Вісник Одеського національного морського університету № 2 (48), 2016

УДК 629.7.067

А.В. Андреев, А.С. Бычков, А.В. Кондратьев

ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ТРАНСПОРТНОЙ КАТЕГОРИИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. ЧАСТЬ 2. АНАЛИЗ ВИДОВ, ХАРАКТЕРА И ЧАСТОТЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Проведен углубленный анализ эксплуатационной несущей способности конструкций отечественных и зарубежных воздушных судов из полимерных композиционных материалов (ПКМ).

Установлены виды и характер повреждений, их частоты появления и взаимосвязи с технологическими дефектами, возникающими в процессе производства. Предложен продуктивный подход сохранения эксплуатационной несущей способности и живучести композитных конструкций в течение регламентированного срока их эксплуатации.

Ключевые слова: эксплуатационная несущая способность, воздушные суда транспортной категории, конструкции из полимерных композиционных материалов, виды и характер эксплуатационных повреждений.

Проведено поглиблений аналіз експлуатаційної несучої здатності конструкцій вітчизняних і зарубіжних повітряних суден з полімерних композиційних матеріалів (ПКМ).

Встановлено види і характер пошкоджень, їх частоти появи і взаємозв'язку з технологічними дефектами, що виникають в процесі виробництва. Запропоновано продуктивний підхід збереження експлуатаційної несучої здатності і живучості композитних конструкцій протягом регламентованого терміну їх експлуатації.

Ключові слова: експлуатаційна несуча здатність, повітряні судна транспортної категорії, конструкції з полімерних композиційних матеріалів, види і характер експлуатаційних пошкоджень.

A general formulation of the problem of preserving the operational capacity of the carrier structures of domestic and foreign aircraft from polymeric composite materials.

An in-depth analysis of the carrying capacity of the operational structures of domestic and foreign aircraft from polymeric composite materials

The types and nature of the injuries, their frequency of the appearance, and the relationship with technological defects occurring in the manufacturing process. Productive approach is proposed for continued serviceability and survivability of the carrying capacity of composite structures for regulated their lifetime.

[©] Андреев А.В., Бычков А.С., Кондратьев А.В., 2016

Вісник Одеського національного морського університету № 2 (48), 2016

Keywords: operational bearing capacity, WHO stuffy courttransport category designs from polymeric composite materials, type and nature of the operation in damage.

В [1] сформулирована общая **постановка проблемы** сохранения эксплуатационной несущей способности конструкций отечественных и зарубежных воздушных судов транспортной категории из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Показано, что во всем мире имеет место непрерывное увеличение объема применения и степени ответственности агрегатов воздушных судов из ПКМ.

Были также установлены основные факторы потенциальной несущей способности этих агрегатов в эксплуатации. В [3; 5-7] отмечается принципиальная необходимость проведения анализа влияния основных факторов эксплуатационных повреждений и разрушения конструкций воздушных судов как из традиционных металлов, так и полимерных композитов с учетом их отличительных особенностей.

Целью статьи является углубленный анализ основных видов и причин разрушения конструкций из ПКМ на основе отечественного и зарубежного опыта их эксплуатации, проведенный ниже.

Изложение основного материала. В [4] приведены данные о частоте различных повреждений в самолетах $\Gamma\Pi$ «Антонов» в элементах конструкций из углепластика (см. рисунок 1).

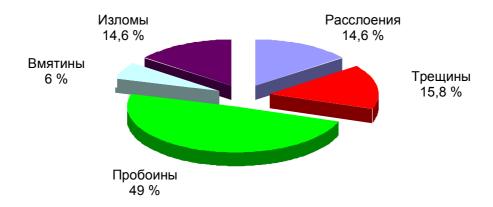


Рис. 1. Частота возникновения различных повреждений в элементах из углепластика

В [2] приведены статистические сводки эксплуатационных повреждений в обтекателях и законцовках килей, а также других элементов конструкции воздушных судов Ан-24, Ан-26, Ан-30 и Ан-32 (см. таблицы 1 и 2).

Вісник Одеського національного морського університету $N\!\!_{2}$ (48), 2016

Таблица 1

Повреждения обтекателей и законцовок килей

Номер	Наименование повреждения	Причина возникновения
1	Выветривание внешнего слоя	Абразивный износ
2	Расслоение между слоями стеклоткани	Удары
3	Расслоение сотового заполнителя	Удары
4	Трещины	Повреждения, усталость
5	Сквозные пробоины	Удары
6	Размягчение поверхности обтекателя	Удары

Таблица 2

Повреждения триммеров, элеронов, гребней, обтекателей рампы и стабилизаторов

Номер	Наименование повреждения	Причина возникновения
1	Разрушение задней кромки	Абразивный износ
2	Выветривание внешнего слоя	Абразивный износ
3	Пробои с усадкой заполнителя	Удары
4	Попадание влаги в заполнитель	Негерметичность внешнего слоя
5	Расслоение стеклоткани	Удары
6	Трещины	Повреждения, усталость

В квалификационной работе [11] эксплуатационные повреждения элементов конструкций из ПКМ российских самолетов Ил-86 и Ту-204 и проводится анализ причин их возникновения. На диаграмме рисунка 2, составленной по результатам осмотра на самолетах Ил-86, видно, что основную массу дефектов несут на себе закрылки 61 % (внутренние и внешние по 27 % и 34 % соответственно).

По результатам контрольно-восстановительных работ при выполнении технического осмотра на самолете Ил-86 на сотовых конструкциях были обнаружены следующие типовые дефекты: отслоения, вмятины и пробоины, а также вода в сотах и течи. Аналогичные данные приведены по дефектам самолета Ту-204. Экспериментально получены также усталостные кривые образцов материалов и элементов конструкций, позволяющие определить величину остаточного ресурса элементов авиационной техники из ПКМ.

В [13] анализируется влияние дефектов деталей и многослойных конструкций из ПКМ на эксплуатационную несущую способность воздушных судов транспортной категории. Отмечается, что в связи с интенсивным расширением использования в основной силовой конструкции самолета ПКМ случайные эксплуатационные повреждения стали предметом повышенного внимания специалистов.



Рис. 2. Распределение дефектов элементов самолетов Ил-86 из ПКМ

То, что для металлических конструкций представлялось очевидным и потому безопасным, для конструкций из ПКМ является одной из основных задач при обеспечении их прочности и эффективности, и решение этой задачи далеко не очевидно.

Чувствительность (т.е. снижение характеристик прочности) конструкций из ПКМ к характерным для эксплуатации ударным воздействиям при снижающей контролепригодности, высокой жесткости и технологически сложно выполняемый ремонт поврежденной конструкции стали основными проблемами, угрожающими безопасности, надежности и экономической эффективности эксплуатации воздушных судов, основные силовые элементы которых выполнены из ПКМ.

При создании конструкций из ПКМ проведение системных исследований эксплуатационной повреждаемости необходимо как для обеспечения соответствия нормативным требованиям при сертификации, так и для обеспечения дальнейшей эффективной эксплуатации.

В рекомендательном Циркуляре FAAAC 20-107В «Авиаконструкции из композиционных материалов» [16] проблеме эксплуатационных ударных воздействий уделено значительное внимание.

Этот Циркуляр является средством демонстрации соответствия требованиям Авиационных правил (АП) части 23, 25, 27, и 29 к летной годности при сертификации типа авиаконструкций из ПКМ.

В нем содержатся подробные рекомендации по методологии учета влияния вероятных случайных повреждений ударного характера при проведении работ по обеспечению прочности силовых конструкций из ПКМ. В соответствии с указаниями Циркуляра и сложившейся методологией статические и усталостные испытания должна проходить конструкция, предварительно подвергнутая ударам, моделирующим вероятные ударные воздействия на конструкцию в эксплуатации.

Нормированных требований по величине (энергии) таких ударов, их характеру и местам нанесения на сегодняшний день не существует. Основой для проведения такого анализа могут являться систематизированные и обработанные по специальным алгоритмам данные о случайных эксплуатационных механических повреждениях, полученных на парке эксплуатирующихся металлических воздушных судов.

В [15] приведены результаты исследований за период 2000-2012 г. парков самолетов Ту-134, Ту-154, Як-40, Як-42, Ан-24, Ан-26, Ил-76, Ил-86, Ил-96 и других, эксплуатируемых в России.

Приводимые ниже данные иллюстрируют (см. рисунки 3-9) часть оценок, полученных на первом этапе исследований.

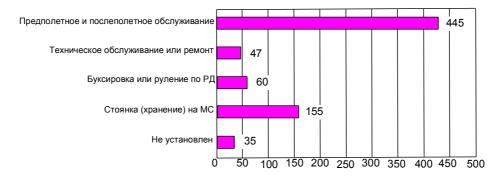


Рис. 3. Распределение инцидентов по этапам наземного обслуживания

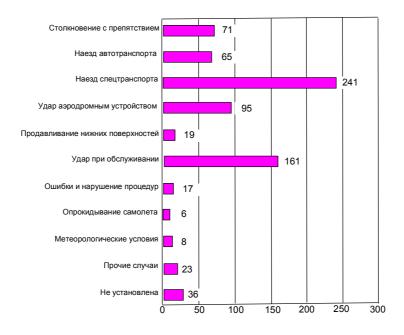


Рис. 4. Распределение инцидентов по видам и источникам

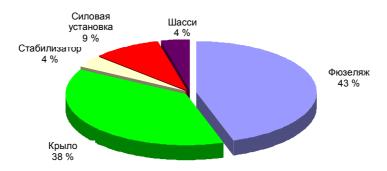


Рис. 5. Распределение повреждений по агрегатам (1258 повреждений)

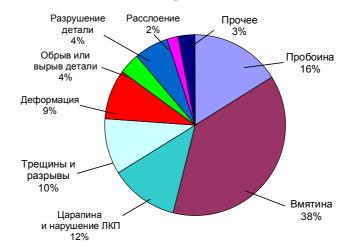


Рис. 6. Распределение повреждений по типам (826 повреждений)

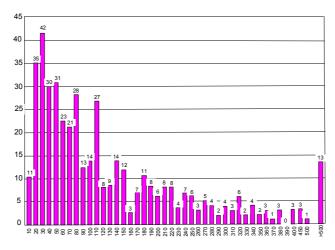


Рис. 7. Распределение повреждений по характерному размеру (438 повреждений)

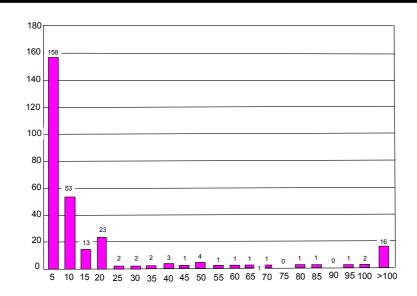


Рис. 8. Распределение вмятин обшивки по глубине (296 вмятин)

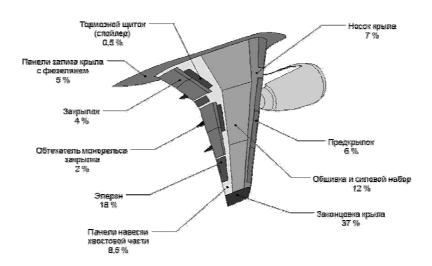


Рис. 9. Распределение повреждений по элементам крыла

Эти исследования проводятся в настоящее время совместно специалистами ГосНИИ ГАиЦАГИ.

Результаты этих исследований должны позволить:

- на основе анализа опыта эксплуатации и технического обслуживания парков отечественных и (отчасти) эксплуатирующихся в РФ самолетов иностранного производства систематизировать данные о случайных эксплуатационных повреждениях их конструкции и источниках их возникновения;

Вісник

Одеського національного морського університету № 2 (48), 2016

- разработать рекомендации по снижению повреждаемости BC в эксплуатации от дискретных источников;
- разработать и ввести в практику проектирования и сертификации отсутствующие сейчас критерии безопасности конструкции от случайных эксплуатационных повреждений;
- в обеспечение работ по созданию отечественных конструкций из ПКМ (прежде всего, композитного крыла коммерческого самолёта) определить зонирование, характер и интенсивность ударных воздействий, стойкость к которым должна обеспечить безопасность конструкции по условиям прочности и возможность эффективной и коммерчески выгодной эксплуатации самолетов.

Следует отметить предварительный характер полученных на первом этапе оценок, так как они охватывают ограниченный сегмент надежно выявляемых и в обязательном порядке регистрируемых повреждений при инцидентах. Дополненные широким спектром повреждений, выявляемых при техническом обслуживании, ремонтах и целевых исследованиях технического состояния, эти данные должны стать основой для решения сформулированных выше задач.

В [13] рассмотрены дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из ПКМ, возникающие в процессе их изготовления, классифицированные авторами на 7 групп по степени их опасности. В приведенных таблицах для каждой группы указаны вид дефекта, его визуализация, количественные и качественные показатели и причины образования. Дефекты ПКМ, возникающие в процессе производства композитных конструкций, исследовались и классифицировались в [8; 9], а затем получили углубленное развитие в многоуровневых классификациях [10; 12]. Рассмотренные в [8; 9; 12; 13] дефекты технологического происхождения в большинстве своем отражаются на снижении эксплуатационной несущей способности композитных конструкций воздушных судов, интегрируясь с их повреждениями, возникающими непосредственно в эксплуатации.

В работе [13] также приведены фотографии шлифов деталей из углепластика (КМУ) канала воздуховода самолета, демонстрирующие дефекты различных классификационных групп (см. рисунок 10).

Характерными дефектами деталей из ПКМ и клееных конструкций, возникающими при эксплуатации изделий авиационной техники, являются [13]: царапины (сквозное и несквозное щелевое нарушение обшивки); расслоение обшивок из ПКМ, вмятины, одно- и двухсторонние пробоины в сотовых агрегатах, сквозные проколы до 4 мм; трещины и отслоения обшивок (в зонах: обшивка-соты, каркас-соты, обшивка-накладки); накопление влаги.

В [13] также отмечается, что усталостные разрушения структуры материала приводят к потере прочности на сжатие при статической нагрузке. Четко видимое ударное разрушение может снизить прочность на 80 %, едва видимое – на 65 %.

Вісник Одеського національного морського університету $N\!\!_{2}$ (48), 2016

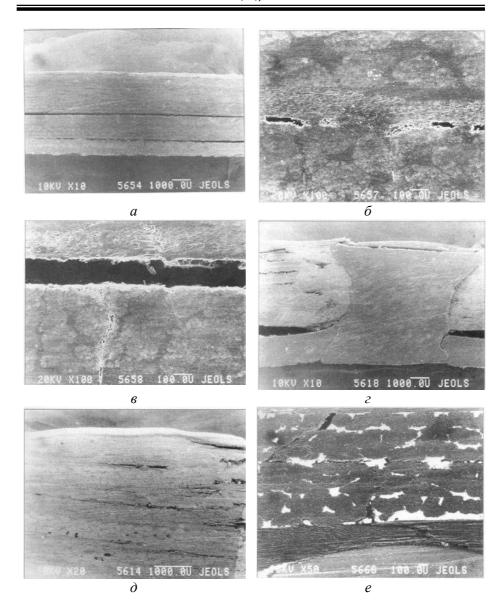


Рис. 10. Шлифы деталей из КМУ с различными видами дефектов: а — расслоение вблизи зоны заклепочного соединения в клепаной конструкции из углепластика. Кольцевые слои вдоль шлифов. Общий вид; б — прерывистость расслоения углепластика; в — расслоение между кольцевыми и продольными слоями углепластика с трещиной поперек слоев; г — расслоение углепластика в зоне заклепочного соединения; д — расслоения с малым раскрытием в слое углепластика; е — трещина под заклепкой. Заклепка в нижней части снимка

Вісник

Одеського національного морського університету № 2 (48), 2016

Пористость ухудшает характеристики связующего. Пористость в $1\,\%$ снижает прочность на $5\,\%$, а усталостную долговечность — на $50\,\%$. Поверхностные надрезы и другие повреждения поверхности конструкции из ПКМ могут привести к местным расслоениям в зоне повреждения и снижению статической прочности от $0\,$ до $50\,$ % зависимости от места этого повреждения. Волнистость слоев также обусловливает снижение прочности. Так, при волнистости слоя $0\,$ ° в перекрестно армированных ПКМ прочность снижается от $10\,$ до $25\,$ % в зависимости от степени волнистости этого слоя. Увеличенная выдержка при формовании деталей из ПКМ (при излишне продолжительной полимеризации) приводит к образованию трещин в матрице, расслоению материала, нарушениям в зоне соединения волокна и матрицы, снижению прочности при температуре стеклования [13].

Резюмируя исследуемые в [8-10; 12; 13] технологические дефекты композитных конструкций следует отметить, что возможны:

- зоны отсутствия соединения между элементами конструкции (непроклеи), обусловленные плохой подгонкой соединяемых элементов перед склеиванием или недостаточным давлением, создаваемой технологической оснасткой;
- слабая адгезия недостаточное сцепление клея с материалом соединяемого элемента из-за плохой подготовки поверхностей соединяемых элементов, замасливания или загрязнения склеиваемых поверхностей;
- неполная полимеризация клея, обусловленная отклонениями от температурно-временного режима при отверждении клея и являющаяся грубым нарушением технологического режима;
- ослабление прочности соединения вследствие пористости клея, обусловленное неполным удалением из него растворителя, а также недостаточным давлением при запрессовке;
- накопление повреждений в клеевом шве при усталостном нагружении, снижающих его прочность;
- ударные разрушения клеевого шва в результате соударения с твердыми предметами.

Кроме того, в сотовых конструкциях возможно также наличие зон разрушения сотового заполнителя или пустот, обусловленное смещением сотовых блоков.

Наиболее характерные дефекты, которые встречаются в многослойных конструкциях и изделиях из ПКМ после их изготовления, могут быть следующих видов:

- непроклеи в слоистых, сотовых и других клееных конструкциях с заполнителем:
- расслоения в склеиваемых деталях и обшивках сотовых и интегральных конструкций из ПКМ;
 - инородные включения в слоистых и сотовых конструкциях;
 - подмятие сотового заполнителя (потеря устойчивости).

Завершая анализ публикаций, посвященных исследованиям эксплуатационной несущей способности конструкций воздушных судов из ПКМ, необходимо отметить еще один важный аспект – их эксплуатационную живучесть.

В [14] обсуждается подход к созданию безопасных конструкций из ПКМ, основанный на сочетании вероятностных методов и конструктивно-технологических средств обеспечения эксплуатационной живучести, позволяющей обеспечить высокую безопасность конструкции и весовую эффективность. Предлагаются основные направления повышения весовой и экономической эффективности агрегатов воздушных судов из ПКМ и их эксплуатационных характеристик живучести. Предложены также критериальные рекомендации выбора материалов по уровню повреждаемости, методам ремонта в эксплуатации, качеству технологических процессов по дефектности, ограничениям по габаритам изделия, объемам серии и производительности.

Отмечается, что весовая и экономическая эффективность изделий из ПКМ с регламентированным уровнем безопасности и надежности зависит от уровня допускаемых максимальных эксплуатационных напряжений σ_{max}° , определяющих массу конструкции G, а также затрат на обнаружение технологических дефектов и эксплуатационных повреждений C_{ded} (см. рисунок 11).

На рисунке 12 показан характер изменения массы, стоимости и трудоемкости обслуживания авиаконструкций из ПКМ с увеличением относительной величины допускаемых напряжений, а на рисунке 13 – общая схема решения задачи конструктивно-технологического обеспечения живучести и безопасности авиаконструкций из ПКМ [14].



Рис. 11. Общая схема повышения эффективности применения ПКМ

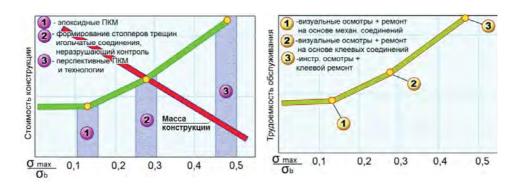


Рис. 12. Характер изменения массы, стоимости и трудоемкости обслуживания авиаконструкций из ПКМ с увеличением относительной величины допускаемых напряжений



Рис. 13. Общая схема решения задачи конструктивно-технологического обеспечения живучести и безопасности авиаконструкций из ПКМ

Выводы

- 1. Проведен углубленный анализ доступной информации по отечественным и зарубежным воздушным судам видов и характера эксплуатационных повреждений, их частоты проявления и взаимосвязи с технологическими дефектами, возникающими в процессе производства этих изделий.
- 2. Из проведенного анализа установлено, что в значительной степени эксплуатационные повреждения являются прямым или косвенным следствием технологических дефектов.

Вісник Одеського національного морського університету N 2 (48), 2016

3. Представляется продуктивным с учетом результатов уже проведенных исследований других авторов продолжить решение проблемы конструктивно-технологического обеспечения эксплуатационной несущей способности и живучести в особенности силовых высоконагруженных агрегатов воздушных судов из ПКМ в плане достижения максимальной весовой и экономической эффективности на основе определения условий возможности эксплуатации этих конструкций при наличии в них дефектов и повреждений в течение регламентированного срока службы в заданных условиях при выполнении ограничений по безопасности, надежности и эксплуатационной технологичности.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1. Андреев А.В. Эксплуатационная несущая способность конструкций отечественных и зарубежных воздушных судов транспортной категории из полимерных композиционных материалов. Ч. 1. Общая постановка проблемы [Текст] / А.С. Андреев, А.С. Бычков, А.В. Кондратьев // Вісник ОНМУ. Одеса: ОНМУ, 2016. Вип. 1(47).
- 2. Астанін В.В. Експлуатаційні пошкодження елементів конструкцій літальних апаратів із композиційних матеріалів і методи їх ремонту [Текст] / В.В. Астанін, О.В. Глоба, О.А. Шевченко // Технологические системы: Науч.-технич. журнал. К., 2011. № 4. С. 64-68.
- 3. Бычков А.С. О взаимосвязи юридически-правовой поддержки жизненного цикла воздушных судов и проблемы обеспечения безопасности их конструкций [Текст] / А.С. Бычков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов // Сб. научн. трудов. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Вып. 4(84). Х., 2015. С. 79-85.
- 4. Бычков С.А. Решение проблемы создания авиаконструкций из полимерных композиционных материалов на АНТК «Антонов» [Текст] / С.А. Бычков, В.Г. Бондарь, В.Н. Король // Авіаційно-космічна техніка і технологія: наук.-техн. журнал. Х.: ХАІ, 2003. Вип. 49 (5). С. 34-37.
- 5. Бычков А.С. Основные виды и причины разрушения стальных деталей агрегатов отечественных воздушных судов транспортной категории [Текст] / А.С. Бычков, А.Г. Моляр // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. научн. трудов. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». Х.: НАКУ «ХАИ», 2016. Вып. 1 (85). (В печати).

Одеського національного морського університету № 2 (48), 2016

- 6. Бычков А.С. Основные причины разрушения конструктивных элементов воздушных судов транспортной категории из алюминиевых сплавов [Текст] / А.С. Бычков, А.Г. Моляр, И.Р. Игнатович // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Сб. научн. трудов. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». Х.: НАКУ «ХАИ», 2015. Вып. 70. С. 136-151.
- 7. Бычков А.С. Эксплуатационная несущая способность деталей конструкций отечественных воздушных судов транспортной категории из титановых сплавов [Текст] / А.С. Бычков, А.Г. Моляр // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Сб. научн. трудов Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». Х.: НАКУ «ХАИ», 2016. Вып. 71. (В печати).
- 8. Гайдачук В.Е. О возможности регламентации технологических несовершенств в конструкциях из композиционных материалов [Текст] / В.Е. Гайдачук, Н.Б. Воронцов, А.И. Рукавишников // Прочность конструкций летательных аппаратов: темат. сб. науч. тр. Харьк. авиац. ин-та. Вып. 6. Х.: ХАИ, 1981. С. 124-129.
- 9. Технология производства летательных аппаратов из композиционных материалов [Текст] / В.Е. Гайдачук, В.Д. Гречка, В.Н. Кобрин, Г.А. Молодцов. — Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1989. — 332 с.
- Гайдачук А.В. Анализ технологических дефектов, возникающих в серийном производстве интегральных авиаконструкций из полимерных композиционных материалов [Текст] / А.В. Гайдачук, А.В. Кондратьев, Е.В. Омельченко // Авиационно-космическая техника и технология. 2010. Вып. 3 (70). С. 11-20.
- 11. Лебедев И.К. Эксплуатационная долговечность элементов авиаконструкций из композиционных материалов: дис...канд. техн. наук 05.22.14 / Лебедев Игорь Константинович. М., 2010. 212 с.
- 12. Мельников С.М. Многоуровневая классификация дефектов сотовых заполнителей из металлической фольги и вытекающие из нее задачи определения их полей допусков [Текст] / С.М. Мельников // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. научн. трудов Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Х.: ХАИ, 2005. Вып. 2 (41). С. 88-100.

Вісник Одеського національного морського університету № 2 (48), 2016

- 13. Мурашов В.В. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов. Ч.1. [Электронный ресурс] / В.В. Мурашов, А.Ф. Румянцев // Контроль. Диагностика. № 4. 2007. С. 1-17 / Режим доступа www.viam.ru/rublic.
- 14. Ушаков А.Е. Общая постановка и схема решения задачи обеспечения безопасности авиаконструкций из ПКМ с учетом их повреждаемости [Текст] / А.Е. Ушаков // Механика и машиностроение: Известия Самарского научного центра РАН. Т. 14. № 4(2). 2012. С. 339-347.
- 15. Фейгенбаум Ю.М. Влияние случайных эксплуатационных повреждений на прочность и ресурс конструкции воздушных судов [Текст] / Ю.М. Фейгенбаум, С.В. Дубинский // Научный вестник МГТУГА. № 187. 2013. С. 83-91.
- 16. Advisory Circular 20-107B, 8 September. 2009. P. 12.

Стаття надійшла до редакції 24.10.2016

Рецензенти:

доктор технічних наук, професор кафедри «Теоретична та прикладна механіка» Одеського національного морського університету **А.В. Гришин**

доктор технічних наук, професор, головний науковий співпрацівник Морського Інженерного Бюро, науковий консультант **В.В. Козляков**