

---

---

**ӘУЕ КӨЛІГІ ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛАР  
ВОЗДУШНЫЙ ТРАНСПОРТ И ТЕХНОЛОГИИ  
AIR TRANSPORT AND TECHNOLOGY**

---

---

**МРНТИ 73.37.41**

**[https://doi.org 10.53364/24138614\\_2023\\_31\\_4\\_10](https://doi.org/10.53364/24138614_2023_31_4_10)**

**<sup>1</sup>И.А. Давыдов\*, <sup>1</sup>М.А. Кондрякова**

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации  
им. А.А. Новикова, г. Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: [iskander\\_bek@mail.ru](mailto:iskander_bek@mail.ru)

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ  
ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ РАССЛОЕНИЙ НА КОМПОЗИЦИОННЫХ  
КОНСТРУКЦИЯХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ**

***Аннотация:** Подготовленная автором статья представляет собой исследование, направленное на автоматизацию диагностирования подповерхностных расслоений на композиционных конструкциях воздушных судов, которые образуются при постударных повреждениях. В данной статье представлены результаты испытаний – удар наносился по «образцам-свидетелям», то есть из композиционного материала, который используется в конструкциях гражданских воздушных судов. Удар наносился наконечниками различной формы и диаметром, позволяющие максимально смоделировать эксплуатационные дефекты воздушных судов. Ударное воздействие производилось в диапазоне от 5 Дж до 80 Дж, воздействие ниже этого предела не приводят к расслоению композиционного материала, воздействия выше заданного предела приводят к трещинам на поверхности композиционного материала и существенно меняют форму конструкции, что выходит за рамки данного исследования. С помощью регрессионного анализа по результатам испытаний получены соотношения геометрических переменных дефектов и ударных воздействий, что позволяет моделировать ширину, глубину и форму дефекта от энергии удара и наоборот. На основе полученных данных автором разработано программное обеспечение на языке программирования Java, которое по геометрическим данным дефекта на поверхности композиционного материала рассчитывает подповерхностное расслоение при постударном повреждении. Автоматизация процесса диагностики постударных повреждений существенно сокращает вероятность пропуска подповерхностного дефекта на композиционном материале инженерно-техническим составом авиационного предприятия, а также автоматически*

выдает рекомендации о замене или ремонта авиационной композиционной конструкции. Актуальность изучения композиционных материалов приобретает особое значение в связи с разработкой абсолютно нового отечественного лайнера МС-21-310, в котором крыло выполнено из многослойного углепластика. Разработанное программное обеспечение на основе результатов испытаний, окажет влияние для успешного обеспечения послепродажной эксплуатации воздушного судна и поддержание летной годности.

**Ключевые слова:** композиционные материала, авиация, дефект, эксплуатация авиационной техники, техническое обслуживание.

**Введение.** На сегодняшний день происходит активное внедрение композиционных материалов в авиастроении. Ни одно современное воздушное судно не обходится без конструктивных элементов из композиционных материалов, благодаря своим уникальным свойствам они во многом опережают металлические конструкции на основе алюминия. Однако, при эксплуатации возникает проблема диагностирования подповерхностных расслоений, которые могут образовываться при постударных повреждениях. Точное и надежное обнаружение таких дефектов является критически важным для обеспечения безопасности и надежности авиационных конструкций [1,2].

Целью данного исследования является автоматизация процесса диагностирования подповерхностных расслоений на композиционных конструкциях воздушных судов. Для достижения этой цели были проведены испытания с использованием «образцов-свидетелей», изготовленных из композиционного материала, применяемого в гражданской авиации. Экспериментальные данные получены при нанесении ударов с различной энергией и наконечниками разной формы, чтобы максимально смоделировать эксплуатационные дефекты.

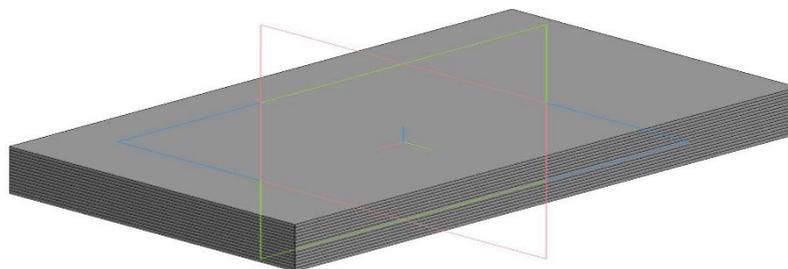
На основе полученных результатов выявлены связи между геометрическими параметрами дефектов и ударными воздействиями. С помощью регрессионного анализа разработаны математические модели, которые позволяют моделировать ширину, глубину и форму дефекта на основе энергии удара и наоборот.

Научное исследование в этой области, приобретает особую важность в контексте разработки современного российского лайнера МС-21-310, где конструкция крыла базируется на многослойных углепластиковых материалах. Применение разработанного программного обеспечения и результаты исследования будут влиять на успешную эксплуатацию данного воздушного судна и поддержание его летной годности.

**Методы исследования.** В современном мировом парке гражданских воздушных судов есть экземпляры, в которых более половины массы планера составляют элементы, выполненные из композиционных материалов, в том

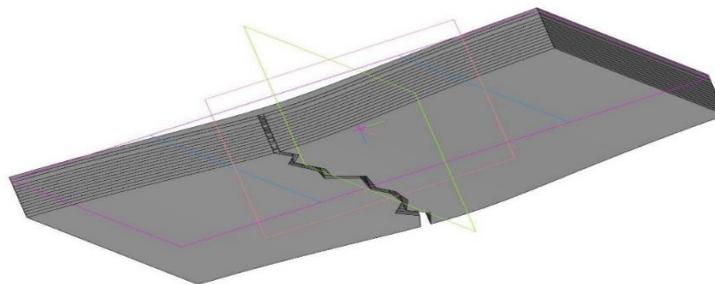
числе, и для обшивки фюзеляжа используются монолитные панели из углепластика. Практика технической эксплуатации авиационных композиционных конструкций показывает, что следствием постударного воздействия на многослойный углепластик является образование подповерхностного расслоения [3-6]. Для сбора статистических данных, выявления математических закономерностей, а также определения взаимосвязей между геометрическими параметрами дефектов на поверхности и подповерхностным расслоением был проведен эксперимент. В ходе эксперимента удар наносился наконечниками различного диаметра и с различной энергией по «образцам-свидетелям», что позволило максимально смоделировать эксплуатационные дефекты. Полученные данные и математические модели позволят автоматизировать процесс выявления подповерхностных расслоений на авиационных композиционных конструкциях, что исключает пропуск дефекта инженерно-техническим составом и определит площадь расслоения.

*Результат научно-исследовательской работы.* В ходе эксперимента на ударные воздействия использовались «образцы – свидетели», т.е. образцы, из материала непосредственно применяемые в конструкциях воздушных судов, а именно многослойные углепластики (см. рис.1).



**Рисунок 1.** Модель многослойного композита

Удар наносился наконечниками различной формой и диаметром, позволяющие максимально смоделировать эксплуатационные дефекты воздушных судов. Ударное воздействие производилось в диапазоне от 5 Дж до 80 Дж, воздействие ниже этого предела не приводят к расслоению композиционного материала, воздействия выше заданного предела приводят к трещинам на поверхности композиционного материала и существенно меняют форму конструкции, что выходит за рамки данного исследования. Эксперимент показал, что даже после сильного удара с энергией от 50 Дж до 80 Дж на поверхности образуется небольшая вмятина, при этом существенное подповерхностное расслоение (см. рис. 2).



**Рисунок 2.** Модель многослойного композита с подповерхностным расслоением

Для выявления математических закономерностей между энергией удара и геометрическими параметрами [6-9] дефекта на поверхности многослойного авиационного композиционного материала необходимо оценить его механические свойства с помощью коэффициента Пуассона.

$$V_{\text{общ}} = f(V_1, V_2, \dots, V_n)$$

где:

- $V_{\text{общ}}$  - коэффициент Пуассона многослойного углепластика.
- $V_1, V_2, \dots, V_n$  - коэффициенты Пуассона для отдельных слоев композита.

Для простых двухслойных углепластиков, где верхний слой (1) и нижний слой (2) имеют разные коэффициенты Пуассона, можно использовать следующее выражение:

$$V_{\text{общ}} = \frac{h_1 V_1 + h_2 V_2}{h_1 + h_2}$$

где:

- $h_1$  - толщина верхнего слоя.
- $h_2$  - толщина нижнего слоя.
- $V_1$  - коэффициент Пуассона для верхнего слоя.
- $V_2$  - коэффициент Пуассона для нижнего слоя.

Эта модель может быть применяться для многослойных композитов с большим числом слоев. Важно учитывать, что в реальных условиях коэффициент Пуассона может изменяться в зависимости от направления нагрузки и расположения слоев, исходя, из этого для получения точных результатов следует проводить более сложные эксперименты и анализы.

Основываясь на статистических данных эксперимента, учитывая механические свойства многослойного авиационного композиционного материала, был произведен регрессионный анализ, где были получены соотношения ударных воздействий с геометрическими параметрами дефекта (см. таблица 1).

**Таблица 1.** Модель коэффициентов энергии удара от геометрических параметров дефекта

Многослойный углепластик после ударного воздействия элементом диаметром 20 мм	Многослойный углепластик после ударного воздействия элементом диаметром 90 мм
$\varepsilon = \frac{R - 2,4}{0,28}$	$\varepsilon = \frac{R + 1,6}{0,51}$
$H = 0,04e^{0,1\varepsilon}$	$H = 0,04e^{0,1\varepsilon}$
$\omega = 0,02\varepsilon + 0,23$	$\omega = 0,25\varepsilon - 3,9$
Удар наносился с энергией от 50 Дж до 80 Дж	Удар наносился с энергией от 50 Дж до 80 Дж

На основе полученных данных разработано программное обеспечение для инженерно-технического состава, которое позволяет автоматизировать процесс диагностирования подповерхностных расслоений на авиационных композиционных конструкциях воздушных судов. Программное обеспечение было разработано на языке программирования Java, который обладает рядом преимуществ:

- 1. Переносимость:** Java является платформо-независимым языком программирования. Программы, написанные на Java, могут быть выполнены на различных платформах без необходимости переписывания кода. Это достигается благодаря Java Virtual Machine (JVM), которая интерпретирует и выполняет байт-код Java.
- 2. Безопасность:** Java обладает встроенными механизмами безопасности, которые защищают от потенциально опасных операций, таких как доступ к памяти или выполнение небезопасного кода. Это особенно важно при разработке программ для интернета и мобильных устройств.
- 3. Управление памятью:** Java автоматически управляет памятью, что упрощает работу с памятью и уменьшает риск утечек памяти и ошибок, связанных с ней.
- 4. Богатая библиотека классов:** Java имеет обширную стандартную библиотеку классов, что упрощает разработку, поскольку множество полезных функций уже реализовано и готово к использованию.
- 5. Многопоточность:** Java поддерживает многопоточность, что позволяет создавать эффективные и параллельные приложения. Это особенно полезно на современных многоядерных процессорах.
- 6. Широкое применение:** Программирование на языке Java находит применение в разнообразных сферах, включая веб-разработку, создание мобильных приложений, внедрение встроенных систем, разработку крупных корпоративных приложений и многие другие области.

7. **Большое сообщество и поддержка:** Язык программирования Java пользуется огромной поддержкой со стороны сообщества разработчиков, а также предоставляет множество бесплатных образовательных ресурсов и источников для поддержки, что придает этому языку программирования популярность и доступность.
8. **Инструменты разработки:** существует множество мощных инструментов разработки для Java, таких как IntelliJ IDEA, Eclipse и NetBeans, которые упрощают создание и отладку приложений.
9. **Сетевая поддержка:** Java имеет встроенную поддержку сетевого программирования, что делает его идеальным выбором для создания клиент-серверных и сетевых приложений.
10. **Разработка для Android:** Java является одним из основных языков программирования для разработки приложений под платформу Android, что делает его популярным среди мобильных разработчиков.

Эти преимущества делают Java мощным инструментом для разработки разнообразных приложений, особенно в условиях многоплатформенности и безопасности. Исходя из вышеперечисленного, разработанное приложение для автоматического определения подповерхностных расслоений на композитных конструкциях воздушных судов, позволяет усовершенствовать процесс технической эксплуатации, как российской авиационной техники, так и техники зарубежного производства.

*Заключение.* Автоматизация процесса диагностики постударных повреждений существенно сокращает вероятность пропуска подповерхностного дефекта на композиционном материале инженерно-техническим составом авиационного предприятия, а также автоматически выдает рекомендации о замене или ремонта авиационной композиционной конструкции. Актуальность изучения композиционных материалов приобретает особое значение в связи с разработкой абсолютно нового отечественного лайнера МС-21-310, в котором крыло выполнено из многослойного углепластика. Разработанное программное обеспечение на основе результатов испытаний, окажет влияние для успешного обеспечения послепродажной эксплуатации воздушного судна и поддержание летной годности.

И.А. Давыдов, М.А. Кондрякова

## **ӘУЕ КЕМЕЛЕРІНІҢ КОМПОЗИЦИЯЛЫҚ КОНСТРУКЦИЯЛАРЫНДА ЖЕР АСТЫ ҚАБАТТАРЫНЫҢ ДИАГНОСТИКАЛАУ ПРОЦЕСІН АВТОМАТТАНДЫРУ**

*Аңдатпа.* Автор дайындаған мақала-бұл соққыдан кейінгі зақымдану кезінде пайда болатын әуе кемелерінің композициялық құрылымдарындағы жер асты қабаттарының диагностикасын автоматтандыруға бағытталған зерттеу. Бұл мақалада сынақ нәтижелері келтірілген-соққы "куәгерлердің

үлгілері" бойынша, яғни азаматтық әуе кемелерінің конструкцияларында қолданылатын композициялық материалдан жасалған. Соққы әуе кемелерінің пайдалану ақауларын барынша модельдеуге мүмкіндік беретін әртүрлі пішіндегі және диаметрлі ұштармен жасалды. Соққы әсері 5 Дж-ден 80 Дж-ге дейін болды, осы шектен төмен әсер композициялық материалдың стратификациясына әкелмейді, берілген шектен жоғары әсер композициялық материалдың бетіндегі жарықтарға әкеледі және осы зерттеу шеңберінен тыс құрылымның пішінін айтарлықтай өзгертеді. Регрессиялық талдаудың көмегімен сынақ нәтижелері геометриялық айнымалы ақаулар мен соққы әсерлерінің арақатынасын алды, бұл соққы энергиясынан ақаудың Шири, тереңдігін және пішінін модельдеуге мүмкіндік береді және керісінше. Алынған мәліметтер негізінде автор Java бағдарламалау тілінде бағдарламалық жасақтама жасады, ол композициялық материалдың бетіндегі ақаудың геометриялық деректері бойынша соққыдан кейінгі зақымдану кезінде жер асты стратификациясын есептейді. Соққыдан кейінгі зақымдануды диагностикалау процесін автоматтандыру авиациялық кәсіпорынның инженерлік-техникалық құрамымен композициялық материалдағы жер асты ақауларын өткізіп жіберу ықтималдығын едәуір азайтады, сондай-ақ авиациялық композициялық құрылымды ауыстыру немесе жөндеу туралы ұсыныстарды автоматты түрде береді. Композициялық материалдарды зерттеудің өзектілігі қанаты көп қабатты көміртекті пластиктен жасалған мүлдем жаңа отандық MS-21-310 лайнерінің дамуына байланысты ерекше маңызға ие. Сынақ нәтижелері негізінде әзірленген бағдарламалық қамтамасыз ету әуе кемесін сатудан кейінгі пайдалануды сәтті қамтамасыз етуге және ұшуға жарамдылығын сақтауға әсер етеді.

**Түйін сөздер:** композициялық материалдар, авиация, ақау, авиациялық техниканы пайдалану, техникалық қызмет көрсету.

I. A. Davydov, M.A. Kondryakova

## **AUTOMATION OF THE PROCESS OF DIAGNOSING SUBSURFACE STRATIFICATIONS ON COMPOSITE STRUCTURES OF AIRCRAFT**

**Abstract.** The article prepared by the author is a study aimed at automating the diagnosis of subsurface stratifications on composite structures of aircraft that are formed during post-impact damage. This article presents the results of the tests – the blow was inflicted on "witness samples", that is, from a composite material that is used in the designs of civil aircraft. The blow was applied with tips of various shapes and diameters, allowing to simulate the operational defects of aircraft as much as possible. The impact was carried out in the range from 5 J to 80 J, impacts below this limit do not lead to delamination of the composite material, impacts above the specified limit lead to cracks on the surface of the composite material and significantly change the

*shape of the structure, which is beyond the scope of this study. Using regression analysis based on the test results, the ratios of geometric variables of defects and shock effects were obtained, which allows modeling the width, depth and shape of the defect from the impact energy and vice versa. Based on the data obtained, the author has developed software in the Java programming language, which calculates subsurface stratification in post-impact damage based on geometric data of a defect on the surface of a composite material. Automation of the post-impact damage diagnostics process significantly reduces the likelihood of a subsurface defect on a composite material being missed by the engineering and technical staff of an aviation enterprise, and also automatically issues recommendations on the replacement or repair of an aircraft composite structure. The relevance of the study of composite materials is of particular importance in connection with the development of a completely new domestic liner MS-21-310, in which the wing is made of multilayer carbon fiber. The developed software based on the test results will have an impact for the successful provision of after-sales operation of the aircraft and maintenance of airworthiness.*

**Key words:** *composite materials, aviation, defect, operation of aviation equipment, maintenance.*

#### Список литературы

1. Давыдов И.А., Петрова Т.В., Иванов Д.А. Проблемы обеспечения эксплуатационной технологичности воздушных судов / Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – СПб., 2021. №1 (30). С. 122-126.

2. Давыдов И.А., Петрова Т.В., Давыдов И.А. Ударные испытания на образцах из углепластика и анализ надежности визуального осмотра композиционных конструкций самолетов / Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. СПб., 2021, №3 (32). С. 86-98.

3. Давыдов И.А. Анализ влияния цвета поверхности элементов конструкции воздушных судов, выполненных из композиционных материалов, на надежность визуального контроля / Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. СПб., 2022 № 2 (35). С. 102-116.

4. Давыдов И.А. Повышение достоверности визуального контроля поврежденных элементов конструкции воздушных судов, выполненных из композиционных материалов / Научный Вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2022. Т. 25. № 4 С. 44-55.

5. Давыдов И.А., Давыдов И.А. Ремонт композитных материалов с использованием дополненной реальности (AR) / Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. СПб., 2022 № 3 (36). С. 130-140.

6. Давыдов И.А., Хаертдинов И.М. Анализ эффективности применения тренажерной подготовки для инженерно-технического состава / Вестник Санкт-

Петербургского государственного университета гражданской авиации. СПб., 2023 № 2 (39). С. 37-41.

### References

1. Davydov I.A., Petrova T.V., Ivanov D.A. Problemy obespecheniya ekspluatatsionnoi tehnologichnosti vozdyshnyh sydov / Vestnik Sankt-Peterbúrgskogo gosýdarstvennogo ýniversiteta grajdanskoï aviatsii. – SPb., 2021. №1 (30). S. 122-126.
2. Davydov I.A., Petrova T.V., Davydov I.A. Ýdarnye ispytaniya na obraztsah iz ýgleplastika i analiz nadejnosti vizýalnogo osmotra kompozitsionnyh konstrýktsii samoletov / Vestnik Sankt-Peterbúrgskogo gosýdarstvennogo ýniversiteta grajdanskoï aviatsii. SPb., 2021, №3 (32). S. 86-98.
3. Davydov I.A. Analiz vlianiya tsveta poverhnosti elementov konstrýktsii vozdyshnyh sydov, vypolnennyh iz kompozitsionnyh materialov, na nadejnost vizýalnogo kontrolya / Vestnik Sankt-Peterbúrgskogo gosýdarstvennogo ýniversiteta grajdanskoï aviatsii. SPb., 2022 № 2 (35). S. 102-116.
4. Davydov I.A. Povyshenie dostovernosti vizýalnogo kontrolya povrejdennyh elementov konstrýktsii vozdyshnyh sydov, vypolnennyh iz kompozitsionnyh materialov / Naýchnyi Vestnik Moskovskogo gosýdarstvennogo tehničeskogo ýniversiteta grajdanskoï aviatsii. 2022. T. 25. № 4 S. 44-55.
5. Davydov I.A., Davydov I.A. Remont kompozitnyh materialov s ispolzovaniem dopolnennoi realnosti (AR) / Vestnik Sankt-Peterbúrgskogo gosýdarstvennogo ýniversiteta grajdanskoï aviatsii. SPb., 2022 № 3 (36). S. 130-140.
6. Davydov I.A., Haertdinov I.M. Analiz effektivnosti primeneniya trenajernoï podgotovki dlia injenerno-tehničeskogo sostava / Vestnik Sankt-Peterbúrgskogo gosýdarstvennogo ýniversiteta grajdanskoï aviatsii. SPb., 2023 № 2 (39). S. 37-41.

<b>Давыдов Искандар Ахтамович</b>	старший преподаватель кафедры Авиационной техники и диагностики, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени главного маршала авиации А.А. Новикова», г. Санкт-Петербург, Россия, E-mail: <a href="mailto:iskander_bek@mail.ru">iskander_bek@mail.ru</a> .
<b>Давыдов Искандар Ахтамович</b>	Авиациялық техника және диагностика кафедрасының аға оқытушысы, "Авиацияның бас маршалы А.А. Новиков атындағы Санкт-Петербург мемлекеттік азаматтық авиация университеті", Санкт-Петербург қ., Ресей, E-mail: <a href="mailto:iskander_bek@mail.ru">iskander_bek@mail.ru</a> .
<b>Davydov Iskandar Akhtamovich</b>	Senior Lecturer of the Department of Aviation Engineering and Diagnostics, St. Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov, the city of St. Petersburg, Russia, E-mail: <a href="mailto:iskander_bek@mail.ru">iskander_bek@mail.ru</a> .

<b>Кондрякова Маргарита Алексеевна</b>	старший преподаватель кафедры Прикладной математики и информатики, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени главного маршала авиации А.А. Новикова», г. Санкт-Петербург, Россия, E-mail: <a href="mailto:ritakondr1@gmail.com">ritakondr1@gmail.com</a>
<b>Кондрякова Маргарита Алексеевна</b>	Қолданбалы математика және информатика кафедрасының аға оқытушысы, "авиацияның бас маршалы А.А. Новиков атындағы Санкт-Петербург мемлекеттік азаматтық авиация университеті" ФГБОУ Санкт-Петербург қ., Ресей, E-mail: <a href="mailto:ritakondr1@gmail.com">ritakondr1@gmail.com</a>
<b>Kondryakova Margarita Aleksееvna</b>	Senior Lecturer of the Department of Applied Mathematics and Computer Science, St. Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov, the city of St. Petersburg, Russia, E-mail: <a href="mailto:ritakondr1@gmail.com">ritakondr1@gmail.com</a>