

Научная статья

УДК 621.7-2

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185681>

EDN: <https://www.elibrary.ru/VATJBI>



Разработка технологии изготовления активной части конструктивно-подобного элемента интеллектуальной конструкции из полимерных композиционных материалов

Павел Викторович Писарев¹, Станислав Равилевич Баяндин^{2✉}

^{1, 2} Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация

¹ pisarev85@live.ru

² srbajandin@pstu.ru ✉

Аннотация. Проведено численное исследование влияния месторасположения пьезоактуатора в структуре активной части конструктивно-подобного элемента (КПЭ) smart-конструкции из полимерных композиционных материалов (ПКМ) на статическую прочность. Определено рациональное расположение пьезоактуаторов, при котором достигается требуемая прочность и угол кручения smart-конструкции. Разработана технология изготовления активной части КПЭ smart-конструкции методом автоклавного формования. По разработанной технологии изготовлена активная часть КПЭ smart-конструкции с применением равнопрочных авиационных углепрепрегов. Осуществлен неразрушающий контроль активной части, выполненной из ПКМ, на наличие дефектов. Осуществлены лабораторные испытания механического поведения КПЭ smart-конструкции, и оценена возможность управления углом кручения активной части КПЭ smart-конструкции.

Ключевые слова: smart-конструкции из ПКМ, пьезоэлектрическая термоаналогия, численное моделирование механического поведения слоистой конструкции, конструкция с управляемой геометрией, автоклавное формование

Финансирование: исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке государственного задания (проект No. FSNM-2023-0006).

Для цитирования: Писарев П.В., Баяндин С.Р. Разработка технологии изготовления активной части конструктивно-подобного элемента интеллектуальной конструкции из полимерных композиционных материалов // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 3. С. 208–220. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185681>

Original article

Manufacturing Technology Development of a Smart Structure Active Part from Polymer Composite Materials

Pavel V. Pisarev¹, Stanislav R. Bayandin^{2✉}

^{1, 2} Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

¹ pisarev85@live.ru

² srbajandin@pstu.ru ✉

© Писарев П.В., Баяндин С.Р., 2025

Abstract

New products development of aerospace engineering is one of the prospective trends for the smart structures design. Smart structures represent specially engineered systems designed with account for the external signal (impact) detecting, processing and functional response generating. They incorporate as well feedback mechanisms, self-diagnosis, self-recovery capabilities (in cases of reversibility), and geometric parameter control. Composite materials (CM) are the best choice for the smart structures creating, as long as corresponding sensors and active elements may be seamlessly integrated into their structure while fabrication. Embedding these components into the CMs during the smart structures forming enables real-time monitoring of internal conditions and on-demand adjustments for both shape and stiffness changing.

Numerical study of the piezo actuator placement impact in the structure of the active part of the structurally similar element (SSE) of the smart structure from composite polymer materials (CPM) on the static strength was performed within the framework of the presented work. Based on the obtained results, diagrams of normal and shear stresses have been plotted. It has been found that with the MFC embedding between the composite material layers, stress concentrations arose at the boundaries of the piezo actuator, which lead to a the PCM strength reduction. Rational piezoelectric actuators placement, at which the required strength and torsion angle of the smart structure were achieved, has been determined.

The technology for the SSE smart structure active part manufacturing by the autoclave molding method has been developed and tried-out. The SSE smart structure active part was manufactured by the developed technology with application of the aviation-grade carbon prepreps with uniform strength. Non-destructive testing of the active part from the PCM was performed to detect defects presence.

Laboratory tests of the SSE smart structure mechanical behavior were conducted, and the torsion angle controllability assessment of the SSE smart structure active part was performed. The smart SSE structure design effectiveness, ensuring the torsion level of at least 1° in magnitude, has been confirmed by the experimental results.

At the next stages of the study, tests are planned to be conducted in an echo-free chamber with an aerodynamic flow.

Keywords: smart structures from polymer composite materials, piezoelectric thermal analogy, layered structure mechanical behavior numerical modeling, geometry controlled structure, autoclave molding

Funding: The study was performed at Perm National Research Polytechnic University with the support of the State assignment (project No. FSNM-2023-0006).

For citation: Pisarev P.V., Bayandin S.R. Manufacturing Technology Development of a Smart Structure Active Part from Polymer Composite Materials. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(3):208-220. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185681>

List of Figures

Fig. 1. The SSE smart structures from the CM with controllable geometry, where:

a – general view of the SSE with active (1) and passive (2) parts; b – the active part composition

Fig. 2. Options of the piezoactuator embedding into a composite laminate plate: a – centered with the fiber trimming;

b – flush with the top layer; c – on the surface; d – centered with wrapping by the reinforcing layers

Fig. 3. Stress distribution diagrams for the implementation option 1: $a - \sigma_{xx}$ under tension along the X -axis;

$b - \sigma_{yy}$ under tension along the Y -axis; $c - \sigma_{zz}$ under tension along the Z -axis; $d - \tau_{xy}$ under shear in the XY plane;

$e - \tau_{xz}$ under shear in the XZ plane; $f - \tau_{yz}$ under shear in the YZ plane

Fig. 4. Stress distribution diagrams for the implementation option 2: $a - \sigma_{xx}$ under tension along the X -axis;

$b - \sigma_{yy}$ under tension along the Y -axis; $c - \sigma_{zz}$ under tension along the Z -axis; $d - \tau_{xy}$ under shear in the XY plane;

$e - \tau_{xz}$ under shear in the XZ plane; $f - \tau_{yz}$ under shear in the YZ plane

Fig. 5. Stress distribution diagrams for the implementation option 3: $a - \sigma_{xx}$ under tension along the X -axis;

$b - \sigma_{yy}$ under tension along the Y -axis; $c - \sigma_{zz}$ under tension along the Z -axis; $d - \tau_{xy}$ under shear in the XY plane;

$e - \tau_{xz}$ under shear in the XZ plane; $f - \tau_{yz}$ under shear in the YZ plane

Fig. 6. Stress distribution diagrams for the implementation option 4: $a - \sigma_{xx}$ under tension along the X -axis;

$b - \sigma_{yy}$ under tension along the Y -axis; $c - \sigma_{zz}$ under tension along the Z -axis; $d - \tau_{xy}$ under shear in the XY plane;

$e - \tau_{xz}$ under shear in the XZ plane; $f - \tau_{yz}$ under shear in the YZ plane

Fig. 7. Stages of the active part from carbon fiber prepreg manufacturing by the hand lay-up method

Fig. 8. Autoclave molding mode of the prepreg

Fig. 9. Display of the S-scan and A-scan of the smart SSE structure active part sample

Fig. 10. The smart SSE structure active part with embedded piezo actuators, made of carbon fiber prepreg

Fig. 11. Experimental setup: a – mounted smart SSE structure, b – Tektronix AFG3022C signal generator and Smart Material HVA 1500/50-2 high-voltage amplifier

Fig. 12. Histogram of displacements (mm) of the free edge of the active part

List of Tables

Table 1. Elastic properties of the CM layers and piezoactuator

Table 2. Averaged values of the displacements and twist angle of the active part free edge

Введение

Одним из перспективных направлений использования концепции smart-конструкций является создание новых изделий авиационной и ракетно-космической техники [1, 2]. Smart-конструкции представляют собой особым образом структурированные системы, спроектированные с учётом возможностей считывания внешнего сигнала (воздействия), его обработки и функционального отклика. Кроме того, в них предусмотрены механизмы обратной связи, самодиагностики и самовосстановления (в случае обратимости), а также управления геометрическими параметрами [3]. Композиционные материалы (КМ) являются наилучшим выбором для создания smart-конструкций, так как в процессе их изготовления в их структуру можно интегрировать соответствующие датчики и активные элементы. Встраивание этих компонентов внутрь КМ при формовании smart-конструкций позволяет контролировать внутреннее состояние, а также при необходимости изменять форму и жесткость. В настоящее время наиболее перспективными типами материалов для внедрения в состав smart-конструкции в качестве активных элементов, в том числе датчиков и сенсоров, являются оптические волокна и пьезоэлектрические материалы [4]. Известны исследования, закладывающие теоретические принципы разработки smart-конструкций из ПКМ с изменяемой геометрией на основе решения численных задач [5–9]. Существуют также примеры опытных образцов и действующих моделей, демонстрирующие возможности подобных решений [10–17]. Однако для широкого применения в инженерной практике идеи создания smart-конструкций, оснащенных управляющими элементами (пьезоактуаторами), требуется создание научно обоснованных и проверенных методик проектирования, что предполагает проведение комплексных вычислительных и экспериментальных исследований. В рамках настоящей работы исследуются возможности внедрения пьезоактуаторов в структуру активной части КПЭ smart-конструкции. Разработана и апробирована технология изготовления активной части КПЭ smart-конструкции.

Описание объекта исследования

Исследуемый КПЭ smart-конструкции состоит из двух частей: пассивной и активной (рис. 1,а).

Активная часть представляет собой прямоугольные пластины из ПКМ с внедренными пьезоактуаторами MFC (рис. 1,б), производимые компанией Smart Material GmbH. [18, 19].

При исследовании месторасположения пьезоактуатора в активной части был рассмотрен модельный фрагмент пластины из ПКМ, представляющий собой пакет из восьми слоев углепластика со схемой армирования $[0^\circ/60^\circ/-60^\circ/0^\circ]$. Номинальная толщина отдельного слоя 0,25 мм, геометрические размеры образца в плоскости — 30×30 мм. Пьезоэлектрический актуатор типа MFC был реализован в виде модельного параллелепипеда с характерными размерами $10 \times 10 \times 0,3$ мм. Для проведения численного исследования построены геометрические модели четырех вариантов внедрения MFC в пластину из ПКМ.

В первом случае пьезоактуатор расположен между четвертым и пятым слоями с их частичной подрезкой (рис. 2,а). Второй вариант также предполагает частичную подрезку слоев, только при этом MFC внедряется в уровень верхнего слоя фрагмента (рис. 2,б). В третьем варианте пьезоактуатор находится на поверхности фрагмента (рис. 2,в). В четвертом варианте MFC располагается

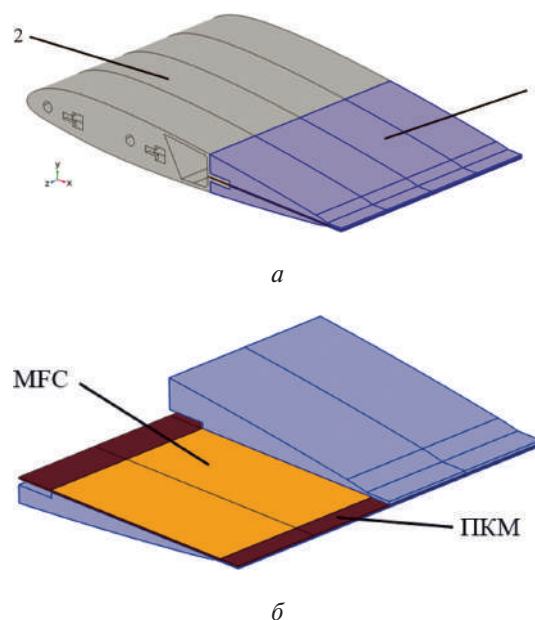


Рис. 1. КПЭ smart-конструкции из КМ с управляемой геометрией:

а — общий вид КПЭ с активной (1) и пассивной (2) частями;

б — состав активной части

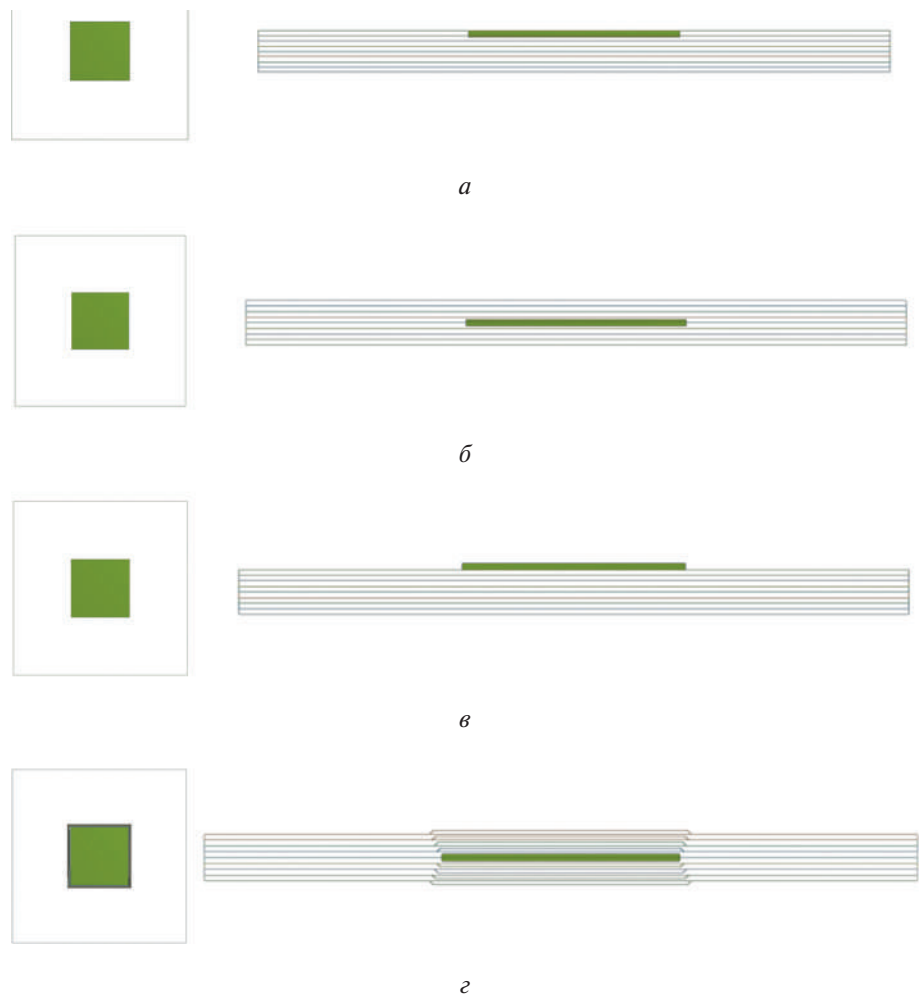


Рис. 2. Варианты внедрения пьезоактуатора в пластину из ПКМ:
а – по центру с подрезкой нитей; б – в уровень с верхним слоем;
в – на поверхности; з – по центру с огибанием армирующими слоями

в центре фрагмента между слоями, при этом слои не подрезаются, а огибают пьезоактуатор (рис. 2,з).
Механическое поведение образцов с внедренными пьезоактуаторами моделировалось на основе решения краевой задачи пьезоэлектростатической аналогии [20] с применением термопьезоэлектрической аналогии [21] с учетом тангенса угла механических потерь в результате «максвелл-вагнеровской релаксации». Исследование влияния рассматриваемых вариантов внедрения на напряженно-деформированное состояние (НДС) фрагмента пластины из ПКМ проводилось при шести вариантах нагружения: растяжение вдоль осей X, Y, Z и сдвиги в плоскостях XY, XZ, YZ . Для каждого варианта нагружения задавалось значение деформации в 0,1%. Эффективные

упругие свойства углепластика и пьезоактуатора, используемые при численном расчете, представлены в табл. 1.
При численном расчете методом конечных элементов были использованы 20-узловые элементы SOLID186. Расчетная область разбивалась на элементы: от 1,1 до 1,5 млн конечных элементов. Максимальный размер элемента – 0,15 мм, минимальный – 0,125 мм.

Результаты численного моделирования механического поведения модельных фрагментов

В результате численных расчетов механического поведения модельных фрагментов активной части КПЭ smart-конструкции получены поля распре-

Таблица 1. Упругие свойства слоев КМ и пьезоактуатора

Материал	E_x , ГПа	E_y , ГПа	E_z , ГПа	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}	G_{xy} , ГПа	G_{yz} , ГПа	G_{xz} , ГПа
Углепластик	63,9	63,9	6,9	0,04	0,3	0,3	19,5	2,7	2,7
MFC	30	15,5	15,5	0,35	0,4	0,4	5,7	10,7	10,7

деления напряжений и деформаций для каждого из вариантов внедрения. Для анализа влияния внедренного пьезоактуатора на НДС построены эпюры распределения нормальных и касательных напряжений. Для случаев размещения 1, 3 и 4 эпюры проходят по центру геометрических моделей. Для случая 2 эпюра проходит между 7-м и 8-м слоем ПКМ, т. е. в плоскости расположения пьезоактуатора. Эпюры представлены на рис. 3 – 6, а–е.

Анализ эпюр напряжений для вариантов внедрения 1, 2, 4 выявил, что в окрестности пьезоактуатора при растяжении вдоль оси Z и сдвигах в плоскостях XZ и YZ наблюдается рост напряжений от 30 до 63,6%. Наименьший – при варианте внедрения 4 в случае растяжения вдоль оси Z . Максимальный скачок напряжений наблюдается при варианте внедрения 2 в случае сдвига в плоскостях XZ и YZ .

В остальных случаях нагружения наблюдается снижение напряжений в области пьезоактуатора. При расположении пьезоактуатора на поверхности фрагмента пластины из ПКМ (вариант внедрения 3), для всех случаев нагружения, кроме сдвига в плоскости XU , в окрестности пьезоактуатора прослеживается снижение напряжений. При сдвиге в плоскости XU напряжения возрастают на 18%.

По результатам проведенных численных исследований выявлено, что при внедрении МФС между слоями композиционного материала возникают концентрации напряжений на границах актуатора, снижающие прочность ПКМ до 63%. В связи с этим, оптимальным способом внедрения пьезоактуатора в пластину из ПКМ является вариант 3, который предполагает размещение МФС на поверхности модельных образцов.

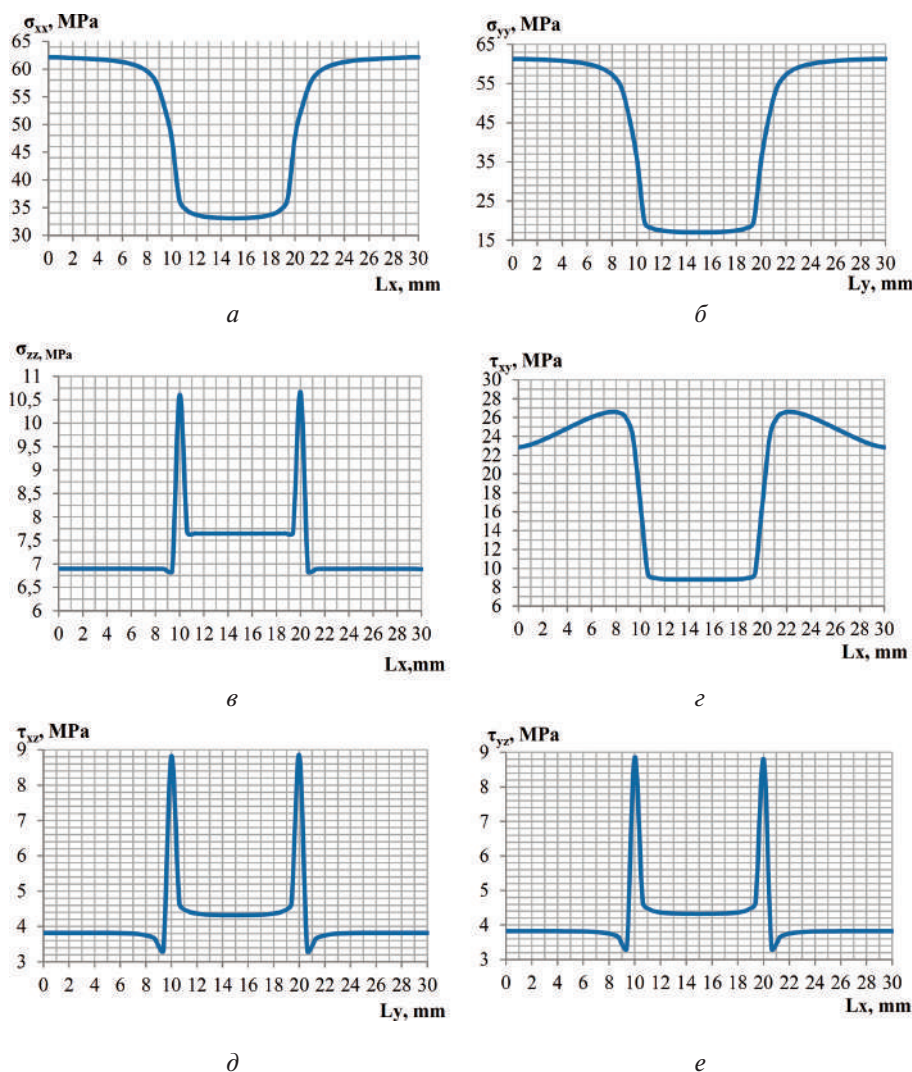


Рис. 3. Эпюры распределения напряжений для варианта внедрения 1: а – σ_{xx} при растяжении вдоль оси X ; б – σ_{yy} при растяжении вдоль оси Y ; в – σ_{zz} при растяжении вдоль оси Z ; г – τ_{xy} при сдвиге в плоскости XY ; д – τ_{xz} при сдвиге в плоскости XZ ; е – τ_{yz} при сдвиге в плоскости YZ

Изготовление активной части КПЭ smart-конструкции

На следующем этапе исследования была изготовлена активная часть КПЭ smart-конструкции на технологической площадке Научно-образовательного центра «Авиационные композитные технологии» ПНИПУ. Центр оснащен современным технологическим оборудованием, предназначенным для изготовления конструкций из ПКМ. Большинство единиц оборудования имеют компьютеризированное управление.

Процесс изготовления активной части КПЭ smart-конструкции включал в себя четыре основных этапа:

1. Формование заготовок активных частей КПЭ smart-конструкции из углепластикового препрега.
2. Неразрушающий контроль частей КПЭ smart-конструкции ультразвуковым дефектоскопом для исключения возможных дефектов в виде непропрессовок.

3. Разрезка заготовок на конструктивные элементы активных частей КПЭ smart-конструкции с высокими требованиями по качеству обрабатываемых поверхностей и точностью разрезки.

4. Сверление отверстий под систему крепления активной и пассивной части КПЭ smart-конструкции.

Этап 1. При изготовлении активной части КПЭ smart-конструкции по препреговой технологии методом ручной выкладки выполнялись следующие основные операции:

- 1) разметка и разрезка материала;
- 2) выкладка на одностороннюю матрицу требуемой формы до получения требуемой толщины в соответствии со схемой армирования (рис. 7,а);
- 3) укладка на поверхность препрега вспомогательных слоев: перфорированной пленки, впитывающего слоя (рис. 7,б);

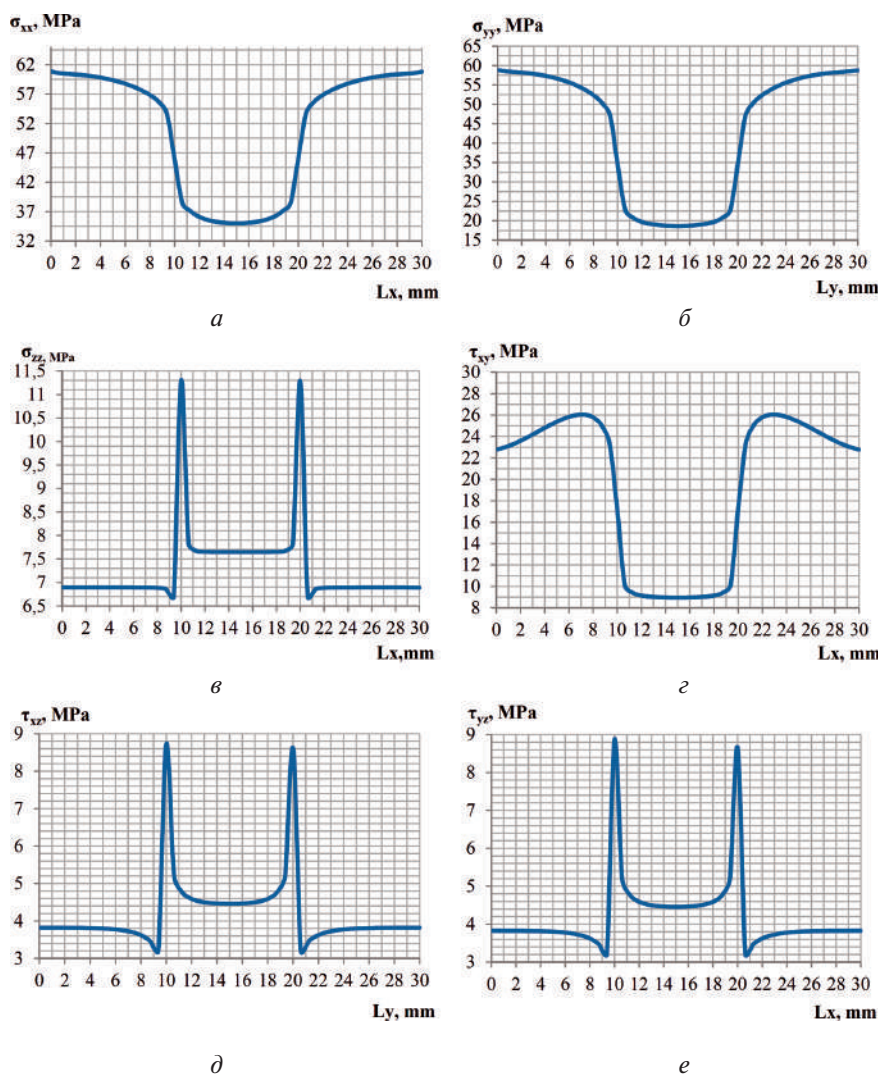


Рис. 4. Эпюры распределения напряжений для варианта внедрения 2: а – σ_{xx} при растяжении вдоль оси X; б – σ_{yy} при растяжении вдоль оси Y; в – σ_{zz} при растяжении вдоль оси Z; г – τ_{xy} при сдвиге в плоскости XY; д – τ_{xz} при сдвиге в плоскости XZ; е – τ_{yz} при сдвиге в плоскости YZ

4) герметизация формы вакуумной пленкой и подключение вакуумного насоса. Создание вакуума для проверки герметичности (рис. 7,в);

5) помещение изделия в автоклав при достижении герметичности (рис. 7,г). Предполагаемые зависимости технологических параметров режимов формования от времени для углепластикового препрега приведены на рис. 8;

6) извлечение полностью остывшего изделия из мешка (рис. 7,д).

Этап 2. Для проверки качества активной части smart-конструкций КПЭ и выявления возможных непропрессовок был применен ультразвуковой эхо-импульсный метод. Контроль осуществлялся с помощью дефектоскопа HARFANG VEO на основе фазированной антенной решетки. Применение таких преобразователей дает возможность выявлять неоднородности существенно меньшего

размера [22]. Получение множества А-сканов позволяет визуализировать структуру материала, выделяя цветом частоту амплитудных колебаний, преобразовав их в S-скан. На рис. 9 показано отображение S-скана и А-скана заготовки из активной части КПЭ smart-конструкции, выполненной из углепластика.

Для организации неразрушающего контроля с применением преобразователей на фазированной решетке выполнялись следующие шаги:

1) нанесение разметки областей контроля с максимальным размером 200×200 мм;

2) нанесение контактной жидкости на рабочую поверхность пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП);

3) размещение ПЭП соосно друг относительно друга с плотным прижатием к контролируемой детали;

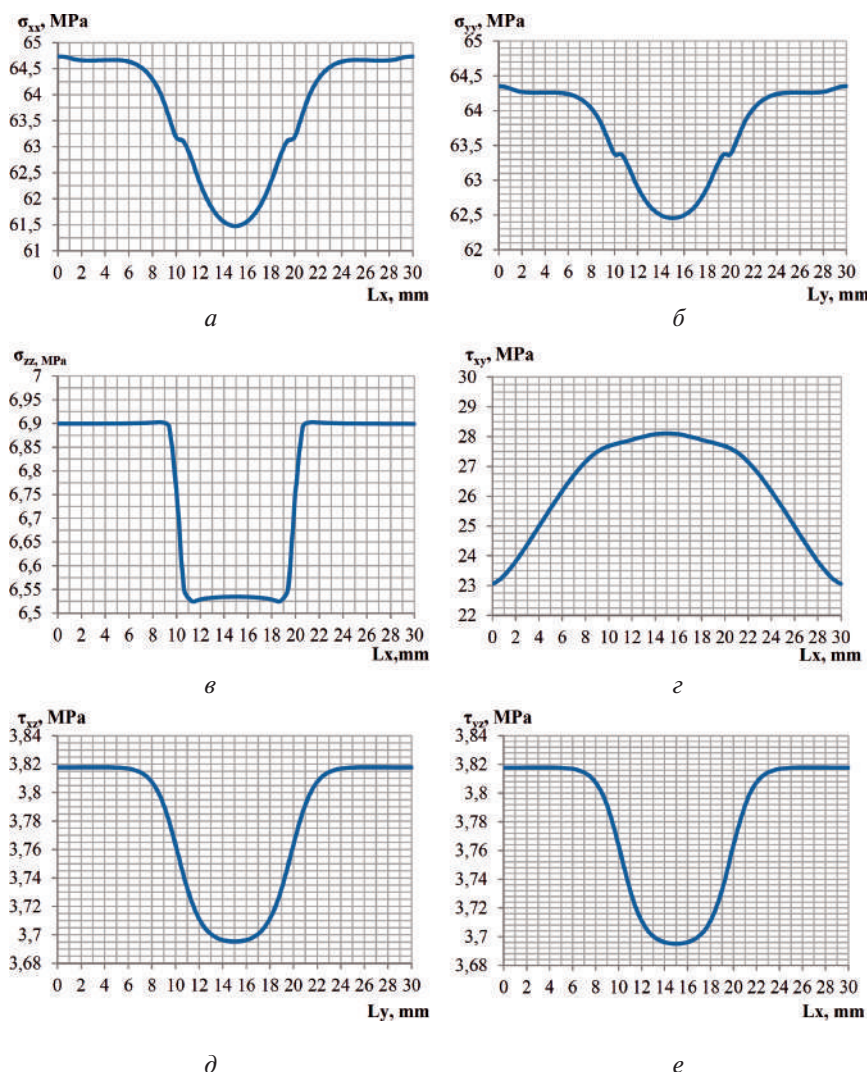


Рис. 5. Эпюры распределения напряжений для варианта внедрения 3: а – σ_{xx} при растяжении вдоль оси X; б – σ_{yy} при растяжении вдоль оси Y; в – σ_{zz} при растяжении вдоль оси Z; г – τ_{xy} при сдвиге в плоскости XY; д – τ_{xz} при сдвиге в плоскости XZ; е – τ_{yz} при сдвиге в плоскости YZ

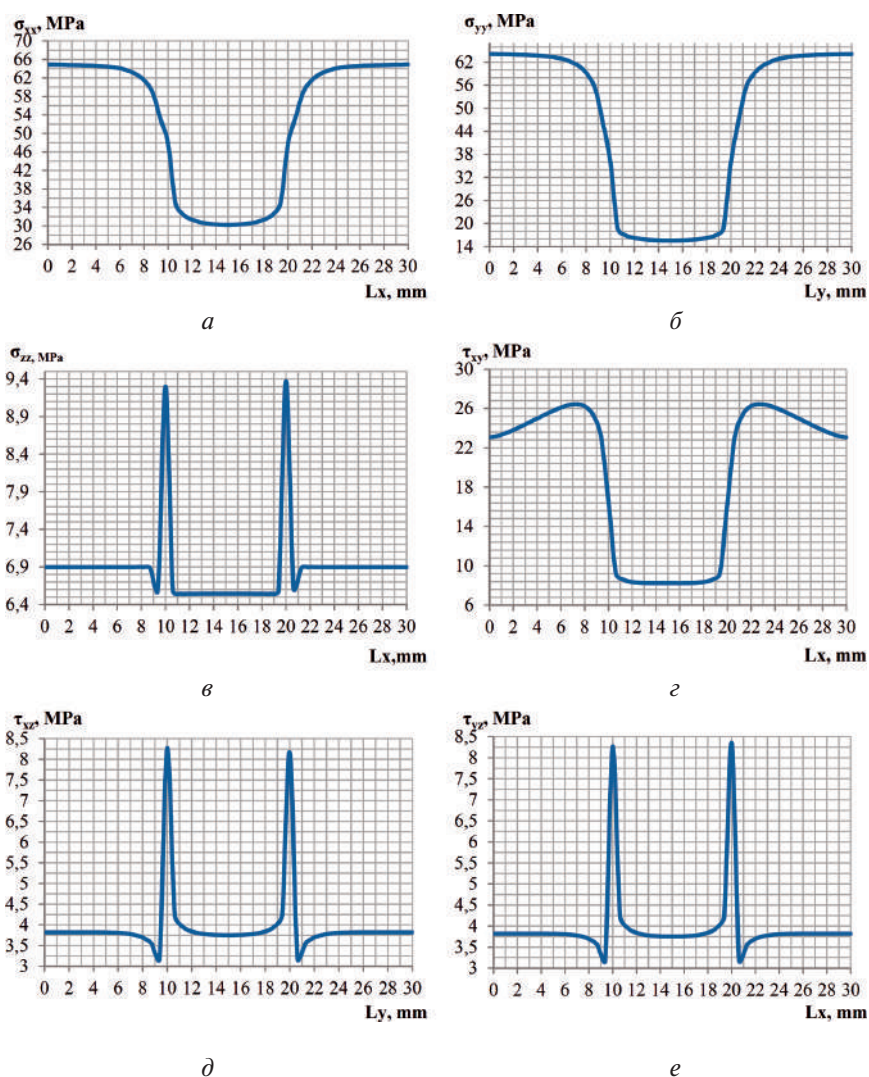


Рис. 6. Эпюры распределения напряжений для варианта внедрения 4: *a* – σ_{xx} при растяжении вдоль оси *X*; *б* – σ_{yy} при растяжении вдоль оси *Y*; *в* – σ_{zz} при растяжении вдоль оси *Z*; *г* – τ_{xy} при сдвиге в плоскости *XY*; *д* – τ_{xz} при сдвиге в плоскости *XZ*; *е* – τ_{yz} при сдвиге в плоскости *YZ*

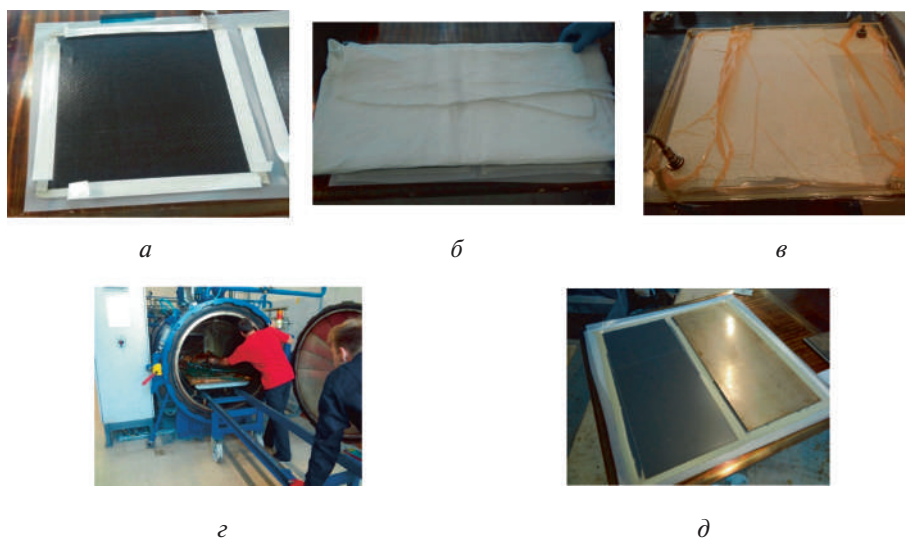


Рис. 7. Этапы изготовления активной части из углепластикового препрега методом ручной выкладки

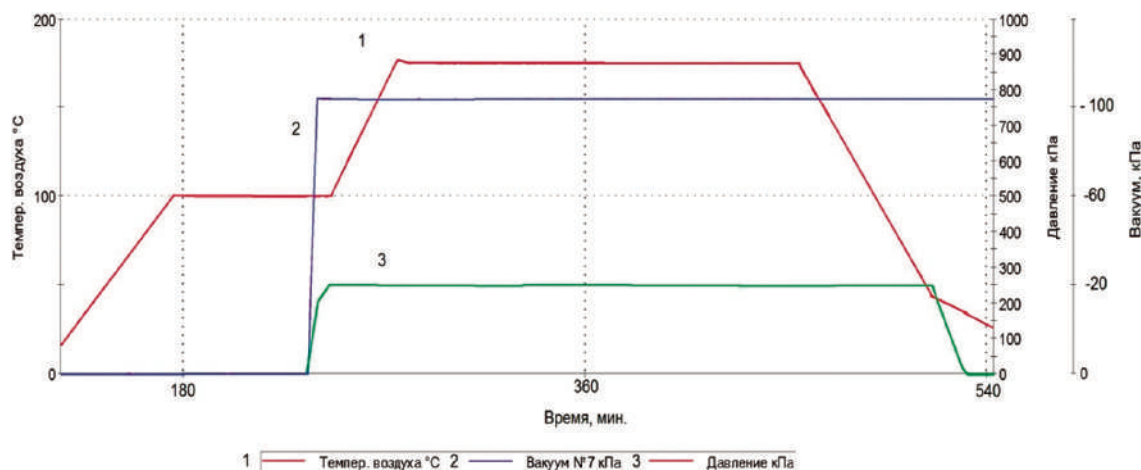


Рис. 8. Режим автоклавного формования препрега

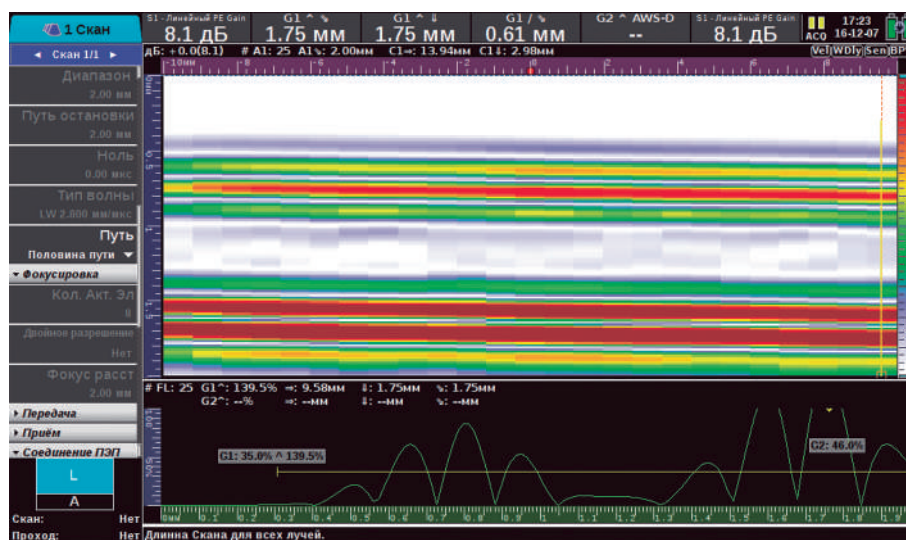


Рис. 9. Отображение S-скана и A-скана образца активной части КПЭ smart-конструкции

4) контроль объекта путем последовательного перемещения ПЭП по контролируемой поверхности со скоростью 20 мм/с и шагом, равным 0,5 диаметра контактной поверхности;

5) проверка настройки дефектоскопа каждые 30 мин.

Этап 3. Разрезка подготовленных заготовок осуществлялась на автоматизированном фрезеровочном двухкоординатном плоттере с частотой 24000–30000 об/мин для обеспечения качества обрабатываемых поверхностей в соответствии с требованиями ГОСТа.

Этап 4. На завершающем этапе изготовления активной части КПЭ smart-конструкции сверлились отверстия под крепление активной части к пассивной. Внедрение пьезоактуатора MFC осуществлялось с использованием этилцианакрилатного клея. Для усиления эффективности изгиба

пьезоактуаторы внедрялись сверху и снизу образца активной части (рис. 10).

Экспериментальные исследования

Для разработанного и изготовленного КПЭ smart-конструкции была проведена серия экспериментов по определению амплитуды перемещений

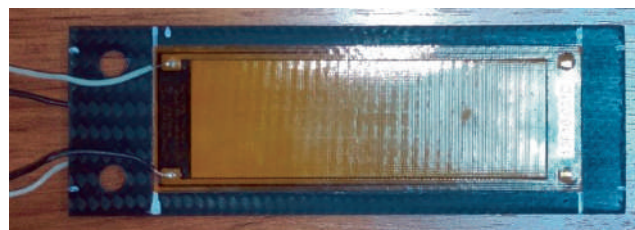


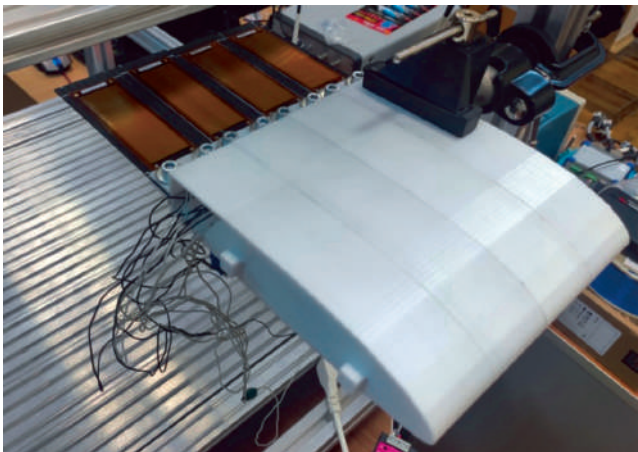
Рис. 10. Активная часть КПЭ smart-конструкции с внедренными пьезоактуаторами, выполненная из углепластикового препрега

и угла кручения активной части. На рис. 11,а показан горизонтально закрепленный КПЭ лопасти в экспериментальной установке с установленными лазерными датчиками перемещений. Значение напряжения на пьезоактуаторе MFC регулировалось с помощью генератора сигналов Tektronix AFG3022C. Выходное напряжение от генератора сигналов усиливалось высоковольтным усилителем напряжения от Smart Material HVA 1500/50-2 и непосредственно поступало на вход пьезоактуатора (рис 11,б).

При экспериментальном исследовании использовались предельные уровни управляющих электрических напряжений: 1000 В, −400 В. Значения перемещений от активной части КПЭ до лазерного датчика фиксировались в миллиметрах до и после подачи напряжения на пьезоактуаторы. Затем рассчитывались перемещения активной части КПЭ в контрольных точках. Из трех измеренных значений перемещений (рис. 12) находилось среднее арифметическое для каждого уровня управляющего электрического напряжения. Для среднего значения перемещений рассчитывался угол отклонения α (табл. 2):

$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\Delta U_z}{b} \right),$$

где ΔU_z – значения перемещений свободного края активной части; b – длина активной части.



а



б

Рис. 11. Экспериментальная установка:
а – закрепленный КПЭ smart-конструкции,
б – генератор сигналов Tektronix AFG3022C и высоковольтный усилитель напряжения Smart-Material HVA 1500/50-2

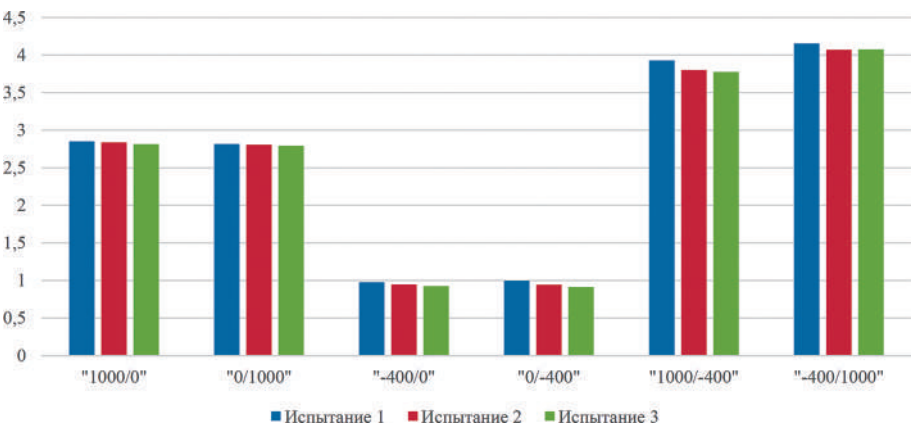


Рис. 12. Гистограмма перемещений свободного края активной части, мм

Таблица 2. Осредненные значения перемещений и угла кручения свободного края активной части

Измеряемая величина	Управляющее напряжение, В					
	1000/0	0/1000	−400/0	0/−400	1000/−400	−400/1000
Перемещения, мм	2,834	2,805	0,949	0,951	3,835	4,099
Угол отклонения α, °	0,507	0,502	0,170	0,170	0,687	0,734

Анализ полученных результатов испытаний КПЭ smart-конструкции выявил, что при работе только нижних и только верхних актуаторов при одинаковом управляющем напряжении значения перемещения и угла отклонения свободного края активной части близки к идентичным. При одновременной работе и нижних, и верхних актуаторов наблюдается нелинейность — сумма перемещений для напряжений 1000 В и –400 В не равна перемещениям при 1000/–400 В. Наибольшие перемещения происходят при подаче напряжения 1000 В на нижние актуаторы и –400 В на верхние и равны 4,099 мм, угловое отклонение при этом составляет 0,734° (1,468° в размахе).

Выводы

В результате проведенных исследований спроектирована активная часть КПЭ smart-конструкции с учетом тангенса угла механических потерь, что способствует более эффективному управлению геометрией на рабочих частотах. Изготовлена активная часть КПЭ smart-конструкции по отработанной в рамках исследования технологии производства авиационных конструкций из композиционных материалов, близкой к серийной. В настоящее время большинство прототипов, лабораторных экземпляров и действующих макетов smart-конструкций изготовлены по опытным технологиям, что затрудняет введение их в эксплуатацию.

По результатам проведенных лабораторных экспериментов по исследованию возможности реализации кручения изготовленной активной части КПЭ smart-конструкции выявлено, что применение пьезоактуаторов позволяет достичь максимального угла кручения более 1° в размахе, что соответствует требованиям, предъявляемым к конструкциям данного класса.

На следующем этапе исследования планируется провести испытания smart-конструкции в заглушенной камере с моделированием основных внешних условий, приближенных к реальным.

Список источников

1. Gu X., Yang K., Wu M., et al. Integrated optimization design of smart-morphing wing for accurate shape control // Chinese Journal of Aeronautics. 2021. Vol. 34. No. 1, pp. 135–147. DOI: 10.1016/j.cja.2020.08.048
2. Пхио А., Семенов В.Н., Федюлов Б.Н. Оптимизация трансформируемых конструкций летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 1. С. 32–40. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=179104>
3. Fink D.A., Hawkey T.J., Gaudreau P.J., et al. An Electromagnetic Actuator for Individual Blade Control //

- 56th American Helicopter Society International Annual Forum (02–04 May 2000; Virginia Beach, VA, USA).
4. Noboru K., Saito S. Design and Performance Evaluation of Full Scale On-board Active Flap System // 63rd American Helicopter Society International Annual Forum (01–03 May 2007; Virginia Beach, VA, USA).
5. Scheller J., Jodin G., Rizzo K.-J., et al. Combined Smart-Materials Approach for Next-Generation Airfoils // Solid State Phenomena. 2016. Vol. 251, pp. 106–112. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.251.106
6. Auteri F., Bettini P., Bonfanti N. Scaling Laws for an Airfoil with MFC-Actuated Trailing Edge Plate // In book: Braza M., Hourigan K., Triantafyllou M. (eds) Advances in Critical Flow Dynamics Involving Moving/Deformable Structures with Design Applications. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. Springer, Cham; 2021. Vol. 147, pp. 527–540. DOI: 10.1007/978-3-030-55594-8_44
7. Barkanov E., Kovalovs A., Wierach P., et al. Optimized Comparative Analysis of an Active Twist for Helicopter Rotor Blades with C- and D-Spar Designs // Mechanics of Composite Materials. 2018. Vol. 54. No. 5, pp. 553–566. DOI: 10.1007/s11029-018-9764-2
8. Anoshkin A.N., Barkanov E., Pisarev P.V., et al. Numerical calculation of a smart-construction torsion angle depending on the piezoelectric actuators location // 28th Russian Conference on Mathematical Modelling in Natural Sciences (02–05 October 2019; Perm). American Institute of Physics Inc, 2020. Vol. 2216. No 1: 020009. DOI: 10.1063/5.0004080
9. Mukherjee A., Ali S.F., Arockiarajan A. Modeling of integrated shape memory alloy and Macro-Fiber Composite actuated trailing edge // Smart-Materials and Structures. 2020. Vol. 29. No. 8: 085005. DOI: 10.1088/1361-665X/ab8fcb
10. Roth D., Enenkl B., Dieterich O. Active rotor control by flaps for vibration reduction—Full scale demonstrator and first flight test results // 32nd European Rotorcraft Forum (12–14 September 2006; Maastricht, Netherlands).
11. Jänker P., Hermle F., Friedl S., et al. Advanced piezoelectric servo flap system for rotor active control // 32nd European Rotorcraft Forum (12–14 September 2006; Maastricht, Netherlands).
12. Grohmann B.A., Maucher C.K., Prunhuber T., et al. Multidisciplinary Design and Optimization of Active Trailing Edge for Smart-Helicopter Rotor Blade // Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2008. Vol. 15. No. 3, pp. 307–324. DOI: 10.1080/15376490801907830
13. Maucher C.K., Grohmann B.A., Jänker P., et al. Actuator design for the active trailing edge of a helicopter rotor blade // 33th European Rotorcraft Forum (11–13 September 2007). pp. 12–24.
14. Kovalovs A., Barkanov E., Ručevskis S., et al. Modeling and Design of a Full-Scale Rotor Blade with Embedded Piezocomposite Actuators // Mechanics of Composite Materials. 2017. Vol. 53. No. 2, pp. 179–192. DOI: 10.1007/s11029-017-9652-1

15. Kovalovs A., Barkanov E., Ručevskis S., et al. Optimisation Methodology of a Full-scale Active Twist Rotor Blade // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 178, pp. 85–95. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.067
16. Jodin G., Motta V., Scheller J., et al. Dynamics of a hybrid morphing wing with active open loop vibrating trailing edge by time-resolved PIV and force measures // *Journal of Fluids and Structures*. 2017. Vol. 74, pp. 263–290. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2017.06.015
17. Hoshyarmansh H., Abbasi A. Structural health monitoring of rotary aerospace structures based on electromechanical impedance of integrated piezoelectric transducers // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2018. Vol. 29. No. 9, pp. 1799–1817. DOI: 10.1177/1045389x17754266
18. Nasser H., Kiefer-Kamal E.H., Hu H., et al. Active vibration damping of composite structures using a nonlinear fuzzy controller // *Composite Structures*. 2012. Vol. 94. No. 4, pp. 1385–1390. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.11.022
19. Miller M., Narkiewicz J., Kania W., et al. The application of helicopter rotor blade active control systems for noise and vibration reduction and performance improvement // *Prace Instytutu Lotnictwa*. 2006. No. 1–2(184–185), pp. 164–180.
20. Anoshkin A.N., Pisarev P.V., Bayandin S.R., et al. Numerical calculation of composite structures equipped with flexible piezoactuators stress-strain state // 28th Russian Conference on Mathematical Modelling in Natural Sciences (02–05 October 2019; Perm). American Institute of Physics Inc, 2020. Vol. 2216. No 1: 040013. DOI: 10.1063/5.0004055
21. Ключев В.В. (ред.) Неразрушающий контроль. Т. 2. Книга 1. Контроль герметичности. Книга 2. Вихревой контроль. М.: Машиностроение, 2004. 688 с.

References

1. Gu X, Yang K, Wu M, et al. Integrated optimization design of smart-morphing wing for accurate shape control. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2021;34(1):135–147. DOI: 10.1016/j.cja.2020.08.048
2. Phyto A, Semenov VN, Fedulov BN. Optimization of transformable aircraft structures. *Aerospace MAI Journal*. 2024;31(1):32–40. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=179104>
3. Fink DA, Hawkey TJ, Gaudreau PJ, et al. An Electromagnetic Actuator for Individual Blade Control. *56th American Helicopter Society International Annual Forum (May 02–04, 2000; Virginia Beach, VA, USA)*.
4. Noboru K, Saito S. Design and Performance Evaluation of Full Scale On-board Active Flap System. *63rd American Helicopter Society International Annual Forum (May 01–03, 2007; Virginia Beach, VA, USA)*.
5. Scheller J, Jodin G, Rizzo KJ, et al. Combined Smart-Materials Approach for Next-Generation Airfoils. *Solid State Phenomena*. 2016;251:106–112. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.251.106
6. Auteri F, Bettini P, Bonfanti N. Scaling Laws for an Airfoil with MFC-Actuated Trailing Edge Plate. In: Braza M, Hourigan K, Triantafyllou M. (eds). *Advances in Critical Flow Dynamics Involving Moving/Deformable Structures with Design Applications*. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. Springer, Cham; 2021. Vol. 147. p. 527–540. DOI: 10.1007/978-3-030-55594-8_44
7. Barkanov E, Kovalovs A, Wierach P, et al. Optimized Comparative Analysis of an Active Twist for Helicopter Rotor Blades with C- and D-Spar Designs. *Mechanics of Composite Materials*. 2018;54(5):553–566. DOI: 10.1007/s11029-018-9764-2
8. Anoshkin AN, Barkanov E, Pisarev PV, et al. Numerical calculation of a smart-construction torsion angle depending on the piezoelectric actuators location. *28th Russian Conference on Mathematical Modelling in Natural Sciences (October 02–05, 2019; Perm)*. American Institute of Physics Inc, 2020. Vol. 2216. No 1: 020009. DOI: 10.1063/5.0004080
9. Mukherjee A, Ali SF, Arockiarajan A. Modeling of integrated shape memory alloy and Macro-Fiber Composite actuated trailing edge. *Smart-Materials and Structures*. 2020;29(8):085005. DOI: 10.1088/1361-665X/ab8fcb
10. Roth D, Enenkl B, Dieterich O. Active rotor control by flaps for vibration reduction—Full scale demonstrator and first flight test results. *32nd European Rotorcraft Forum (September 12–14, 2006; Maastricht, Netherlands)*.
11. Jänker P, Hermle F, Friedl S, et al. Advanced piezoelectric servo flap system for rotor active control. *32nd European Rotorcraft Forum (September 12–14, 2006; Maastricht, Netherlands)*.
12. Grohmann BA, Maucher CK, Prunhuber T, et al. Multidisciplinary Design and Optimization of Active Trailing Edge for Smart-Helicopter Rotor Blade. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2008;15(3):307–324. DOI: 10.1080/15376490801907830
13. Maucher CK, Grohmann BA, Jänker P, et al. Actuator design for the active trailing edge of a helicopter rotor blade. *33th European Rotorcraft Forum (September 11–13, 2007)*. p. 12–24.
14. Kovalovs A, Barkanov E, Ručevskis S, et al. Modeling and Design of a Full-Scale Rotor Blade with Embedded Piezocomposite Actuators. *Mechanics of Composite Materials*. 2017;53(2):179–192. DOI: 10.1007/s11029-017-9652-1
15. Kovalovs A, Barkanov E, Ručevskis S, et al. Optimisation Methodology of a Full-scale Active Twist Rotor Blade. *Procedia Engineering*. 2017;178:85–95. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.067
16. Jodin G, Motta V, Scheller J, et al. Dynamics of a hybrid morphing wing with active open loop vibrating trailing edge by time-resolved PIV and force measures. *Journal of Fluids and Structures*. 2017;74:263–290. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2017.06.015

17. Hoshyarmanesh H, Abbasi A. Structural health monitoring of rotary aerospace structures based on electromechanical impedance of integrated piezoelectric transducers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2018;29(9):1799–1817. DOI: 10.1177/1045389x17754266
18. Nasser H, Kiefer-Kamal EH, Hu H, et al. Active vibration damping of composite structures using a nonlinear fuzzy controller. *Composite Structures*. 2012;94(4):1385–1390. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.11.022
19. Miller M, Narkiewicz J, Kania W, et al. *The application of helicopter rotor blade active control systems for noise and vibration reduction and performance improvement*. *Prace Instytutu Lotnictwa*. 2006(1-2):164–180.
20. Anoshkin AN, Pisarev PV, Bayandin SR, et al. Numerical calculation of composite structures equipped with flexible piezoactuators stress-strain state. *28th Russian Conference on Mathematical Modelling in Natural Sciences (October 02–05, 2019; Perm)*. American Institute of Physics Inc, 2020;2216(1):040013. DOI: 10.1063/5.0004055
21. Klyuev VV. (ed) *Non-destructive testing*. Vol. 2. Book 1. Leakproofness control. Book 2. Vortex control. Moscow: Mashinostroenie; 2004. 688 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию / Received 02.06.2025
Одобрена после рецензирования / Revised 18.06.2025
Принята к публикации / Accepted 23.06.2025