

осуществлялось с помощью контакта «AUTOMATIC_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK». Данный тип контакта позволяет учитывать разрушение клеевого соединения между слоями.

Все используемые при численном моделировании физико-механические характеристики материалов соответствуют режиму испытаний RTD (Room Temperature Dry) – испытания, проведенные при комнатной температуре +23 °С и влажности в состоянии поставки (состояние, в котором находятся образцы сразу после изготовления, содержание влаги в них не превышает 10 % от максимального влагонасыщения при относительной влажности 85 %). Данные характеристики получены от производителей материалов (клеявого препрега и заполнителя).

В результате исследования определялась критическая сила разрушения, а также общий вид разрушения сотовой панели. Из численного исследования получено, что критическая сила разрушения панели составляет 6,3 кН.

Экспериментальное исследование проводилось в соответствии с ГОСТ Р 56816-2015 [1] на сервогидравлической испытательной машине INSTRON 5985. Скорость нагружения образцов равна скорости движения пресса при численном исследовании. Общее количество испытанных образцов – 12 шт. По результатам натурных испытаний получена средняя критическая сила разрушения панелей, которая равна 6,79 кН.

Из результатов расчетно-экспериментального исследования следует, что расхождение критической силы разрушения панели составляет ~7 %. Данное расхождение обусловлено идеализацией граничных условий в расчетном исследовании, а также разбросом реальных свойств материалов.

В работе проведено сравнение характера разрушения панелей. По результатам исследований получена одинаковая картина разрушения: локальная потеря устойчивости сотового заполнителя, разрушение клеевого соединения между верхней обшивкой и сотовым заполнителем.

Проведенное расчетно-экспериментальное исследование подтвердило эффективность использования МКЭ для анализа трехслойных панелей с сотовым заполнителем, а также адекватность предложенного в работах [2–6] метода моделирования трехслойных панелей.

Список литературы

- 1 ГОСТ Р 56816-2015. Композиты полимерные. Определение механических характеристик при сжатии материала внутреннего слоя «сэндвич»-конструкций перпендикулярно к плоскости образца. – М. : Стандартформ, 2016. – 14 с.
- 2 Исследование напряженно-деформированного состояния трехслойной панели с сотовым заполнителем при наличии внутренних дефектов / А. Л. Медведский, М. И. Мартиросов, А. В. Хомченко, Д. В. Дедова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – Вып. 2. – С. 675–684.
- 3 Поведение трёхслойных панелей с сотовым заполнителем из полимеросотопластов повышенной плотности с внутренними дефектами при действии реактивной струи двигателя / Л. Н. Рабинский, М. И. Мартиросов, Д. В. Дедова, А. В. Хомченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – Вып. 3. – С. 298–303.
- 4 Influence of Internal Defects on the Stress-Strain State of a Three-Layer Panel with Different Honeycomb Fillers / D. V. Dedova, E. L. Kuznetsova, M. I. Martirosov, A. V. Khomchenko // Russian Engineering Research. – 2023. – Vol. 43, № 11. – P. 1457–1460.
- 5 Dynamics of Composite Cylindrical Panels with Honeycomb Filler after Internal Damage by Aircraft Engine Jet / L. N. Rabinsky, M. I. Martirosov, A. V. Khomchenko, D.V. Dedova // Russian Engineering Research. – 2024. – Vol. 44, № 5. – P. 726–729.
- 6 Impact on Three-Layer Cylindrical Panel with Fiberglass Filler / L. N. Rabinsky, M. I. Martirosov, D. V. Dedova [et al.] // Russian Engineering Research. – 2025. – Vol. 45, № 1. – P. 119–122.

УДК 539.3

ТЕОРИЯ СТЕРЖНЕЙ И ПЛАСТИН ДЛЯ ГРАДИЕНТНЫХ ПОРИСТЫХ СРЕД: КОРРЕКТНЫЕ ВАРИАЦИОННЫЕ ПОСТАНОВКИ

М. С. ЕГОРОВА, О. В. ТУШАВИНА

Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

В настоящей работе решается актуальная задача построения корректных математических моделей деформирования тонкостенных конструкций для неклассических пористых сред с учётом масштабных эффектов. Предложена обобщённая вариационная модель градиентной пористой среды, синтезирующая подходы Миндлина и Тупина. Основное отличие разработанной модели заключает-

ся в одновременном учёте градиентов совместных и несовместных деформаций, а также введении алгебраической пористости как независимого кинематического параметра. На основе вариационного принципа Лагранжа получена полная система уравнений равновесия и граничных условий, которая охватывает как частные случаи классическую теорию упругости, среду с алгебраической пористостью и различные градиентные теории.

Особое внимание уделено построению прикладных моделей цилиндрического изгиба стержней и пластин. Показано, что традиционный подход, основанный на непосредственном применении гипотез Бернулли или Кирхгофа – Лява, приводит к нефизичному изменению изгибной жёсткости за счёт градиентных поправок. В отличие от этого, разработанная корректная модель исключает указанные недостатки и сохраняет физическую адекватность при стремлении толщины конструкции к нулю. Предложена оригинальная модель типа Тимошенко, учитывающая деформацию сдвига и содержащая независимое уравнение для поля пористости.

Теоретически обосновано, что характерные масштабные параметры, входящие в модель, определяют различные физические эффекты, связанные с градиентными свойствами и дефектной структурой материала. Показано, что в корректной постановке изгибная жёсткость не модифицируется градиентными поправками, что соответствует физическим ожиданиям и экспериментальным данным.

Полученные результаты имеют важное практическое значение для проектирования и расчёта тонкостенных элементов в авиационно-космической технике, микроэлектронике и биомеханике. Предложенные корректные вариационные постановки открывают возможности для разработки эффективных численных методов решения краевых задач. Дальнейшие исследования предполагают экспериментальную верификацию модели, учёт нелинейных эффектов и разработку методов идентификации масштабных параметров для конкретных классов материалов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSFF-2025-0001).

УДК 539.3,539.8

ТЕРМОМЕХАНОДИФФУЗИЯ СПЛОШНОГО ЦИЛИНДРА, НАХОДЯЩЕГОСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ОБЪЁМНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

А. В. ЗЕМСКОВ

*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация
НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация*

Д. О. КАЗИМИРОВ, А. В. МАЛАШКИН

Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Работа посвящена моделированию нестационарных объёмных возмущений в цилиндре. Рассматриваемый эффект возникает под действием механических возмущений на деформируемое тело, что сопровождается появлением тепловых и диффузионных потоков. Эти потоки, в свою очередь, оказывают влияние на напряжённо-деформированное состояние среды. Изучение взаимодействия указанных полей представляет интерес не только с теоретической, но и с практической точки зрения, поскольку подобные цилиндрические тела лежат в основе многих технических систем, включая трубопроводы, нефте- и газопроводы, элементы систем отопления, а также различные валы, втулки и другие конструктивные детали (рисунок 1).

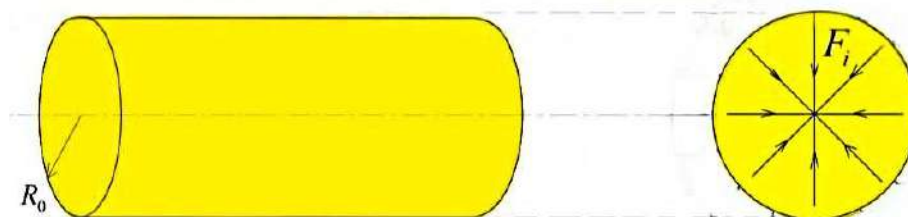


Рисунок 1 – Иллюстрация к постановке задачи