
Научная статья

УДК 620.179.16

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-67-83

КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ В 2D-АРМИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ (обзор)

И.А. Диков¹, С.И. Яковлева¹, А.С. Бойчук¹, В.Ю. Чертищев¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Рассмотрены актуальные отечественные и зарубежные нормативно-технические документы и научно-технические публикации по классификации и терминологии дефектов в полимерных композиционных материалах (ПКМ). Проведен обзор наиболее часто встречающихся дефектов ПКМ. Приведены отличия в переводе терминов в нормативно-технических документах и публикациях. Рассмотрены варианты классификации дефектов 2D-армированных ПКМ в зависимости от общих признаков дефектов и области знаний, к которой относятся документ или публикация. Приведены данные по методам неразрушающего контроля, рекомендованным для выявления различных дефектов.

Ключевые слова: дефект, ПКМ, расслоение, трещина, включение, непроклей, пористость, ударные повреждения, складки, неразрушающий контроль

Для цитирования: Диков И.А., Яковлева С.И., Бойчук А.С., Чертищев В.Ю. Классификация дефектов в 2D-армированных полимерных композиционных материалах (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 3 (121). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-67-83.

Scientific article

DEFECT CLASSIFICATION FOR 2D FIBER-REINFORCED COMPOSITES (review)

I.A. Dikov¹, S.I. Yakovleva¹, A.S. Boychuk¹, V.Yu. Chertishchev¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Up-to-date native and foreign regulatory and technical documents and scientific publications which are dedicated to the subject of fiber-reinforced composites' defect classification and definition are observed at this article. The review of the most common defects of fiber reinforced plastics was made. The differences in terms of translation in regulatory and technical documents and scientific publications are shown. The variants of defect classification for 2D fiber-reinforced composites based on their common features and publications and documents' areas of knowledge are observed. Data for non-destructive testing techniques which are recommended for different defects detection are given.

Keywords: defect, FRP, delamination, crack, inclusion, disbond, porosity, impact damage, wrinkle, nondestructive testing

For citation: Dikov I.A., Yakovleva S.I., Boychuk A.S., Chertishchev V.Yu. Defect classification for 2D fiber-reinforced composites (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 3 (121), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-67-83.

Введение

Стремление оптимизировать весовые характеристики авиационной техники привело к широкому применению полимерных композиционных материалов (ПКМ) при производстве деталей и узлов самолетов [1, 2]. В то же время использование новых материалов в конструкции летательных аппаратов связано с необходимостью отработки технологии изготовления деталей из ПКМ [3–5]. В процессе отработки и производства деталей из ПКМ могут возникать дефекты, которые снижают эксплуатационные и прочностные характеристики конечного изделия [6]. В настоящее время в нормативно-технической документации (НТД) и научно-технической литературе отсутствует единая система классификации и устоявшейся терминологии дефектов 2D-армированных ПКМ. Кроме того, от области знаний, к которой относится НТД или публикация, будет зависеть и используемая терминология по части дефектов: в документации на производство будут встречаться в основном описания производственных дефектов, относящихся к составу и геометрической форме изделия, на эксплуатацию – описания дефектов, появившихся в процессе эксплуатации изделия, а в документах на неразрушающий контроль в основном рассматриваются макродефекты, которые возможно выявить с помощью методов неразрушающего контроля.

В данной статье представлен обзор актуальной НТД, отечественной и зарубежной научно-технической литературы по классификации и терминологии дефектов ПКМ.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.3. «Методы неразрушающих исследований и контроля» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [7].

Нормативные документы по классификации и терминологии дефектов ПКМ

В соответствии с ГОСТ 15467–79 дефектом является каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям [8]. В области ПКМ существует ГОСТ 32794–2014 [9], в котором приведены определения таких дефектов, как аморфные области (amorphous regions), апельсиновая корка (orange peel), бугорок (pimple), вздутие (blister), вмятина (sink mark), коробление (warp), место расслоения (let-go), облой (flash line), пористость (porosity), пустоты в неячеистых пластмассах (void), расслоение (delamination), складки (crease, wrinkle), трещины (crack). Следует отметить, что данный перечень не раскрывает в полной мере все существующие типы дефектов ПКМ. Так, согласно ГОСТ Р 56787–2015 (модифицированная версия зарубежного стандарта ASTM E2533-09 «Standard Guide for Nondestructive Testing of Polymer Matrix Composites Used in Aerospace Applications») на неразрушающий контроль композиционных материалов, существуют такие типы дефектов, как загрязнение (contamination), повреждение нитей (damaged filaments), расслоение (delamination), изменение плотности (density variation), деформация под нагрузкой (deformation under load), нарушение связей (disbond), нарушение связей между волокнами (fiber debonding), нарушение соосности волокна (fiber misalignment), разрывы (fractures), включения (fractures), утечки (leaks), незакрепленные или подвижные части (loose or moving parts), микротрещины (microcracks), влага (moisture), пористость (porosity), изменение толщины (thickness variation), недоотверждение (undercure), объемные включения (volumetric effects) и пустоты (voids) [10, 11] (табл. 1). Следует отметить, что некоторые названия дефектов в приведенных документах являются переводом терминов из зарубежной нормативной документации и в отечественной практике не применяются.

Таблица 1

Дефекты, выявляемые методами неразрушающего контроля [10]

Дефект	Акустическая эмиссия	Компьютерная томография	Теческание	Радиография, радиоскопия	Шерография	Измерение деформации	Термография	Ультразвуковой контроль	Визуально-измерительный контроль
Загрязнение	–	+	–	+	–	–	–	+	+
Повреждение нитей	+	+	–	+	–	–	–	–	–
Расслоение	+	+	–	–	+	–	+	+	+
Изменение плотности	–	+	–	+	–	–	+	+	–
Деформация под нагрузкой	–	–	–	–	+	+	–	–	–
Нарушение связей	–	+	–	–	+	–	+	+	+
Нарушение связей между волокнами	+	+	–	–	–	–	+	+	–
Нарушение соосности волокна	–	+	–	+	–	–	+	–	–
Разрывы	+	+	–	+	–	–	+	+	+
Включения	–	+	–	+	–	–	+	+	+
Утечки	+	–	+	–	–	–	–	+	–
Незакрепленные или подвижные части	+	–	–	–	–	–	–	–	–
Микротрещины	+	+	–	+	+	–	–	+	–
Влага	–	+	–	+	–	–	+	–	–
Пористость	+	+	–	+	–	–	+	+	–
Изменение толщины	–	+	–	+	+	–	+	+	–
Недоотверждение	–	–	–	–	–	–	–	+	–
Объемные включения	–	+	–	–	–	–	–	–	–
Пустоты	+	+	+	+	–	–	+	+	–

Согласно ГОСТ Р 56975–2016, который является модифицированной версией зарубежного стандарта ASTM D2563-08 «Standard practice for classifying visual defects in glass-reinforced plastic Laminate parts», в стеклопластиковых изделиях встречаются такие типы дефектов, как скол (chip), трещина (crack), поверхностная трещина (crack surface), волосяная трещина (cracking), расслаивание краев (delamination edge), внутреннее расслаивание (delamination internal), сухое место (dry-spot), инородное включение (foreign inclusion), растрескивание (fracture), пузырь/пустота (air bubble/void), вздутие (blister), подгорание (burned), кратер (fish-eye), непропитанный участок (lack of fillout), апельсиновая корка (orange-peel), бугристость (pimple), раковина (pit/pinhole), пористая поверхность (porosity), избыток отвержденной смолы (pre-gel), смоляной карман (resin-pocket), край с избыточной смолой (resin-rich edge), впадина (sink-mark), размыв (wash), свищ (wormhole), морщины (wrinkles), царапина (scratch), недодержка (short) [12, 13]. Несомненным преимуществом данного документа является наличие определений приведенных дефектов, указание их допустимых размеров при визуальном контроле, а также иллюстрации дефектов (рис. 1). Следует отметить, что перевод некоторых терминов не соответствует терминам, используемым в других нормативных документах, – например, термин wrinkles переведен как «морщины», хотя в других документах и на практике такой тип дефекта называют складками. При сравнении терминологии трех приведенных НТД выявлено, что во всех трех документах одновременно упоминаются только такие дефекты, как трещины и пустоты, а такие распространенные дефекты, как расслоение, пористость, включение и т. п., упоминаются не во всех документах, либо имеют различные названия.

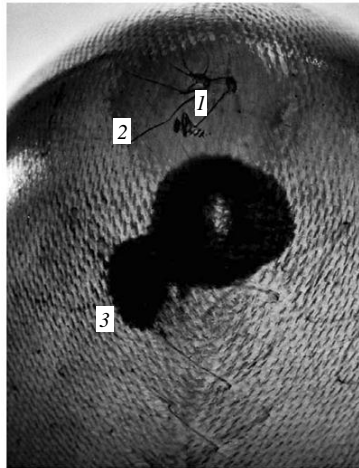


Рис. 1. Примеры дефектов: 1 – сколы; 2 – поверхностные трещины; 3 – внутреннее расслаивание [12]

Первые зарубежные нормативные документы, распространяющиеся на изготовление деталей из ПКМ, а также проведение их неразрушающего контроля появились несколько десятилетий назад. В них подробно описаны возможные типы дефектов, возникающих в процессе производства, а также способы их выявления различными методами неразрушающего контроля. Так, в документе [14] представлены такие типы дефектов, как трещины (crack), непроклеи (disbond), расслоения (delamination), включения (inclusions/foreign materials), межслоевые трещины (interplay cracks), пористость (porosity), пустоты (void). Поскольку документ распространяется на неразрушающий контроль композитов при ремонте, то и дефекты, описанные в нем, относятся к макродефектам, которые возможно выявить методами неразрушающего контроля. В документе также представлены графические иллюстрации дефектов, выявляемых при визуальном контроле (рис. 2): царапины (scratch), потертости (abrasion), сколы (nick), вмятины (dent), тепловые повреждения (heat damage), выкрашивание (fraying), натеки связующего (resin ridge), складки (wrinkles), выпуклости (bulging). В документе [15] представлена терминология, распространяющаяся на композиционные материалы. В части дефектов упоминаются расслоения (delamination), непроклеи (в том числе отсутствие связи на границе «матрица–волокно») (disbond) и пустоты (void).

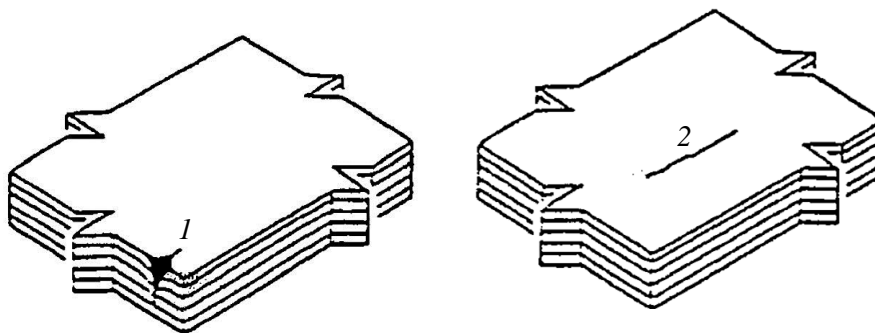


Рис. 2. Примеры дефектов, выявляемых при визуальном контроле: 1 – скол; 2 – царапина [14]

**Научно-технические публикации,
посвященные классификации и терминологии дефектов ПКМ**

Большое количество научно-технических публикаций посвящено вопросу классификации дефектов композиционных материалов по тем или иным общим признакам.

Однако в этих публикациях практически не уделяется внимания вопросу терминологии существующих дефектов. При анализе отечественной научно-технической литературы в области классификации дефектов ПКМ следует отметить труды [16, 17], где дефекты разделены на группы по степени опасности. С уменьшением номера группы увеличивается степень опасности дефекта. К первой группе относятся такие дефекты, как низкая степень отверждения связующего и несоответствие норме состава материала по всему объему детали; ко второй – расслоения; к третьей – трещины; к четвертой – локальное несоответствие норме состава материала; к пятой – раковины, инородные включения, складки, свили, подмятия и царапины; к шестой – выкрашивание по кромкам отверстий и гнезд, отрыв поверхностных слоев, сколы и отверстия; к седьмой – отклонения угла армирования и искривление волокон в плоскости слоев. В работе [16] представлены графические иллюстрации дефектов (рис. 3). Недостатками указанной классификации, как уже отмечалось, являются отсутствие терминологических определений приведенных дефектов и субъективность при присвоении степени опасности тем или иным дефектам.

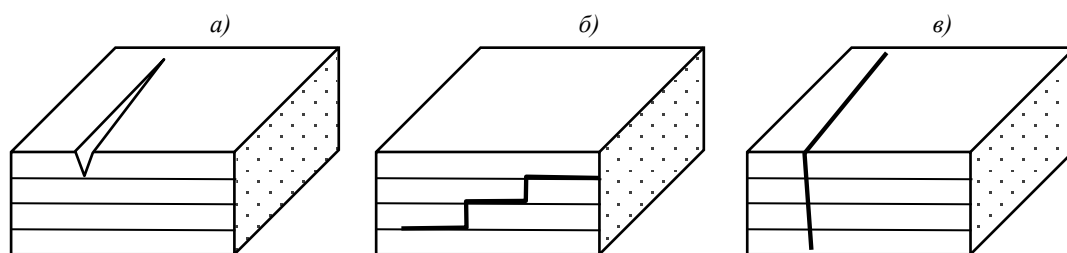


Рис. 3. Иллюстрации поверхностной (а), внутренней (б) и сквозной трещин (в) [16]

В работе [18] приведены два вида классификации дефектов: по этапу, на котором они возникают, и по особенностям строения дефектов, являющимся общими для каждой группы. Классификация по возникновению дефектов включает следующие этапы: изготовление препрега (жгутового или тканого), раскрой, сборка пакета, формование деталей и последующая механическая обработка. При классификации, основанной на особенностях строения дефектов, выделяют пять групп:

- несоответствие показателей связующего и армирующего наполнителя требуемым значениям по всему объему детали или ее значительной части (низкая степень отверждения связующего, отклонение от требуемого состава и качества связующего и армирующего наполнителя в композите и т. п.);
- инородные включения и несплошности (пористость, газовые раковины, трещины, расслоения и т. п.);
- искажения структуры композита (отклонение угла армирующего наполнителя, свили, складки и т. п.);
- поверхностные дефекты (царапины, сколы, отрыв поверхностных слоев, недоформовка и т. п.);
- дефекты, обусловленные изменениями объема (остаточные напряжения, коробления).

В работе приведены терминологические определения только для некоторых типов дефектов. Однако следует отметить, что представленные иллюстрации дефектов являются нетипичными (рис. 4), что, в свою очередь, может привести к ошибке в интерпретации типов дефектов.

Основными дефектами ПКМ, согласно работе [19], являются усталостные трещины, расслоения различного рода и ударные повреждения. В статье [20] выделяют такие дефекты, как трещины, пористость, расслоения, непроклеи, посторонние включения.

В работе [21], где рассматриваются появление, развитие и обнаружение трещин, дефектами ПКМ называют пустоты, расслоения, трещины и микротрещины. Такие дефекты, как трещины в матрице и на границе «матрица–волокно», расслоения, повреждение волокна, приведены в статье [22], посвященной исследованию дефектов в ПКМ с помощью акустической эмиссии. В работе [23] упоминаются следующие дефекты: пористость, пустоты, расслоения, отсутствие связи между волокном и матрицей, волнистость, складки, повреждение волокна.

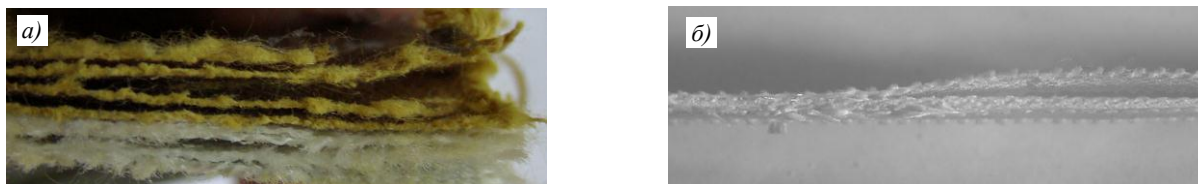


Рис. 4. Примеры дефектов: *а* – расслоение, *б* – трещина [18]

Согласно работе [24], где рассматривается ремонт конструкций из ПКМ для летательных аппаратов, основными дефектами являются:

- внутренние технологические микродефекты волокна, матрицы на границе раздела «волокно–матрица» (поры, трещины, расслоения, раковины, складки);
- поверхностные дефекты (риски, царапины, складки, трещины, нахлесты препрега и др.).

При этом все дефекты разделены на два класса: дефекты, не развивающиеся при работе конструкции из ПКМ, и дефекты, развивающиеся в процессе эксплуатации и вызывающие ухудшение эксплуатационных характеристик, вплоть до катастрофических последствий.

В статье [25], посвященной 3D-армированным композитам, рассмотрены дефекты и традиционных 2D-армированных материалов, такие как: расслоения, отклонение угла армирования (ply misalignment), отсутствие связи на границе «матрица–волокно» (disbands), пустоты, ударные повреждения (impact damage), пористость, включения, растрескивание матрицы (matrix cracking), несоответствие объема волокна (inaccurate fibre volume fraction), повреждение волокна (fiber breakage), слипания (kissing bonds) и неполное отверждение (incorrect cure).

В работе об идентификации повреждений в композитных структурах самолета [26] отмечено, что основными дефектами производства являются инородные включения и расслоения, а при эксплуатации – ударные и усталостные повреждения. Особенно опасны ударные повреждения, даже низкоскоростные. Они могут быть получены во время обслуживания летательного средства, например при падении инструмента, попадании камня или града. Низкоэнергетическое ударное повреждение может вызвать растрескивание матрицы и расслаивание композита. Опасность заключается в том, что видимые размеры ударного повреждения могут быть намного меньше реальных. В научно-технической литературе их называют едва видимым ударным повреждением.

В докладе [27] производственными дефектами названы расслоения, нарушение соосности волокна (fiber misalignment), области, обедненные (resin starved) или переполненные связующим (rich areas), пустоты, складки, пористость, термическое разложение (thermal decomposition), неполное отверждение (uneven, insufficient curing), недостаточный объем волокна (insufficient fibre volume), включения. Дефектами

эксплуатации названы ударные повреждения, накопление влаги (moisture ingress), усталостные напряжения (fatigue), трещины, расслоения и непроклеи (debonding), повреждение волокна (fibre fracture), эрозия (erosion) и истирание (abrasion), повреждения ультрафиолетом и ветром (UV damage, weathering), химическое воздействие (chemical attack).

В работе [28], посвященной контролю состояния композиционных материалов на основе углеродных волокон с помощью акустической эмиссии, дефекты отнесены к производственным (пустоты, волнистость (waviness) и др.) и эксплуатационным (трещины в матрице (matrix cracking), расслоения, отсутствие связи на границе «матрица–волокно» (debonding), повреждение волокна (fibre fracture), ударные повреждения (impact damage) и др.).

В работе [29] подробно описаны причины появления технологических дефектов ПКМ, предложен классификатор типовых дефектов интегральных конструкций из таких материалов с указанием технологических операций, на которых возникают дефекты, причин возникновения и стадий появления. Дефекты разделены на восемь видов (геометрические, механические, отклонения в соотношении компонентов композиционных материалов, отклонения в рецептуре связующего, отклонения в свойствах армирующего материала, дефекты конструктивно-технологических решений, дефекты формообразующей оснастки, погрешности технологического режима формования). Здесь, так же как и в предыдущих работах, не рассматривается вопрос терминологии дефектов, поэтому некоторые их типы имеют наименования, отличающиеся от приведенных в других публикациях.

Классификационная схема производственных и эксплуатационных дефектов представлена на рис. 5 [30]. Все производственные дефекты разделены на три группы: микро-, мини- и макродефекты. Так, к микродефектам относят дефекты, размер которых сравним с размерами армирующих элементов или с толщиной связующего между этими элементами (дефекты армирующих волокон, дефекты матрицы в промежутках между элементарными волокнами, дефекты на поверхности раздела «волокно–матрица» и др.). К мини-дефектам – дефекты, размеры которых сравнимы с размерами толщины элементарного слоя композиционного материала (искривление волокон; мелкие риски, царапины, вмятины, соизмеримые с толщиной элементарного слоя; обеднение связующим отдельных участков или жгутов; инородные включения и др.). К макродефектам относят такие дефекты, как трещины, раковины, вмятины, ударные повреждения, расслоения, непроклеи, коробление конструкции, инородные макровключения, крупные риски и царапины, сколы и др.

В работе [31] приведены классификации дефектов по их расположению (внутренние и внешние), по причине появления (производственные и эксплуатационные), в зависимости от характера (четыре группы: отклонения от заданных размеров, нарушения целостности, инородные включения и отклонения от заданного состава и структуры). К дефектам отклонения от заданных размеров относят вмятины и коробления. К нарушениям целостности причисляют такие внутренние дефекты как расслоения, трещины, поры, непроклеи, раковины в прослойках связующего или клеевом слое, разрывы материала, в том числе армирующего наполнителя, пробойны, а также внешние сколы, царапины, выкрашивания и отслоения. К инородным включениям относят чужеродные тела, попавшие внутрь композиционного материала и отличающиеся от него химическим составом. Отклонения от заданного состава или структуры ПКМ вызваны, как правило, нарушением рецептуры материала и технологии изготовления, а также являются в результате старения.

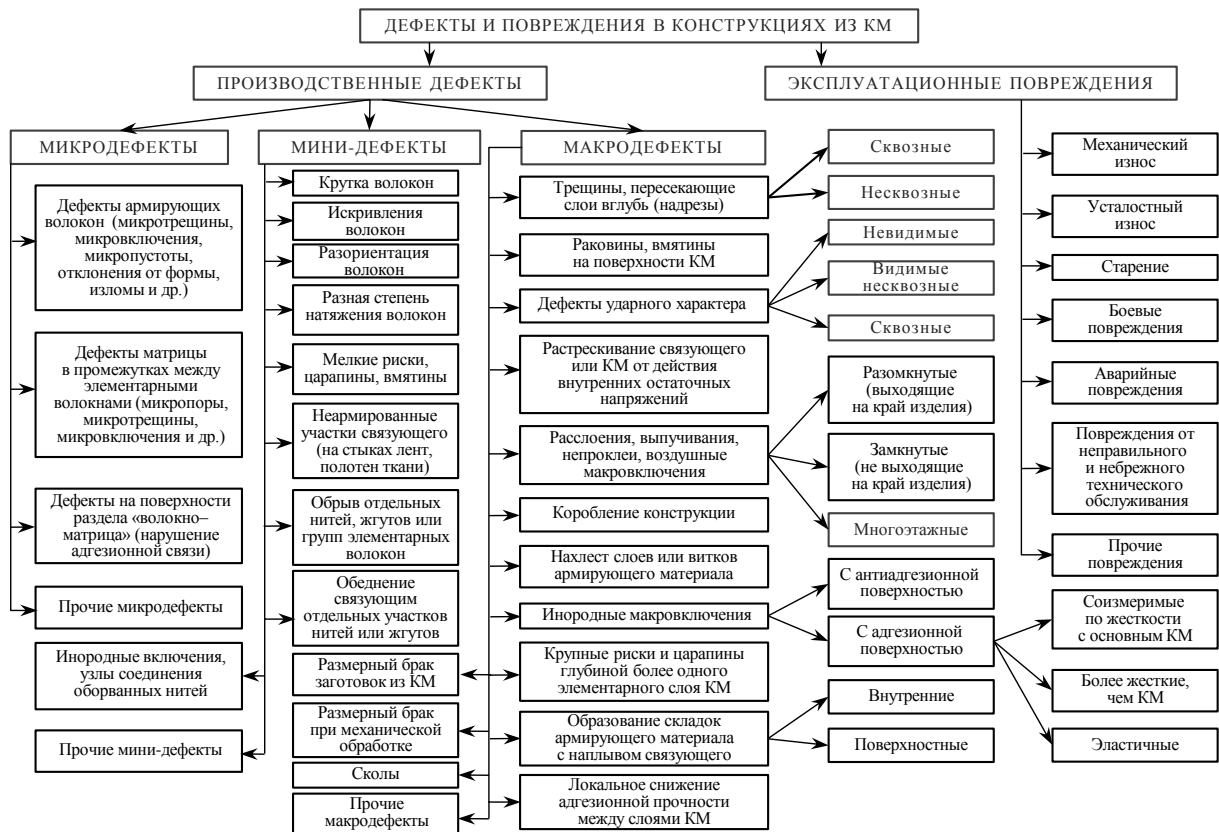


Рис. 5. Классификационная схема производственных дефектов и эксплуатационных повреждений в конструкциях из композиционных материалов (КМ) [30]

К основным внутренним дефектам, согласно работе [32], относят: расслоения, трещины, ударные повреждения, пористость, зоны повышенного и пониженного содержания связующего, отклонения от оптимального режима полимеризации связующего, отклонения от заданной схемы армирования. В отличие от металлов, где требуется выявление мелких дефектов (до 0,4 мм), в ПКМ обычно допустимы дефекты площадью от 1 см² и более.

Согласно исследованиям [33, 34], дефекты в композиционных материалах можно разделить на четыре группы:

- дефекты волокна;
- дефекты матрицы и связующего;
- дефекты укладки или намотки;
- дефекты эксплуатации.

К дефектам волокна относят повреждение волокна, его перекручивание, волнистость, которые приводят к снижению прочностных характеристик. Дефектами матрицы являются пустоты и пористость, образующиеся из-за избытка летучих веществ (включая водяной пар). К дефектам укладки и намотки относят нарушение угла армирования, искривление волокон, неравномерную пропитку связующим, коробление, скручивание, а также отсутствие контакта между волокном и матрицей, пустоты, пористость, отслоения, инородные включения. Дефекты эксплуатации делят на трансслоевые (translaminar) трещины, межслоевые (interlaminar) трещины (расслоения) и трансволокнистые (transfibrous) трещины (рис. 6) или их комбинацию. Как правило, причиной появления таких дефектов в эксплуатации являются ударные повреждения, воздействия влаги и температуры, а также молниевые разряды.

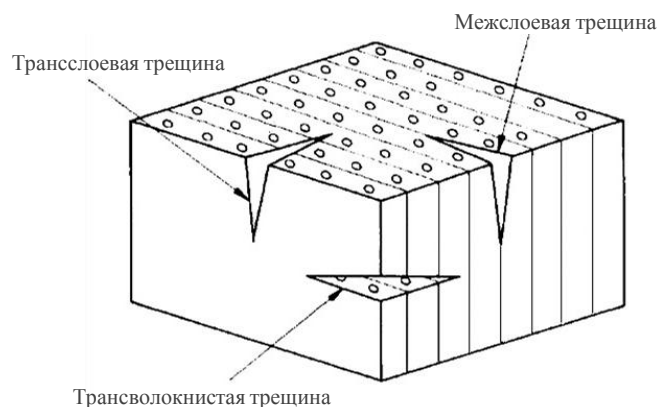


Рис. 6. Иллюстрация дефектов полимерных композиционных материалов [33]

В статье [35] выделяют дефекты матрицы, волокна и дефекты на границе матрицы и волокна. Дефектами волокна являются волнистость и несоосность, а также его повреждение. Дефектами на границе матрицы и волокна – нарушение сцепления и межслоевые расслоения. К дефектам матрицы относят неполное отверждение и пустоты. Пустоты, по мнению авторов, являются наиболее значимыми дефектами, так как могут возникать на различных технологических циклах производства и влияют на многие свойства композиционных материалов.

В работе [36] дефекты распределены по критериальным признакам: по происхождению, местоположению и размеру. При этом по происхождению дефекты делят на сырьевые (вызванные нарушением качества используемого сырья), технологические (отклонения в составе ПКМ или в схеме армирования, неполная степень отверждения матрицы, утолщения и т. п.), эксплуатационные (повреждения, вызванные механическими или усталостными нагрузками) и аварийные (вызванные непредусмотренными внешними воздействиями). По местоположению выделяют внешние дефекты (трещины, царапины, сколы и др.), внутренние (расслоения, трещины, зоны пористости и др.), изолированные (замкнутые, не выходящие за край детали) и сквозные. Классификация по размеру включает нано- (<100 нм), микро- (от 100 нм до 100 мкм) и макродефекты (>100 мкм).

В статьях, посвященных критериям допуска дефектов при производстве композитов [37] и происхождению дефектов в композиционных материалах [38], приведена таксономия их типов в зависимости от причины появления. Так, в композитных деталях разделяют следующие дефекты: выкладки и формования; геометрии; сборки, механической и ручной обработки.

К дефектам выкладки и формования относят: пустоты (вызваны влажностью, несовместимостью пары волокно/связующее, сухими пятнами и др.), расслоения (вызваны скоплением пустот, загрязнением препрега, включениями и др.), ошибки выкладки (вызваны поврежденным и плохо подготовленным инструментом, загрязнением поверхностей и др.), ошибки формования (несоблюдение времени выдержки, параметров давления, температуры и др.), а также ошибки в технологических документах.

К дефектам геометрии относят: упругие и остаточные напряжения (скручивание, коробление и др.), дефекты толщины и краев (нарушения расчетной толщины и размера края и др.), дефекты сот в сэндвич-конструкциях (повреждения сот и др.), дефекты волокна (волнистость волокна, складки, нарушение угла армирования и др.).

К третьему типу относят дефекты механической обработки (нарушение геометрической формы краев детали, положения и размера отверстий и др.), сборки (нарушение герметизации и склейки, дефекты покраски и др.) и ручной обработки (ударные повреждения, сколы и др.).

Согласно работе [39], основными типами производственных и эксплуатационных дефектов в монолитных конструкциях ПКМ являются расслоения, трещины, полости, посторонние включения, непроклеи, зоны повышенной пористости, недостаточная степень отверждения связующего, нарушение соотношения компонентов (связующего и наполнителя), ударные, термические повреждения и повреждения в результате удара молнией. На рис. 7 представлены дефекты в монолитных полимерах, а на рис. 8 – статистические данные по повреждениям конструкций авиационной техники в условиях эксплуатации. Таким образом, наиболее часто встречаемыми дефектами являются вмятины, пробойны, царапины и трещины.



Рис. 7. Дефекты в монолитных полимерных композиционных материалах [39]



Рис. 8. Распределение повреждений по типам (826 повреждений) [39]

В работе [40] отмечено, что дефекты, возникающие в процессе производства, отличаются от дефектов, возникающих в процессе эксплуатации, и подходы к неразрушающему контролю на этих стадиях также могут быть разными. Так, дефектами производства названы пористость, нарушение соотношения компонентов (наполнителя и связующего), включения, микротрещины, расслоения, складки в слоях, а дефектами эксплуатации – ударные, термические повреждения и поражения молнией. Приведена также информация по рекомендуемым методам неразрушающего контроля для выявления различных типов дефектов (табл. 2). При сравнении данных табл. 1 и 2 видно, что имеются разногласия в части применимости некоторых методов неразрушающего контроля для выявления трещин, пористости и расслоений. Это можно объяснить различной морфологией указанных дефектов, а также разнообразием исследуемых конструкций – в зависимости от этого выявляемость тем или иным методом может меняться. Так, например, в табл. 1 указано, что расслоения не могут быть выявлены радиографическим

методом, а в табл. 2 радиография имеет ограниченное применение, что в принципе верно, поскольку при определенном размере исследуемого объекта и положении в нем расслоения последнее может быть выявлено указанным методом. Похожая ситуация с выявлением расслоений визуальным методом: дефекты, выходящие на край, вполне могут быть выявлены, в отличие от внутренних дефектов, не выходящих на поверхность.

Таблица 2

Неразрушающие методы, применяемые для контроля композитов [40]

Метод неразрушающего контроля	Пористость	Расслоения и непрочности в монолитах	Расслоения в обшивке	Трещины	Повреждение поверхности	Попадание воды	Складки
Визуальный	–	–	–	–	Р	–	Р
Ударно-акустический	–	О	Р	–	–	–	–
Ультразвуковой теневой	Р	Р	Р	–	–	Р	–
Ультразвуковой эхо-импульсный	Р	Р	–	О	–	–	Р
Резонансный	–	Р	Р	–	–	О	–
Радиография	О	О	–	Р	–	Р	О
Термография	О	Р	Р	–	–	Р	–
Шерография	О	Р	Р	–	–	О	О
Электромагнитный	–	О	–	О	–	–	–
Акустическая эмиссия*	–	Р	–	Р	–	–	–

* Требуется нагружения конструкции.
Примечание. Р – рекомендуемый; О – ограниченное применение.

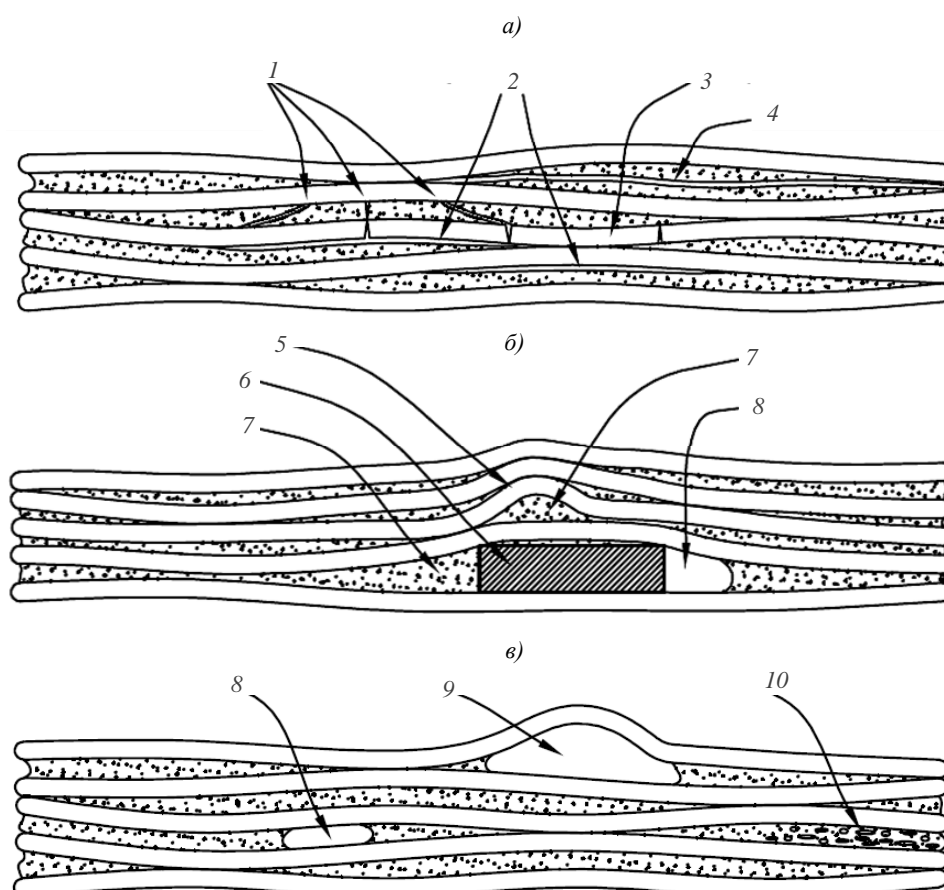


Рис. 9. Иллюстрации дефектов полимерных композиционных материалов: а – трещины в матрице (1), отсутствие связи на границе «матрица–волокно» (2), повреждение волокна (3), расслоение (4); б – складки (5), посторонние включения (6), избыток связующего (7), поры/пустоты (8); в – поры/пустоты (8), вздутие (9) и пористость (10) [41]

Наглядные иллюстрации дефектов ПКМ приведены в работе [41] (рис. 9). По мнению авторов, дефекты появляются на трех стадиях жизни полимера: в процессе производства волокна, в процессе изготовления композита и в процессе эксплуатации. В процессе производства волокон износ оборудования может привести к их повреждению, что в последующем может стать причиной отсутствия связи на границе «матрица–волокно» (рис. 9, а). Трещины в матрице также способствуют попаданию влаги и приводят к отсутствию связи на границе «матрица–волокно». В процессе изготовления композита важно не допускать появления складок (рис. 9, б), так как они могут снизить прочностные свойства итогового изделия. Во время укладки между слоями может находиться воздух – такие дефекты называют порами/пустотами (рис. 9, в). В то же время вздутия, поры/пустоты и пористость могут образоваться в процессе формования из-за избытка летучих веществ. Посторонние включения (рис. 9, б), попавшие в материал во время укладки слоев, могут вызвать появление пор/пустот и расслоений. Изменение плотности материала вследствие избытка или недостатка связующего способствует растрескиванию матрицы и образованию расслоений (в случае избытка связующего) или появлению пор и пустот (в случае недостатка связующего).

Заключение

Проведен анализ нормативно-технической документации и научно-технических статей, в которых содержится информация о таких дефектах, как расслоения, трещины, включения, пустоты и поры, пористость, ударные повреждения, складки, сколы, царапины, недостаточная степень отверждения связующего, непроклеи, несоответствие нормам состава, повреждение волокна, вмятины, коробление, нарушение угла армирования, накопление влаги, загрязнение поверхности, волнистость волокна, нарушение соосности волокна, выкрашивание, скручивание, деформация под нагрузкой, изменение плотности, нарушение связей, пробоины, апельсиновая корка и др. Однако наиболее упоминаемыми дефектами в проанализированных документах являются: расслоения (30 упоминаний), трещины (23 упоминания), включения (20 упоминаний), пустоты и поры (18 упоминаний), пористость (17 упоминаний), ударные повреждения (15 упоминаний), складки (11 упоминаний), сколы (10 упоминаний), царапины (10 упоминаний), недостаточная степень отверждения связующего (10 упоминаний), непроклеи (в том числе отсутствие связи на границе «матрица–волокно») (9 упоминаний). Перечисленные дефекты на практике хорошо поддаются выявлению с помощью различных методов неразрушающего контроля: визуального, радиационного [42], акустического [43] и теплового [44].

Согласно данным проанализированных источников, существует несколько вариантов классификации дефектов, объединенных общими признаками. В работах [16, 17] дефекты классифицируют по степени опасности; в статье [18] приводятся два вида классификации дефектов: по этапу, на котором они возникают, и по особенностям их строения, общим для каждой группы дефектов; в работе [29] разработана многоуровневая классификация технологических дефектов, возникающих на всех производственных циклах; согласно исследованиям [26–28, 30, 31, 39–41], дефекты делятся на производственные и эксплуатационные; в работе [31] приведена классификация дефектов по их расположению, причине появления и характеру (отклонение от заданных размеров, нарушение целостности, инородные включения и отклонение от заданного состава и структуры); в статьях [33, 34] дефекты разделены на четыре группы: дефекты волокна, дефекты матрицы и связующего, дефекты укладки или намотки и дефекты эксплуатации; в монографии [36] все дефекты распределены по критериальным признакам: по происхождению, местоположению и размеру; в работах [37, 38] выделяют дефекты выкладки и формования, дефекты геометрии, дефекты сборки, механической и ручной обработки.

Таким образом, можно сделать вывод, что в настоящее время в нормативной документации и научно-технической литературе отсутствует единая система классификации и

терминологии дефектов 2D-армированных ПКМ. Этот факт можно объяснить тем, что задача классификации дефектов полимеров не является тривиальной, поскольку в зависимости от области знаний, к которой относятся документация или публикация, будут существовать и разные подходы к классификации дефектов: в производстве встречаются в основном дефекты, относящиеся к составу и геометрической форме изделия; в эксплуатации – дефекты, появившиеся в результате механических и циклических нагрузок; в документах на неразрушающий контроль – в основном макродефекты, которые можно выявить с помощью методов неразрушающего контроля. Наиболее распространенной классификацией является деление дефектов на производственные и эксплуатационные.

В будущем авторы данной статьи планируют провести собственную таксономию дефектов, систематизировав полученные при исследовании данные, привести в соответствие терминологию наиболее часто встречающихся дефектов, а также дополнить их графическими иллюстрациями и реальными фотографиями.

Список источников

1. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 75 лет поиска, творчества, открытий / сост. А.П. Петрова; под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2007. 343 с.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
3. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение термореактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 26.09.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
4. Гуняева А.Г., Сидорина А.И., Курносов А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porcher Ind. и Toho Tenax // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
5. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
6. Мурашов В.В. Контроль и диагностика многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическими методами: монография. М.: Спектр, 2016. 244 с.
7. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
8. ГОСТ 15467–79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2009. 25 с.
9. ГОСТ 32794–2014. Композиты полимерные. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2015. 98 с.
10. ГОСТ Р 56787–2015. Композиты полимерные. Неразрушающий контроль. М.: Стандартинформ, 2016. 71 с.
11. ASTM E2533-09. Standard Guide for Nondestructive Testing of Polymer Matrix Composites Used in Aerospace Applications. ASTM International, 2009. 47 p.
12. ГОСТ Р 56975–2016. Композиты полимерные. Показатели внешнего вида изделий из многослойных стеклокомпозитов. М.: Стандартинформ, 2016. 35 с.
13. ASTM D2563-08. Standard Practice for Classifying Visual Defects in Glass-Reinforced Plastic Laminate Parts. ASTM International, 2008. 24 p.
14. SAE ARP5089. Composite Repair NTD/NDI Handbook. SAE International, 2011. 98 p. DOI: 10.4271/ARP5089.
15. ASTM D3878-07. Standard Terminology for Composite Materials. ASTM International, 2007. 5 p.
16. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2007. № 4. С. 23–32.

17. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 2. Методы выявления дефектов монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2007. № 5. С. 31–42.
18. Карташова Е.Д., Муйземнек А.Ю. Технологические дефекты полимерных слоистых композиционных материалов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 2 (42). С. 79–89. DOI: 10.21685/2072-3059-2017-2-7.
19. Куликов В.В., Петрова А.П. Анализ типов дефектов в клеевых соединениях авиационной техники и их ремонт // Клеи. Герметики. Технологии. 2011. № 5. С. 24–27.
20. Особенности неразрушающего контроля композиционных материалов низкочастотными акустическими методами // Контроль. Измерение. Диагностика. URL: <http://defectoscop.ru/page19.html> (дата обращения: 26.09.2022).
21. Azmah Hanim M.A., Brabazon D., Hashmi M.S.J. Cracks, microcracks, and fracture toughness of polymer composites: formation, testing method, nondestructive detection, and modifications // Failure Analysis in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites. Woodhead Publishing, 2019. P. 157–180. DOI: 10.1016/B978-0-08-102293-1.00008-5.
22. Иванов В.И., Белов П.А., Насибуллин Т.С. Дефекты в композиционных материалах как источник акустической эмиссии // Знание. 2016. № 3-2 (32). С. 23–29.
23. Smith R.A. Use of 3D ultrasound data sets to map the localised properties of fibre-reinforced composites: PhD thesis. University of Nottingham, 2010. URL: <http://eprints.nottingham.ac.uk/31253/1/Full%20Thesis%20Chapters%20%282%29.pdf> (дата обращения: 26.09.2022).
24. Ривин Г.Л. Ремонт конструкций из полимерных композиционных материалов летательных аппаратов: учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2000. 75 с.
25. Saboktakin A. 3D textile preforms and composites for aircraft structures: a review // International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace. 2019. Vol. 6. Is. 1. Art. 2. P. 1–41. DOI: 10.15394/ijaaa.2019.1299.
26. Katunin A., Dragan K., Dziendzikowski M. Damage identification in aircraft composite structures: A case study using various non-destructive testing techniques // Composite Structures. 2015. Vol. 127. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.02.080.
27. Practical Applications «New» NDT Techniques on Composite Material in the Aerospace Industry. 2014. URL: http://ndt.aero/images/Presentation_26_Nov_2014.pdf (дата обращения: 26.09.2022).
28. Ning W. Structural Health Condition Monitoring of Carbon-Fibre Based Composite Materials Using Acoustic Emission Techniques: Thesis M. Sc. University of Birmingham, 2015. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/33528371.pdf> (дата обращения: 26.09.2022).
29. Гайдачук А.В., Кондратьев А.В., Омельченко Е.В. Анализ технологических дефектов, возникающих в серийном производстве интегральных авиаконструкций из полимерных композиционных материалов // Авиационно-космическая техника и технология. 2010. № 3 (70). С. 11–20.
30. Воробей В.В., Маркин В.Б. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций: монография. Новосибирск: Наука, 2006. 190 с.
31. Аунг Т.Х. Анализ дефектов в изделиях из полимерных материалов и восстановление их несущей способности методом сварки: дис. ... канд. техн. наук. М.: МАТИ – РГТУ имени К.Э. Циолковского, 2014. 197 с.
32. Неразрушающий контроль: справочник в 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2004. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. 864 с.
33. Adams R.D., Cawley P. A review of defect types and nondestructive testing techniques for composites and bonded joints // NDT International. 1988. Vol. 21. No. 4. P. 208–222.
34. Cawley P., Adams R. Defect types and NDT for composites and bonded joints // Materials Science and Technology. 1989. Vol. 5. P. 406–447.
35. Mehdikhani M., Gorbatiikh L., Verpoest I., Lomov S.V. Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance // Journal of Composite Materials. 2018. Vol. 53. Is. 12. P. 1–91. DOI: 10.1177/0021998318772152.
36. Баурова Н.И., Зорин В.А. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учеб. пособие. М.: МАДИ, 2016. 264 с.

37. Crowley D.M., Ward C., Potter K. A Status of Acceptance Criteria and Process Requirements in Advanced Composites Manufacturing, and Whether They are Fit for Purpose. Bristol: SAE International, 2013. 10 p. DOI: 10.4271/2013-01-2144.
38. Potter K. Understanding the origins of defects and variability in composites manufacture // ICCM-17. Edinburgh, July 27–31, 2009. URL: http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM17_proceedings/papers/P1.5%20Potter.pdf (дата обращения: 26.09.2022).
39. Чертищев В.Ю. Разработка технологий и средств акустического импедансного контроля многослойных сотовых конструкций из полимерных композиционных материалов: дис. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 180 с.
40. Bossi R.H., Giurgiutiu V. Nondestructive testing of damage in aerospace composites // *Polymer Composites in the Aerospace Industry*. Elsevier Ltd., 2015. P. 413–448. DOI: 10.1016/B978-0-85709-523-7.00015-3.
41. Unnthorsson R., Jonsson M.T., Runarsson T.P. NDT methods for evaluating carbon fiber composites // *Proc. Composites Testing and Model Identification*. Bristol, 2004. P. 21–23.
42. Косарина Е.И., Крупнина О.А., Демидов А.А., Михайлова Н.А. Цифровое оптическое изображение и его зависимость от радиационного изображения при неразрушающем контроле методом цифровой рентгенографии // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1 (54). С. 37–42. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-37-42.
43. Славин А.В., Далин М.А., Диков И.А., Бойчук А.С., Чертищев В.Ю. Современные тенденции развития акустических методов неразрушающего контроля в авиационной отрасли (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 12 (106). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.09.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-96-106.
44. Vavilov V.P., Chulkov A.O., Nesteruk D.A., Plesovskikh A.V. A complex approach to the development of the method and equipment for thermal nondestructive testing of CFRP cylindrical parts // *Composites. Part B: Engineering*. 2015. Vol. 68. P. 375–384. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.09.007.

References

1. *History of aviation materials science. VIAM – 75 years of search, creativity, discoveries*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: Nauka, 2007, 343 p.
2. Kablov E.N. Materials of the new generation – the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
3. Tkachuk A.I., Donetsky K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 03. Available at: <https://journal.viam.ru> (accessed: September 26, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
4. Gunyaeva A.G., Sidorina A.I., Kurnosov A.O., Klimenko O.N. Polymeric composite materials of new generation on the basis of binder VSE-1212 and the filling agents alternative to ones of Porcher Ind. and Toho Tenax. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2018, no. 3 (52), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
5. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
6. Murashov V.V. Control and diagnostics of multilayer structures made of polymeric composite materials by acoustic methods: monograph. Moscow: Spektr, 2016, 244 p.
7. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
8. State Standard 15467–79. *Product quality management. Basic concepts. Terms and Definitions*. Moscow: Standartinform, 2009, 25 p.
9. State Standard 32794–2014. *Polymer composites. Terms and Definitions*. Moscow: Standartinform, 2015, 98 p.
10. State Standard R 56787–2015. *Polymer composites. Unbrakable control*. Moscow: Standartinform, 2016, 71 p.
11. ASTM E2533-09. *Standard Guide for Nondestructive Testing of Polymer Matrix Composites Used in Aerospace Applications*. ASTM International, 2009, 47 p.

12. State Standard R 56975–2016. *Polymer composites. Indicators of the appearance of products from multilayer glass composites*. Moscow: Standartinform, 2016, 35 p.
13. ASTM D2563-08. *Standard Practice for Classifying Visual Defects in Glass-Reinforced Plastic Laminate Parts*. ASTM International, 2008, 24 p.
14. SAE ARP5089. *Composite Repair NTD/NDI Handbook*. SAE International, 2011, 98 p. DOI: 10.4271/ARP5089.
15. ASTM D3878-07. *Standard Terminology for Composite Materials*. ASTM International, 2007, 5 p.
16. Murashov V.V., Rumyantsev A.F. Defects in monolithic parts and multilayer structures made of polymer composite materials and methods for their detection. Part 1. Defects in monolithic parts and multilayer structures made of polymer composite materials. *Kontrol. Diagnostika*, 2007, no. 4, pp. 23–32.
17. Murashov V.V., Rumyantsev A.F. Defects in monolithic parts and multilayer structures made of polymer composite materials and methods for their detection. Part 2. Methods for detecting defects in monolithic parts and multilayer structures made of polymer composite materials. *Kontrol. Diagnostika*, 2007, no. 5, pp. 31–42.
18. Kartashova E.D., Muizemnek A.Yu. Technological defects of polymeric layered composite materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 2 (42), pp. 79–89. DOI: 10.21685/2072-3059-2017-2-7.
19. Kulikov V.V., Petrova A.P. Analysis of types of defects in adhesive joints of aviation equipment and their repair. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2011, no. 5, pp. 24–27.
20. Features of non-destructive testing of composite materials by low-frequency acoustic methods. *Control. Measurement. Diagnostics*. Available at: <http://defectoscop.ru/page19.html> (дата обращения: 26.09.2022).
21. Azmah Hanim M.A., Brabazon D., Hashmi M.S.J. Cracks, microcracks, and fracture toughness of polymer composites: formation, testing method, nondestructive detection, and modifications. *Failure Analysis in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*. Woodhead Publishing, 2019, pp. 157–180. DOI: 10.1016/B978-0-08-102293-1.00008-5.
22. Ivanov V.I., Belov P.A., Nasibullin T.S. Defects in composite materials as a source of acoustic emission. *Znanie*, 2016, no. 3–2 (32), pp. 23–29.
23. Smith R.A. *Use of 3D ultrasound data sets to map the localised properties of fibre-reinforced composites*: PhD thesis. University of Nottingham, 2010. Available at: <http://eprints.nottingham.ac.uk/31253/1/Full%20Thesis%20Chapters%20%282%29.pdf> (accessed: September 26, 2022).
24. Rivin G.L. *Repair of structures made of polymer composite materials for aircraft*: textbook. Ulyanovsk: UIGTU, 2000, 75 p.
25. Saboktakin A. 3D textile preforms and composites for aircraft structures: a review. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 2019, vol. 6, is. 1, art. 2. pp. 1–41. DOI: 10.15394/ijaaa.2019.1299.
26. Katunin A., Dragan K., Dziendzikowski M. Damage identification in aircraft composite structures: A case study using various non-destructive testing techniques. *Composite Structures*, 2015, vol. 127, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.02.080.
27. *Practical Applications «New» NDT Techniques on Composite Material in the Aerospace Industry*. 2014. Available at: http://ndt.aero/images/Presentation_26_Nov_2014.pdf (accessed: September 26, 2022).
28. Ning W. *Structural Health Condition Monitoring of Carbon-Fibre Based Composite Materials Using Acoustic Emission Techniques*: Thesis M. Sc. University of Birmingham, 2015. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/33528371.pdf> (accessed: September 26, 2022).
29. Gaidachuk A.V., Kondratiev A.V., Omelchenko E.V. Analysis of technological defects arising in the serial production of integral aircraft structures from polymer composite materials. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2010, no. 3 (70), pp. 11–20.
30. Vorobey V.V., Markin V.B. *Quality control of manufacturing and repair technology of composite structures*. Novosibirsk: Nauka, 2006, 190 p.
31. Aung T.H. *Analysis of defects in products made of polymeric materials and restoration of their bearing capacity by welding*: Cand. Sc. (Tech.). Moscow: MATI – RGTU named after K.E. Tsiolkovsky, 2014, 197 p.

32. *Non-destructive testing*: a reference book in 7 vols. Ed. V.V. Klyuev. Moscow: Mashinostroenie, 2004, vol. 3: Ultrasonic testing, 864 p.
33. Adams R.D., Cawley P. A review of defect types and nondestructive testing techniques for composites and bonded joints. *NDT International*, 1988, vol. 21, no. 4, pp. 208–222.
34. Cawley P., Adams R. Defect types and NDT for composites and bonded joints. *Materials Science and Technology*, 1989, vol. 5, pp. 406–447.
35. Mehdikhani M., Gorbatiikh L., Verpoest I., Lomov S.V. Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance. *Journal of Composite Materials*, 2018, vol. 53, is. 12, pp. 1–91. DOI: 10.1177/0021998318772152.
36. Baurova N.I., Zorin V.A. *The use of polymer composite materials in the production and repair of machines*: textbook. Moscow: MADI, 2016, 264 p.
37. Crowley D.M., Ward C., Potter K. *A Status of Acceptance Criteria and Process Requirements in Advanced Composites Manufacturing, and Whether They are Fit for Purpose*. Bristol: SAE International, 2013, 10 p. DOI: 10.4271/2013-01-2144.
38. Potter K. *Understanding the origins of defects and variability in composites manufacture*. ICCM-17. Edinburgh, 2009. Available at: <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM17proceedings/papers/P1.5%20Potter.pdf> (дата обращения: 26.09.2022).
39. Chertishchev V.Yu. *Development of Technologies and Means of Acoustic Impedance Control of Multilayer Honeycomb Structures from Polymer Composite Materials*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow: Bauman MSTU, 2020, 180 p.
40. Bossi R.H., Giurgiutiu V. Nondestructive testing of damage in aerospace composites. *Polymer Composites in the Aerospace Industry*. Elsevier Ltd., 2015, pp. 413–448. DOI: 10.1016/B978-0-85709-523-7.00015-3.
41. Unnthorsson R., Jonsson M.T., Runarsson T.P. NDT methods for evaluating carbon fiber composites. *Proceedings Composites Testing and Model Identification*. Bristol, 2004, pp. 21–23.
42. Kosarina E.I., Krupnina O.A., Demidov A.A., Mikhaylova N.A. Digital optical pattern and its dependence on the radiation image at non-destructive testing by method of digital radiography. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 37–42. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-37-42.
43. Slavin A.V., Dalin M.A., Dikov I.A., Boychuk A.S., Chertishchev V.Yu. Current trends in development of acoustic non-destructive testing methods in aviation industry (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 12 (106), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 26, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-96-106.
44. Vavilov V.P., Chulkov A.O., Nesteruk D.A., Plesovskikh A.V. A complex approach to the development of the method and equipment for thermal nondestructive testing of CFRP cylindrical parts. *Composites. Part B: Engineering*, 2015, vol. 68, pp. 375–384. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.09.007.

Информация об авторах

Диков Иван Алексеевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Яковлева Светлана Ивановна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бойчук Александр Сергеевич, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Чертищев Василий Юрьевич, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ivan A. Dikov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Svetlana I. Yakovleva, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander S. Boychuk, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vasilii Yu. Chertishchev, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 20.10.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 28.10.2022.

The article was submitted 06.10.2022; approved and accepted for publication after reviewing 28.10.2022.