i$  – вектор внешних сил.

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 ( $p = 1$  – органопластик,  $p = 2$  – стеклопластик,  $p = 3$  – титан,  $p = 4$  – резина 1) с межслойной границей  $S_d$ .

Дополнительными условиями для функционала (3) являются геометрические уравнения

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (\mathbf{u}_{,ij} + \mathbf{u}_{,ji}).$$

Для каждого ортотропного слоя КМ подобласти  $V^{(1)}$  компоненты тензора модулей упругости  $C_{ijkl}^{(1)}$  зависят не только от материала, а также от ориентации главных осей анизотропии тензора относительно глобальной системы координат конструкции.

Рассматриваемые в рамках модели сектора силовой оболочки являются ортотропными и характеризуются девятью независимыми упругими константами: модулями Юнга  $E_x, E_y, E_z$ , коэффициентами Пуассона  $\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$  и модулями сдвига  $G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}$ , где  $x$  – направление основы,  $y$  – направление утка. Для определения эффективных упругих характеристик секторов были построены девять представительных объемов с соответствующими схемами армирования. Для рассматриваемых представительных объемов реализовано шесть различных нагружений: растяжение вдоль осей  $X, Y, Z$  с целью определения эффективных модулей Юнга и коэффициентов Пуассона и чистые сдвиги в плоскостях  $XY, XZ, YZ$  для определения модулей сдвига. Эффективные модули получены осреднением по объему [15] по следующим зависимостям:

$$E_x^* = \frac{\langle \sigma_x \rangle}{\varepsilon_x}, \quad E_y^* = \frac{\langle \sigma_y \rangle}{\varepsilon_y}, \quad E_z^* = \frac{\langle \sigma_z \rangle}{\varepsilon_z},$$

$$G_{yz}^* = \frac{\langle \tau_{yz} \rangle}{\gamma_{yz}}, \quad G_{xz}^* = \frac{\langle \tau_{xz} \rangle}{\gamma_{xz}},$$

$$\nu_{xy} = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right|, \quad \nu_{yz} = \left| \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_y} \right|, \quad \nu_{xz} = \left| \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \right|,$$

Таблица 2

Результаты испытаний и численных расчетов

Верифицируемая деформационная характеристика	Испытание	Расчет
Максимальное увеличение диаметра, мм	4,09	3,8
Удлинение корпуса, мм	-0,74	-0,68

где деформации  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  и  $\gamma_{ij}$  были predeterminedены в численных экспериментах.

Средние напряжения и деформации определялись по следующим соотношениям:

$$\sigma_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n \sigma_{ij}^k V^k}{V}, \quad \varepsilon_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n \varepsilon_{ij}^k V^k}{V}; \quad i, j = x, y, z,$$

где  $n$  – общее количество конечных элементов;  $\sigma_{ij}^k$  – напряжение в конечном элементе;  $\varepsilon_{ij}^k$  – деформация в конечном элементе;  $V^k$  – объем конечного элемента;  $V$  – полный объем модели.

Верификация разработанной математической модели проводилась сравнением результатов численного моделирования НДС крупногабаритной многослойной конструкции из разнородных материалов с результатами испытаний корпусов.

В табл. 2 представлены результаты верификации (результаты испытания и численных расчетов) по деформативным характеристикам исследуемой конструкции.

После получения сходимости численного и экспериментального исследования результаты граничных условий переносились на усеченные модели (рис. 12).

С целью полуавтоматического построения геометрических моделей крупногабаритной многослойной конструкции из ПКМ были разработаны и согласованы компьютерные модели исследуемого объекта с различной степенью детализации с поддержкой САД-параметризации.

С использованием разработанной модели был проведен анализ влияния расслоения на НДС корпуса. Дефект в виде расслоения задавался в районе переднего и заднего узлов стыка. При этом ранее введенный коэффициент несплошности  $k$  (см. формулу (1)) принимал в конструкции следующие значения: 0 (стыки без расслоений); 0,01; 0,042; 0,06; 0,08 и 0,17. Для сокращения времени счета и исключения нелинейных конечных элементов дефект в виде расслоения моделировался через раскрепленное контактное граничное условие.

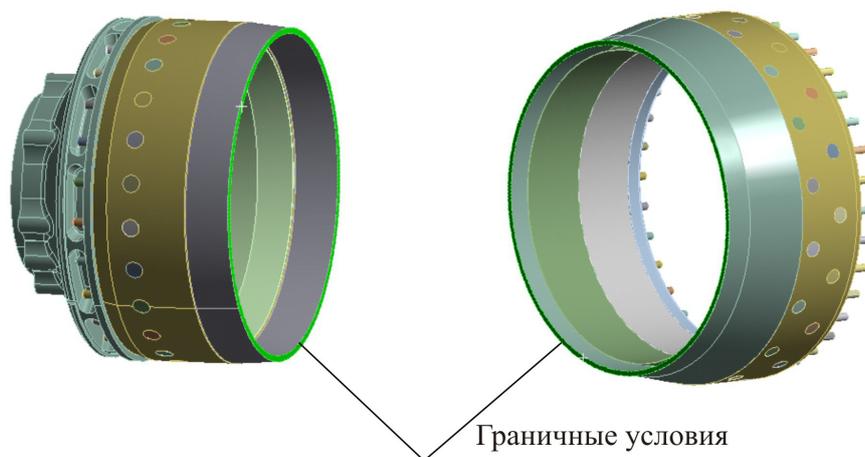


Рис. 12. Усеченные 3D-модели

Таблица 3

## Результаты численного расчета

$k$	0	0,01	0,042	0,06	0,08	0,17
$\bar{\sigma}$	1,000	0,995	0,983	0,977	0,972	0,956
$\sigma_x$ , МПа	189,04	190,37	193,13	195,4	197,9	200,7
$\sigma_y$ , МПа	778,32	780,57	806,82	814,01	817,97	826,47
$\sigma_z$ , МПа	282,63	283,17	285,71	286,15	288,8	298,26
$k_{\sigma_x}$	1,000	0,993	0,978	0,972	0,953	0,938
$k_{\sigma_y}$	1,000	0,997	0,963	0,954	0,949	0,938
$k_{\sigma_z}$	1,000	0,998	0,989	0,988	0,978	0,944
$k_{\sigma_{ср}}$	1,000	0,996	0,977	0,971	0,960	0,940
$\varepsilon$ , %	0	+0,10	-0,61	-0,62	-1,25	-1,70

Дефект в виде расслоения, с одной стороны, приводит к снижению механических характеристик материала, а с другой стороны, приводит к концентрации напряжений в зоне расслоения. Суммарный эффект от расслоения выражается в увеличении соответствующих напряжений, характеризующих состояние нагруженной конструкции и, соответственно, снижение ее несущей способности. Снижение несущей способности в определенном направлении можно охарактеризовать соответствующим коэффициентом  $k_{\sigma_i}$

$$k_{\sigma_i} = 1 - \frac{\Delta\sigma_{\text{рассл } i}}{\sigma_{\text{б/р } i}}, \quad (4)$$

где  $\Delta\sigma_{\text{рассл } i}$  – снижение несущей способности конструкции в  $i$ -м направлении, вызванное расслоением,  $\Delta\sigma_{\text{рассл } i} = \sigma_{\text{рассл } i} - \sigma_{\text{б/р } i}$ ;  $\sigma_{\text{рассл } i}$ ,  $\sigma_{\text{б/р } i}$  – рассматриваемое максимальное напряжение в соответствующем  $i$ -м направлении в конструкции с расслоением и без расслоения соответственно.

В табл. 3 приведены рассчитанные экстремальные значения напряжений в соответствующих направлениях  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  для различных значений коэффициента несплошности конструкции, соответствующие им коэффициенты  $k_{\sigma_x}$ ,  $k_{\sigma_y}$ ,  $k_{\sigma_z}$ , характеризующие снижение несущей способности конструкции, а также значения относительного предела прочности  $\bar{\sigma}$ , рассчитанного для заданных значений коэффициента несплошности по формуле (4).

Анализ данных табл. 3 показывает, что коэффициенты, характеризующие снижение несущей способности конструкции  $k_{\sigma_x}$ ,  $k_{\sigma_y}$ ,  $k_{\sigma_z}$ , практически инвариантны по отношению к относительному пределу прочности, и снижение несущей способности конструкции можно характеризовать некоторым средним значением коэффициента  $k_{\sigma_{ср}}$ :

$$k_{\sigma_{ср}} = \frac{k_{\sigma_x} + k_{\sigma_y} + k_{\sigma_z}}{3}.$$

Сопоставление значений  $k_{\sigma_{ср}}$  и  $\bar{\sigma}$  говорит о достаточной близости этих параметров, расхождение не превышает 1,7 % для коэффициента несплошности 0,17.

Таким образом, зависимость относительного предела прочности от коэффициента несплошности (2) подтверждена численными исследованиями НДС корпуса (см. табл. 3) и зависимость (2), определенная на образцах с расслоениями, может служить основой для экспресс-тестирования изготовленной композитной конструкции в отношении снижения ее ресурсной способности.

### Заключение

1. На основании исследования расслоения более 200 корпусов построены вероятностные диаграммы распределения несплошностей для переднего и заднего узлов стыка, которые формируют исходную информацию для проведения расчета НДС с учетом несплошностей.

2. С целью исследования влияния межслоевых расслоений на прочностные и деформационные характеристики КМ изготовлены кольцевые образцы с внесенными дефектами и по стандартной методике проведены их испытания, которые подтвердили отрицательное влияние расслоений.

3. Разработана оптимальная модель для численного расчета напряженно-деформированного состояния крупногабаритной многослойной конструкции из разнородных материалов, погрешность которой по сравнению с экспериментом минимальна.

4. Численными исследованиями НДС корпуса с расслоениями подтверждено, что относительное снижение несущей способности конструкции инвариантно относительно направлений действия напряжений и эквивалентно снижению относительного предела прочности от коэффициента несплошности (2).

5. Зависимость относительного предела прочности от коэффициента несплошности (2), определенная на образцах с расслоениями, может служить основой для экспресс-тестирования изготовленной композитной конструкции в отношении снижения ее ресурсной способности.

#### Библиографический список

1. Болотин В.В., Гольденблат И.И., Смирнов А.Ф. Строительная механика. Современное состояние и перспективы развития: учеб. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1972. – 191 с.
2. Григолюк Э.И., Куликов Г.М. Развитие общего направления в теории многослойных оболочек // Механика композитных материалов. – 1988. – № 2. – С. 287–298.
3. Композиционные материалы: справ. / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин [и др.]; под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 510 с.
4. Елпатьевский А.Н., Васильев В.В. Прочность цилиндрических оболочек из армированных материалов. – М.: Машиностроение, 1972. – 168 с.
5. Первушин Ю.С., Жернаков В.С. Основы механики, проектирования и технологии изготовления изделий из слоистых композиционных материалов: учеб. пособие / Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2008. – 303 с.
6. Зиновьев П.А., Смердов А.А. Предельные возможности многослойных композитных структур // Известия РАН. Механика твердого тела. – 1994. – Т. 1. – С. 7–17.
7. Будилов И.Н. Расчет силовых и энергетических параметров разрушения в области вершины трещины в обечайке теплообменного аппарата // Вестник УГАТУ. – 2016. – Т. 20, № 2 (72). – С. 3–10.
8. Матвиенко Ю.Г. Моделирование деформирования и разрушения тел с надрезами // Вестник научно-технического развития. – 2010. – № 9 (37). – С. 37–41.
9. Бохоева Л.А., Рогов В.Е., Чермошнцева А.С. Определение критических нагрузок с помощью энергетического критерия устойчивости для локального круглого дефекта // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 4 (24). – С. 32–37.
10. Гагауз Ф.М. Проблемы технологии формирования соединительных узлов конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. ХАИ. – 2012. – № 4 (72). – С. 15–20.
11. 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 Всерос. науч.-техн. конф., г. Уфа, 23–24 марта 2017 г. / Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2017. – С. 9–17.
12. Макаров В.Ф., Мешкас А.Е., Ширинкин В.В. Технологии, позволяющие повысить эффективность обработки композиционных материалов // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2015. – Т. 1. – С. 179–189.
13. Дементьев И.И., Устинов А.Н. Метод снижения остаточных напряжений в композитных элементах конструкций космических аппаратов // Альманах современной науки и образования. – 2017. – № 6 (119). – С. 27–31.
14. Абовский Н.П., Андреев Н.П., Деруга А.П. Вариационные принципы теории упругости и теории оболочек. – М.: Наука, 1978. – 287 с.
15. Numerical prediction of the elastic characteristics of spatially reinforced composite materials / A.N. Anoshkin, P.V. Pisarev, D.A. Ermakov, K.A. Maksimova // IOP Conf. Series: Materials Sci. and Eng. – 2017. – No. 286. – P. 012029. DOI: 10.1088/1757-899X/286/1/012029

## References

1. Bolotin V.V. *Stroitel'naya mekhanika. Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya: ucheb-nik* [Construction mechanics. Current state and development prospects: textbook]. Moscow: Stroyizdat, 1972, 191 p.
2. Grigolyuk E.I. *Razvitiye obshchego napravleniya v teorii mnogosloynnykh obolochek* [Development of the General direction in the theory of multilayer shells]. *Mekhanika kompozitnykh materialov* (Mechanics of Composite Materials), 1988, no. 2, pp. 287–298.
3. V.V. Vasiliev, V.D. Protasov, V.V. Bolotin [et al.]. *Kompozitsionnyye materialy: spravochnik* [Composite materials: reference]. M.: Mashinostroyeniye, 1990, 510 p.
4. Elpatyevskiy A.N., Vasilyev V.V. *Prochnost tsilindricheskikh obolochek iz armirovannykh materialov* [Strength of cylindrical shells made of reinforced materials]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1972, 168 p.
5. Pervushin Yu.S. *Osnovy mekhaniki, proyektirovaniya i tekhnologii izgotovleniya izdeliy iz sloistykh kompozitsionnykh materialov: ucheb. posobiye* [Fundamentals of mechanics, design and manufacturing technology of products made of layered composite materials: textbook. Manual]. Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2008, 303 p.
6. Zinovyev P.A. *Predelnyye vozmozhnosti mnogosloynnykh kompozitnykh struktur* [Limiting possibilities of multilayer composite structures]. *Mechanics of Solids. A Journal of Russian Academy of Sciences*, 1994, vol. 1, pp. 7–17.
7. Budilov I.N. *Raschet silovykh i energeticheskikh parametrov razrusheniya v oblasti vershiny tresh-chiny v obechayke teploobmennogo apparata* [Calculation of power and energy parameters of destruction in the area of the crack tip in the heat exchanger shell]. *Vestnik USATU*, 2016, vol. 20, no. 2 (72), pp. 3–10.
8. Matviyenko Yu.G. *Modelirovaniye deformirovaniya i razrusheniya tel s nadrezami* [Modeling of deformation and destruction of bodies with incisions]. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, Moscow, 2010, no. 9 (37), pp. 37–41.
9. Bokhoyeva L.A. *Opredeleniye kriticheskikh nagruzok s pomoshchyu energeticheskogo kriteriya ustoychivosti dlya lokalnogo kruglogo defekta* [Determination of critical loads using the energy stability criterion for a local round defect]. *Systems. Methods. Technologies*. Bratsk: Bratsk state University, 2014, no. 4 (24), pp. 32–37.
10. Gagauz F.M. *Problemy tekhnologii formirovaniya soyedinitelnykh uzlov konstruktsiy letatelnykh apparatov iz kompozitsionnykh materialov* [Problems of technology for forming connecting nodes of aircraft structures made of composite materials]. *Voprosy proyektirovaniya i proizvodstva konstruktsiy letatelnykh apparatov. Sbornik nauchnykh trudov. KhAI*, 2012, no. 4 (72), pp. 15–20.
11. Makarov V.F. *Optimizatsiya protsessa obrabotki vysokotekhnologichnykh kompozitsionnykh materialov metodom frezerovaniya* [Optimization of the processing of high-tech composite materials by milling]. *Sovremennyye tendentsii v tekhnologiyakh metalloobrabotki i konstruktsiyakh metalloobratyvayushchikh mashin i komplektuyushchikh izdeliy: materials of the VII all-Russian scientific and technical conference*. (Ufa, March 23–24, 2017), Ufa State Aviation Technical University, Ufa, pp. 9–17.
12. Makarov V.F. *Tekhnologii, pozvolyayushchiye povysit effektivnost obrabotki kompozitsionnykh materialov* [Technologies that make it possible to increase the efficiency of processing composite materials]. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokkiye tekhnologii i innovatsii*. 2015, vol. 1, pp. 179–189.
13. Demytyev I.I. *Metod snizheniya ostatochnykh napryazheniy v kompozitnykh elementakh konstruktsiy kosmicheskikh apparatov* [Method of reducing residual stresses in composite elements of spacecraft structures]. *Almanakh sovremennoy nauki i obrazovaniya*, Tambov: limited liability company Publishing house "Gramota", 2017, no. 6 (119), pp. 27–31.
14. Abovskiy N.P. *Variatsionnyye printsipy teorii uprugosti i teorii obolochek* [Variational principles of elasticity theory and shell theory]. Moscow: Nauka, 1978, 287 p.
15. Anoshkin A.N. *Numerical prediction of the elastic characteristics of spatially reinforced composite materials* / A.N. Anoshkin, P.V. Pisarev, D.A. Ermakov, K.A. Maksimova // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 286 (2017), 012029. DOI: 10.1088/1757-899X/286/1/012029

### Об авторах

**Бульбович Роман Васильевич** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: bulbovich@pstu.ru).

**Ознобишин Алексей Борисович** (Пермь, Россия) – начальник сектора ПАО НПО «Искра» (614038, г. Пермь, ул. Академика Веденеева, д. 28, e-mail: oab730@iskra.perm.ru).

**Рогожникова Елена Николаевна** (Пермь, Россия) – инженер-конструктор ПАО НПО «Искра» (614038, г. Пермь, ул. Академика Веденеева, д. 28, e-mail: rogoznikova@59.ru).

### About the authors

**Roman V. Bulbovich** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: bulbovich@pstu.ru).

**Aleksey B. Oznobishin** (Perm, Russian Federation) – Head of Section, PJSC “Research and Production Association “Iskra” (28, Akademika Vedeneeva st., Perm, 614038, Russian Federation, e-mail: oab730@iskra.perm.ru).

**Elena N. Rogozhikova** (Perm, Russian Federation) – Design Engineer, PJSC “Research and Production Association “Iskra” (28, Akademika Vedeneeva st., Perm, 614038, Russian Federation, e-mail: rogoznikova@59.ru).

Получено 30.10.2020