

**Received:** 28.01.2026

**Revised:** 18.03.2026



**Accepted:** 24.04.2026



**DOI:** 10.17804/2410-9908.2026.2.019-027



## THE PROBLEMATICS OF PREDICTING THE QUALITY OF AIRCRAFT STRUCTURES MADE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

A. N. Shustov<sup>a, \*</sup>, A. A. Chekalkin<sup>b</sup>, and G. S. Shipunov<sup>c</sup>

*Perm National Research Polytechnic University,  
 29 Komsomolskiy Ave., Perm, 614990, Russia*

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0009-0002-4878-6295>  [shustov-kt@pstu.ru](mailto:shustov-kt@pstu.ru);

<sup>b</sup>  <https://orcid.org/0009-0002-2107-3201>  [a.a.chekalkin@yandex.ru](mailto:a.a.chekalkin@yandex.ru);

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-2322-1872>  [gsshipunov@gmail.com](mailto:gsshipunov@gmail.com)

\*Corresponding author. Email: [shustov-kt@pstu.ru](mailto:shustov-kt@pstu.ru)

Address for correspondence: ul. Akademika Koroleva, 15, Perm, 614013, Russia

Tel.: +7 (982) 490-6634

This study addresses the issue of predicting the quality of aircraft structures made of polymer composite materials. It analyzes the experience of the global and domestic aviation industries in implementing polymer composite materials, using the Boeing 787, Airbus A350, and MC-21 aircrafts as examples. The heightened and specific requirements for the mechanical and operational characteristics of aircraft structures made of polymer composite materials are highlighted, stemming from their anisotropy, sensitivity to impact damage, and the influence of hygrothermal factors. The study identifies a fundamental problem, namely the lack of a generalized methodology relating manufacturing process parameters to guaranteed operational properties of the final product. Based on this analysis, a relevant scientific and technical problem is formulated as the need to develop a predictive model enabling the implementation of the core *process–material–structure* principle. As a solution, the concept and structure of a multilevel hybrid predictive model are proposed. The model integrates deterministic physical and mathematical modeling, statistical uncertainty analysis, and machine learning methods.

**Keywords:** polymer composite materials, aircraft manufacturing, quality prediction, process parameters, operational characteristics, mathematical modeling

### References

1. Ermekbaev, S.Sh. On some issues of aircraft reliability. In: *Trudy simpoziuma "Nadezhnost i kachestvo"* [Proceedings of the International Symposium on Reliability and Quality, Penza, 2017]. PGU Publ., Penza, 2017, 1, 139–142. (In Russian).
2. Kostenkov, V.A., Glazunova, A.A., and Solonsky, N.S. Application of new-generation composite materials in civil aviation. *Nauchnyy Aspekt*, 2024, 6, 6881–6892. (In Russian).
3. Akhmed, N.A. The role of composite materials in aircraft manufacturing: how they revolutionized aircraft design. *Aktualnye Issledovaniya*, 2025, 7 (242), part 2, 12–14. (In Russian).
4. Savin, S.P. Application of modern polymeric composite materials in the design of MS-21 airplane family. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk*, 2012, 4–2, 686–693. (In Russian).
5. Tsypaev, N.D. Composite blade PD-35. In: *Materialy XVI Vserossiyskoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii "Mavlyutovskiye chteniya"* [Mavlyutov Readings: Proceedings of the 16<sup>th</sup> All-Russian Youth Scientific Conference]. UGATU Publ., Ufa, 2022, vol. 4, 115–117. (In Russian).

6. Grinevich, D.V., Yakovlev, N.O., and Slavin, A.V. The criteria of the failure of polymer matrix composites (review). *Trudy VIAM*, 2019, 7 (79), 92–111. (In Russian). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111.
7. Martirosov, M.I. and Khomchenko, A.V. Computational and experimental study of the behavior of a flat reinforced carbon fiber panel on impact. *Trudy MAI*, 2022, 126, 1–2. (In Russian). DOI: 10.34759/trd-2022-126-04.
8. Gibhardt, D., Buggisch, C., Meyer, D., and Fiedler, B. Hygrothermal aging history of amine-epoxy resins: effects on thermos-mechanical properties. *Frontiers in Materials*, 2022, 9, 1–14. DOI: 10.3389/fmats.2022.826076.
9. Ivanov, D.A., Petrova, T.V., and Davydov, I.A. Analysis of maintenance of composite materials on the Boeing-787 aircraft (Dreamliner), introduction of the concept “quick repair of the composite (QCR)” and step-by-step implementation of it. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Universiteta Grazhdanskoy Aviatsii*, 2020, 2 (27), 104–118. (In Russian).
10. Karimbaev, T.D. Evaluation of fatigue life of products made of composite materials. *Aviatsionnye Dvigateli*, 2020, 4 (9), 75–93. (In Russian).
11. Grinev, M.A., Anoshkin, A.N., Pisarev, P.V., Zuiko, V.Yu., and Shipunov, G.S. CAD/CAE modelling of mechanical behavior of composite outlet guide vane for aircraft jet engine. *Vestnik PNIPU. Mekhanika*, 2015, 3, 38–51. (In Russian). DOI: 10.15593/perm.mech/2015.3.04.
12. Chigrinets, E. and Verchenko, A. CAD/CAM/CAE systems, OMV technologies and neural network based data analysis algorithms at the aviation industry enterprises. *Trudy MAI*, 2016, 104, 1–26. (In Russian).

Подана в журнал: 28.01.2026



УДК 001.891.572



DOI: 10.17804/2410-9908.2026.2.019-027



## ПРОБЛЕМАТИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. Н. Шустов<sup>а, \*</sup>, А. А. Чекалкин<sup>б</sup>, Г. С. Шипунов<sup>в</sup>

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,  
пр-кт Комсомольский, д. 29, г. Пермь, 614990, Россия*

<sup>а</sup>  <https://orcid.org/0009-0002-4878-6295>  shustov-kt@pstu.ru;

<sup>б</sup>  <https://orcid.org/0009-0002-2107-3201>  a.a.chekalkin@yandex.ru;

<sup>в</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-2322-1872>  gsshipunov@gmail.com

\*Ответственный автор. Электронная почта: shustov-kt@pstu.ru

Адрес для переписки: ул. Академика Королева, д. 15, г. Пермь, 614013, Россия

Тел.: +7 (982) 490-66-34

В рамках данного исследования рассматривается вопрос прогнозирования качества авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов. Проанализирован опыт мирового и отечественного авиапрома по внедрению полимерных композиционных материалов на примере самолетов Boeing 787, Airbus A350 и МС-21. Выделены повышенные и специфические требования к механическим и эксплуатационным характеристикам авиационных конструкций из ПКМ, связанные с их анизотропией, чувствительностью к ударным повреждениям и влиянием гигротермических факторов. Констатируется наличие фундаментальной проблемы, заключающейся в отсутствии обобщенной методики, связывающей технологические параметры изготовления с гарантированными эксплуатационными свойствами готового изделия. На основе проведенного анализа сформулирована актуальная научно-техническая задача о необходимости разработки прогнозной модели, позволяющей реализовать основной принцип «технология – материал – конструкция». В качестве решения предложены концепция и структура многоуровневой гибридной прогнозной модели, интегрирующей детерминированное физико-математическое моделирование, статистический анализ неопределенностей и методы машинного обучения.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, авиастроение, прогнозирование качества, технологические параметры, эксплуатационные характеристики, математическое моделирование

### 1. Введение

Исторический выбор конструкционных материалов для летательных аппаратов всегда представлял собой стратегический компромисс между массой, прочностью, технологичностью и стоимостью. На протяжении большей части XX века этот выбор был однозначно сделан в пользу металлических сплавов, в первую очередь алюминиевых и титановых. Их изотропные свойства, отработанные технологии производства, соединения и ремонта, а также предсказуемое поведение под нагрузкой стали основой надежности и стабильности мировой авиации [1].

Однако к концу столетия потенциал прогресса за счет оптимизации металлических сплавов был в значительной степени исчерпан. Одновременно резко обострились требования к топливной эффективности, экологичности, дальности и экономической рентабельности

воздушных перевозок. Решение этих задач обусловило стремительное внедрение полимерных композиционных материалов (ПКМ). Основу ПКМ составляют высокопрочные армирующие волокна (углеродные, стеклянные, арамидные) и полимерные связующие матрицы (эпоксидные, бисмалеимидные). Они предложили авиаконструкторам качественно новое сочетание характеристик: выдающуюся удельную прочность и жесткость, коррозионную стойкость, усталостную выносливость и возможность формования крупногабаритных интегрированных деталей сложной геометрии [2]. Современный этап развития авиастроения характеризуется, таким образом, необратимым переходом от доминирования металлических материалов в конструкции к доминированию композиционных материалов, что ставит перед наукой и промышленностью принципиально новые задачи в области обеспечения и гарантирования качества.

## 2. Внедрение ПКМ в мировую и отечественную авиационную промышленность

Мировой опыт демонстрирует, что внедрение ПКМ носит системный и поэтапный характер. Начавшись с применения в ненагруженных обтекателях, интерьерных панелях и рулевых поверхностях, тенденция привела к созданию самолетов, где композиты доминируют в силовой схеме. Лидерами этого процесса стали корпорации Boeing и Airbus. В конструкции самолета Boeing 787 Dreamliner массовая доля ПКМ составляет около 50 %, включая цельнокомпозитный фюзеляж и крыло [3]. Аналогичный подход реализован в Airbus A350 XWB. Это позволило не только достичь рекордного снижения массы (до 20 % по сравнению с металлическими аналогами предыдущего поколения), но и повысить комфорт, увеличить ресурс и снизить эксплуатационные расходы.

Отечественное авиастроение, вопреки историческому отставанию в массовом применении композитов, совершило значительный рывок в рамках программ импортозамещения и создания новой техники. Флагманским проектом стал ближне-среднемагистральный пассажирский самолет МС-21, в конструкции которого доля ПКМ достигает 40 % [4]. Прорывной отечественной технологией, не имеющей прямых аналогов в своем классе, стало создание цельнокомпозитного крыла из углепластика. Его реализация потребовала развития полного цикла – от производства углеродного волокна и препрегов до разработки методов автоматизированной выкладки и отверждения. Результатом стало снижение массы крыла, оптимизация аэродинамики и существенное увеличение межремонтного ресурса. Параллельно ведутся работы по интеграции ПКМ в перспективные авиационные двигатели, например ПД-35, где композитные лопасти вентилятора и корпусные элементы обеспечивают значительный выигрыш в весе и эффективности [5].

Однако масштабное внедрение сталкивается не только с технологическими, но и с нормативно-сертификационными барьерами. Каждый новый композитный узел требует обширного и дорогостоящего объема сертификационных испытаний для доказательства его надежности и безопасности в течение всего жизненного цикла. Это резко увеличивает сроки и стоимость разработки. Таким образом, успешная и экономически оправданная интеграция ПКМ напрямую зависит от способности достоверно прогнозировать их поведение на всех этапах – от проектирования до утилизации.

## 3. Специфика и повышенные требования к авиационным конструкциям из ПКМ

Эксплуатация в условиях экстремальных и многокомпонентных нагрузок предъявляет высочайшие требования к любым авиационным материалам. Однако для ПКМ эти требования приобретают особую специфику и остроту, обусловленную природой самого материала.

### *2.1. Управляемая анизотропия и сложность проектирования*

Кардинальное отличие ПКМ от изотропных металлов – возможность целенаправленного управления свойствами за счет ориентации армирующих волокон. Это одновременно и ключевое преимущество, и источник повышенного риска. Некорректное проектирование схемы выкладки или даже незначительные отклонения при изготовлении могут привести к непропорционально большому снижению несущей способности конструкции. Требуется обеспечить не просто высокие прочностные показатели, а прогнозируемое и воспроизводимое анизотропное поведение при сложном комбинированном нагружении (растяжение, сжатие, сдвиг) [6].

### *2.2. Уязвимость по отношению к ударным воздействиям и проблема скрытых повреждений*

Полимерные композиционные материалы, особенно с хрупкой эпоксидной матрицей, могут демонстрировать высокую прочность на растяжение, но оставаться чувствительными к поперечным ударным воздействиям (падение инструмента, попадание града, обломков с ВПП). Возникающие при этом расслоения и сетки микротрещин часто носят скрытый характер (barely visible impact damage, BVID, – малозаметное ударное повреждение) и не обнаруживаются при визуальном контроле. Под эксплуатационной нагрузкой такие дефекты могут стать очагами ламинатного разрушения. Это предъявляет исключительные требования как к ударной вязкости самих материалов, так и к чувствительности методов неразрушающего контроля (ультразвуковой, термографический, ширрография) [7].

### *2.3. Долговременная стойкость в условиях агрессивных эксплуатационных сред*

Конструкция в течение 25–30 лет службы подвергается циклическому воздействию перепадов температуры и влажности, ультрафиолетового излучения, контакта с авиатопливом, гидрожидкостями и противогололедными реагентами. Гигротермическое старение может привести к пластификации полимерной матрицы, ее набуханию, снижению  $T_g$  (температуры стеклования) и, как следствие, к падению прочностных характеристик. Кроме того, в гибридных металлокомпозитных соединениях возможно усиление коррозии металлических элементов (заклепок, втулок) [8].

### *2.4. Обеспечение ремонтпригодности*

Технологии ремонта металлических конструкций (заклепочные соединения, сварка) стандартизированы и могут выполняться в условиях аэродромного ангара. Ремонт поврежденных ПКМ является значительно более сложной процедурой, требующей строгого соблюдения температурно-временных режимов отверждения клеевых составов или заплаток из препрега, применения вакуумного оборудования, специального инструмента и высокой квалификации персонала. Разработка оперативных, надежных и воспроизводимых ремонтных методик (например, технология быстрого ремонта композита, QCR) становится самостоятельной критически важной задачей для поддержания эксплуатационной готовности парка [9].

## **3. Постановка задачи: необходимость создания универсальной методики прогнозирования качества**

Проведенный анализ позволяет констатировать наличие фундаментального противоречия в современном композитном авиастроении. С одной стороны, ПКМ открывают беспрецедентные возможности для создания высокоэффективных летательных аппаратов за счет целенаправленного проектирования структуры материала «под нагрузку». С другой стороны, отсутствие универсальной, верифицированной и надежной методики прогнозирования

конечного качества авиаконструкции на этапах ее технологического изготовления и последующей эксплуатации является критическим барьером для дальнейшего прогресса.

Существующая промышленная практика до сих пор в значительной степени опирается на обширные, ресурсоемкие и дорогостоящие циклы экспериментальных испытаний – как образцов материалов, так и полноразмерных компонентов. Это приводит к ряду следующих системных проблем:

- резкое удорожание и удлинение сроков опытно-конструкторских работ;
- необходимость закладывания увеличенных коэффициентов запаса прочности на этапе проектирования, что нивелирует весогабаритные преимущества ПКМ;
- высокий остаточный риск появления скрытого технологического брака (неоднородность отверждения, микропористость, остаточные напряжения), который может быть выявлен лишь на поздних стадиях производства или, что критичнее, в ходе эксплуатации.

Таким образом, актуальнейшей междисциплинарной научно-технической задачей является разработка методики прогнозирования эксплуатационных характеристик авиаконструкции из ПКМ. Данная методика предполагается установит количественные связи между четырьмя ключевыми блоками:

- исходные свойства материала (компонентов и полуфабрикатов): механические и физико-химические характеристики волокна и матрицы, параметры препрега (степень пропитки, летучие вещества);
- параметры и режимы технологического процесса изготовления: методы формования (автоклавное, вакуумное инфузионное, автоматическая выкладка ленты/жгута), температурно-силовые и временные циклы;
- формируемая структура и дефектность материала в готовом изделии: фактическая ориентация волокон, степень отверждения матрицы, уровень пористости;
- комплекс конечных эксплуатационных свойств конструкции: статическая прочность и жесткость, ударная стойкость.

#### 4. Концепция и структура многоуровневой гибридной прогнозной модели (МГПМ)

Одним из наиболее технологически отработанных методов изготовления крупногабаритных, высоконагруженных авиационных конструкций из ПКМ является автоклавное формование препрегов.

##### 4.1. Проблемные аспекты при создании прогнозной модели

###### 4.1.1. Многопараметричность и сильная нелинейность сопряженных процессов

Автоклавный цикл представляет собой сложное взаимодействие тепломассопереноса в гетерогенной среде «пакет слоев препрега – оснастка», химической кинетики экзотермической реакции отверждения полимерной матрицы и механики деформирования армирующего каркаса под воздействием температуры и внешнего давления.

###### 4.1.2. Влияние стохастических факторов на этапе подготовки и выкладки

Процессы раскроя, ориентации и укладки слоев препрега, несмотря на растущую автоматизацию, часто содержат ручные операции. Микродефекты (складки, перекосы волокон, локальные отклонения от заданной схемы укладки), внесенные на этом этапе, «консервируются» в автоклаве и становятся концентраторами напряжений. Существующие прогнозные модели, как правило, не учитывают этот стохастический вклад [10].

###### 4.1.3. Проблема масштабирования

Данные, полученные для небольших лабораторных образцов (ламинат для проведения входного контроля), изготовленных в идеализированных условиях равномерного прогрева и

приложения давления, плохо экстраполируются на крупногабаритные детали сложной геометрии.

#### *4.1.4. Недостаточная верифицированность существующих инструментов*

Большинство существующих CAE-пакетов для моделирования процессов изготовления композитных конструкций (например, Autodesk Helius) используют упрощенные, часто полуэмпирические модели, калиброванные на ограниченной номенклатуре конкретных материалов. Их применение для новых типов препрегов или нестандартных режимов требует проведения собственного объемного экспериментального подтверждения, что нивелирует идею прогнозирования [10, 11, 12].

#### *4.2. Методологические подходы МГПМ*

МГПМ базируется на соединении трех методологических подходов:

- детерминированное физико-математическое моделирование ключевых физических и химических процессов;
- методы машинного обучения для анализа больших данных технологического мониторинга и создания прогнозной модели;
- статистический анализ неопределенностей для учета технологических разбросов и стохастических факторов.

#### *4.3. Структура и ключевые модули МГПМ*

Предлагаемая архитектура модели включает следующие взаимосвязанные модули.

##### *4.3.1. Модуль параметризации и входных данных*

База данных характеристик препрега: тип и направление армирования, реологические и термические свойства матрицы, степень пропитки и полимеризации.

Модель укладки: последовательность, ориентация и геометрия слоев.

##### *4.3.2. Моделирование процессов в автоклаве*

Теплофизический блок: модель теплообмена с учетом фазового перехода (отверждение) и тепловыделения реакции.

Блок химической кинетики: модель, описывающая степень отверждения как функцию времени и температуры.

Реологическо-механический блок: моделирование изменения вязкоупругих свойств матрицы в зависимости от степени отверждения и формирование полей остаточных напряжений вследствие усадки смолы и разницы КЛТР компонентов.

Блок формирования структуры и дефектов: моделирование динамики газопереноса и образования микропористости.

##### *4.3.3. Модуль прогнозирования эффективных свойств*

Производится расчет эффективных упруго-прочностных характеристик для каждого условного объема детали на основе рассчитанных полей степени отверждения, пористости и остаточных напряжений.

##### *4.3.4. Стохастическо-оптимизационный модуль и модуль машинного обучения*

Осуществляется проведение анализа влияния разброса входных технологических параметров на разброс выходных свойств.

Проводится обучение регрессионных моделей машинного обучения на исторических данных производства и результатах детерминированного моделирования для создания инструментов оперативного прогноза и оптимизации режимов.

## 5. Заключение

Успешное решение задачи по созданию универсальной методики прогнозирования качества позволит осуществить переход от устаревшего принципа «изготовить – испытать – скорректировать» к современной концепции «спроектированного качества» («технология – материал – конструкция»). Реализация предложенной концепции может стать основой для качественного скачка в авиастроении – создания безопасных, ресурсосберегающих и экономичных летательных аппаратов из полимерных композиционных материалов. Практическая значимость концепции заключается в сокращении количества итерационных циклов испытаний на 40–60 %, минимизации риска технологического брака на этапе опытного производства, научно обоснованной оптимизации режимов автоклавного цикла для новых материалов и конструкций и формировании цифрового паспорта изделия с прогнозным распределением свойств по его объему.

## Литература

1. Ермекбаев С. Ш. О некоторых вопросах надёжности авиационной техники // Надежность и качество, Россия, Пенза, 22–31 мая 2017 г. : труды международного симпозиума. – Пенза : Пензенский гос. ун-т., 2017. – С. 139–142. – Т. 1.
2. Костенков В. А., Глазунова А. А., Солонский Н. С. Применение композитных материалов нового поколения в гражданской авиации // Научный аспект. – 2024. – № 6. – С. 6881–6892.
3. Ахмед Н. А. Роль композитных материалов в авиастроении: как они произвели революцию в дизайне самолетов? // Актуальные исследования. – 2025. – № 7 (242), ч. II. – С. 12–14.
4. Савин С. П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолётов семейства МС-21 // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – №№ 4–2. – С. 686–693.
5. Цыпаев Н. Д. Композитная лопатка ПД-35 // Мавлютовские чтения : материалы XVI Всероссийской молодёжной научной конференции : в 6 т. – Уфа : УГАТУ, 2022. – С. 115–117. – Т. 4.
6. Гриневич 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.
7. Мартиросов М. И., Хомченко А. В. Расчётно-экспериментальное исследование поведения плоской подкреплённой панели из углепластика при ударе // Труды МАИ. – 2022. – № 126. – С. 1–20. – DOI: 10.34759/trd-2022-126-04.
8. Hygrothermal aging history of amine-epoxy resins: effects on thermo-mechanical properties / D. GIBHARDT, C. BUGGISCH, D. MEYER, B. FIEDLER // *Frontiers in Materials*. – 2022. – Vol. 9. – P. 1–14. – DOI: 10.3389/fmats.2022.826076.
9. Иванов Д. А., Петрова Т. В., Давыдов И. А. Анализ технического обслуживания композиционных материалов на самолёте Boeing-787 (Dreamliner), введение понятия «быстрый ремонт композита (QCR)» и пошаговая его реализация // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2020. – № 2 (27). – С. 104–118.
10. Каримбаев Т. Д. Оценка усталостной долговечности изделий из композиционных материалов // Авиационные двигатели. – 2020. – № 4 (9). – С. 75–93.
11. Компьютерное моделирование механического поведения композитной лопатки спрямляющего аппарата авиационного двигателя / М. А. Гринев, А. Н. Аношкин,

П. В. Писарев, В. Ю. Зуйко, Г. С. Шипунов // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. – № 3. – С. 38–51. – DOI: 10.15593/perm.mech/2015.3.04.

12. Чигринец Е. Г., Верченко А. В. CAD/CAM/CAE системы, OMW- технологии и нейросетевые алгоритмы анализа данных на предприятиях авиастроительной отрасли // Труды МАИ. – 2019. – Вып. 104. – С. 1–26.