

doi: 10.32620/oikit.2019.86.05

УДК 629.7.002:66.06

С.А. Бычков, А.В. Гайдачук*, А.В. Андреев, Wang Bo*

Развитие новых конструктивно-технологических решений крыльев самолета и ремонт композитных конструкций

*Государственное предприятие «АНТОНОВ» (Украина)
Технологический университет г. Нинбо (КНР)

Показано, что в комплексной проблеме перманентного повышения эффективности применения полимерных композиционных материалов в конструкциях воздушных судов транспортной категории важную роль играет рациональный выбор конструктивно-технологических решений их узлов и агрегатов, в значительной степени способствующих реализации высоких летно-технологических и экономических характеристик воздушных судов, конкурентоспособных на мировом рынке продаж и услуг. Проведен обзор и анализ развития новых крыльевых композитных структур, обсуждаемых на ежегодной международной выставке Sampe 2019 года по проекту NEWS, формируемом в соответствии со стратегией STELIA Aerospace R&T по разработке композитных технологий с высоким техническим и экономическим потенциалом. Приведено подробное описание экспериментального интегрального демонстратора отсека крыла, формируемого методом инфузии. Обсуждаются преимущества выбранной интегральной инфузионной технологии, включающей минимизацию этапов сборки, автоматизацию процесса, экономичный безавтоклавный процесс формования и ремонт композитных конструкций. Приведена информация представителей фирмы Airbus о ремонте композитных конструкций в процессе эксплуатации самолета при помощи портативного оборудования, обеспечивающего качественный режим отверждения углепластика. Описаны виды конструкционного ремонта. Отмечается, что конструкционный ремонт может быть выполнен посредством клеевой или закреплённой болтами накладок, сертифицированных в соответствии с EASA/FAA. Основными требованиями CS25.603 §8.8 является подтверждение анализом и/или тестом, что методы и техника ремонта восстановят конструкцию до летной годности. Обоснование ремонта производится анализом, подтвержденным испытаниями. Ремонт должен соответствовать тем же требованиям, что и первоначальная структура композита. Репрезентативные размеры повреждения проводятся в полномасштабном тесте (максимально допустимый размер повреждения). Испытательный образец в натуральную величину также включается в доказательную базу. Ремонт деталей из композиционных материалов требует чистой окружающей среды, для которой влажность, пыль и контроль температуры имеют решающее значение. Поэтому в рамках выставки были представлены различные конструкции портативных «чистых комнат», разработанные различными компаниями специально для выполнения ремонта авиационных конструкций.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, конструктивно-технологические решения крыльев воздушных судов, обзор и анализ материалов выставок Sampe, конструкционный ремонт повреждений.

Как показано в работах [1-2] полимерные композиционные материалы (ПКМ), в настоящее время широко применяемые в конструкциях агрегатов воздушных судов транспортной категории, обеспечивают ряд неоспоримых преимуществ перед металлами, повышая весовую отдачу воздушного судна (ВС), надежность и ресурс, а также экономические показатели.

Эти преимущества реализуются путем совершенствования конструктивно-технологических решений (КТР) агрегатов самолета [3-5].

Выбор рациональных КТР и метрологическое обеспечение их реализации в производстве является одним из эффективных способов и средств создания

воздушных судов транспортной категории, конкурентоспособных на мировом рынке продаж и услуг [5-6].

В связи с этим представляет большой интерес анализ развития новых КТР крыльевых структур из ПКМ, обсуждаемых в материалах ежегодных и международных конференций и выставок [3, 7] и др.

Ниже приведен анализ проекта News-New Evolution Wing Structures.

News – это проект в соответствии со стратегией STELIA Aerospace R&T по разработке композитных технологий с высоким потенциалом в технической и экономической областях.

STELIA Aerospace хочет усовершенствовать технологию LR1 (Liquid Resin Infusion) – инфузию путем изготовления демонстратора отсека крыла интегральной конструкции (рис. 1).

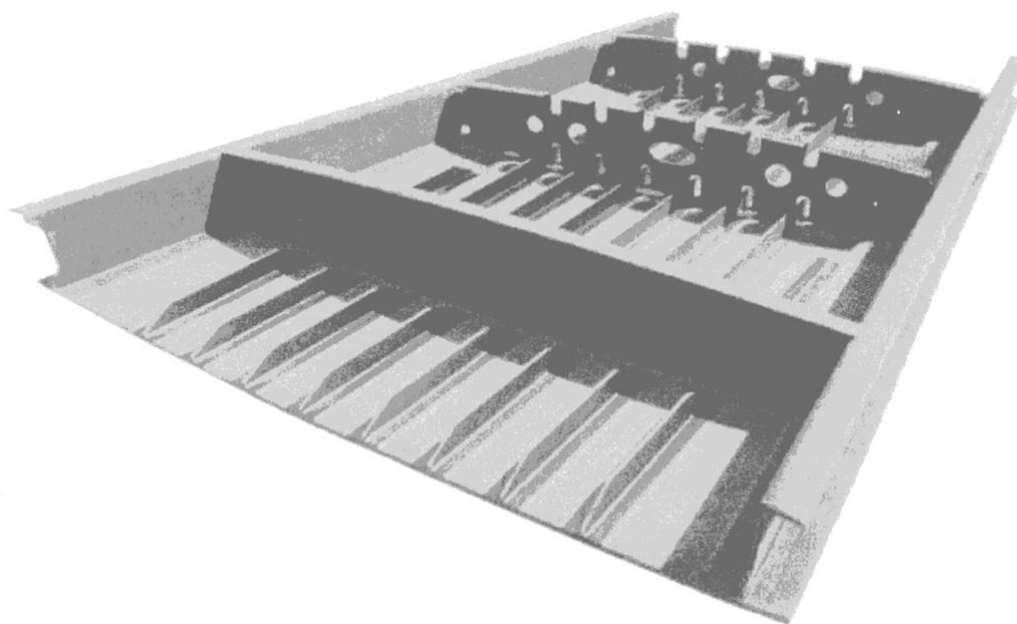


Рис. 1. Экспериментальный интегральный отсек крыла

Преимущества выбранной интегральной инфузионной технологии:

- минимизация этапов сборки и установки крепежа;
- автоматизация процесса (что обеспечивает высокое качество и надежность);
- безавтоклавный процесс (экономия средств).

Задачи, требующие решения:

- изготовление конструкций за один цикл: обшивка + стрингеры + лонжероны + нервюры);
- изготовление конструкций «в размер» (исключить операцию обрезки после отверждения);
- получение качественной поверхности.

Принцип проектирования и изготовления состоит в том, чтобы создать конструкцию крыла (рис. 2, поз. 3), состоящую из сборки только двух агрегатов (рис. 2, поз. 1 и 2)



Рис. 2. Схема отсека крыла

Изготовление основной интегральной части отсека крыла за один цикл предусматривает наличие следующих элементов (рис. 3):

- обшивка 4 с оптимизированной толщиной (например, усиление под лонжеронами, нервюрами и на участках соединений);
- стрингеры 5 с оптимизированной толщиной и полками для соединения с обшивкой (направление может быть продольным или параллельным к переднему или заднему лонжерону);
- лонжероны 6 с оптимизированной толщиной и полками для соединения;
- гермонервюры 7, которые создают изолированные области. Эти ребра в основном ориентированы перпендикулярно переднему или заднему лонжерону или параллельному фюзеляжу;
- типовые нервюры 8 могут иметь вырезы для установки систем, могут быть ориентированы как гермонервюры.

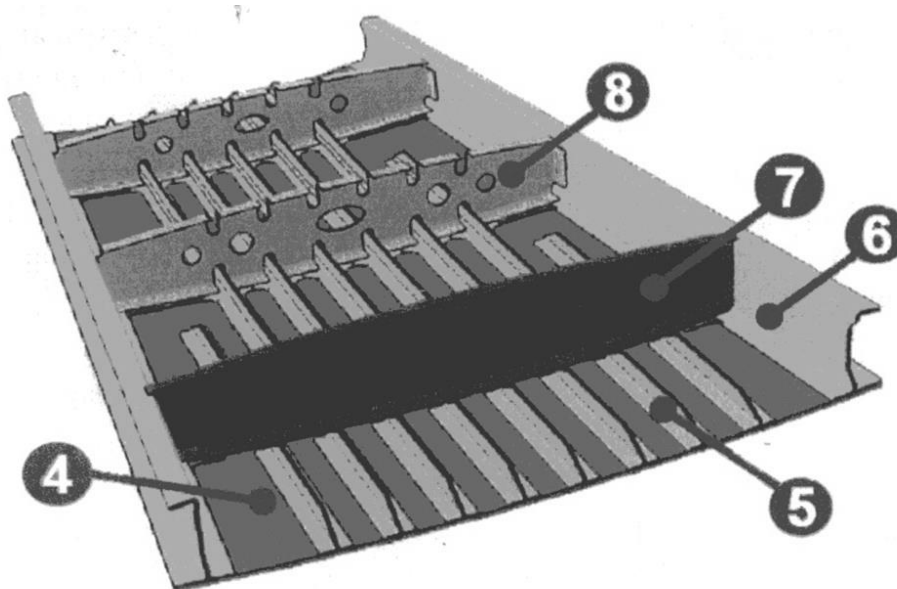


Рис. 3. Основная интегральная часть отсека крыла

Крышка крыльев (нижняя и верхняя) представляют собой интегральные монолитные подкрепленные конструкции (рис. 4).

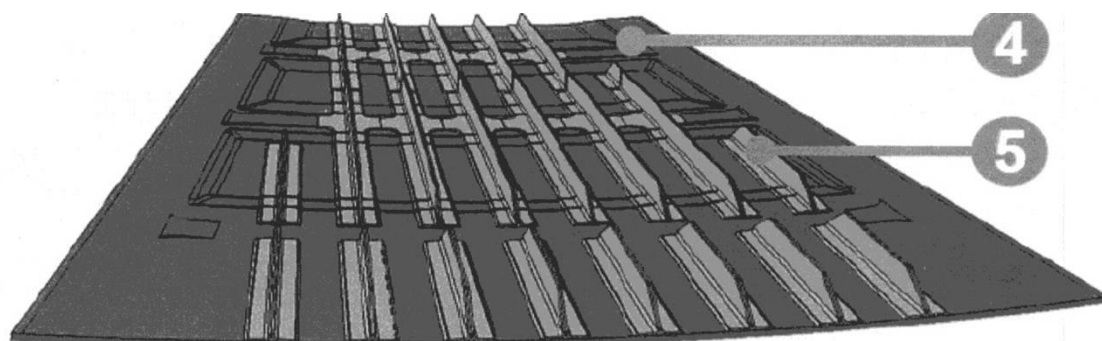


Рис. 4. Конструкция крышки крыла

Конструкция обшивки 4 включает в себя множество элементов для оптимизации механических свойств и минимизации веса.

Стрингеры 5 могут иметь различные формы сечений (табл. 1). Каждая геометрия имеет свои преимущества и недостатки:

Таблица 1

Формы сечений стрингеров крышки крыла

Форма сечения	Преимущества	Недостатки	Схемы
1	Самые простые в изготовлении	Более низкая оптимизация / влияние веса	
2	Наиболее актуально соотношение стоимость/проектирование/производство	Для изготовления 1 стрингера необходимо 2 преформы	
3	Обеспечивают лучшие механические свойства	Сложные в изготовлении. Отверстия для стрингера должны быть увеличены	

Лонжерон (рис. 3., поз. 6) интегрирован в обшивку крышки отсека крыла, как и стрингеры, может иметь различные формы поперечного сечения (J, I, C, Z,...).

J-образная форма была выбрана в проекте NEWS, потому что это единственная геометрия, которая сочетает в себе два основных преимущества:

- двойные отбортовки (Т-образная полка), чтобы максимизировать поверхность соединения между лонжероном и обшивкой, обеспечивая при этом лучшие механические свойства.

- так называемые свободная отбортовка (F-образная полка), расположена снаружи, чтобы не вставлять крепежные детали в коробку крыла, когда установлена вторая крышка.

С точки зрения производства, J-образный лонжерон представляет собой сборку «спина к спине» С-образной (61) и Z-образной (62) заготовок (рис. 5).

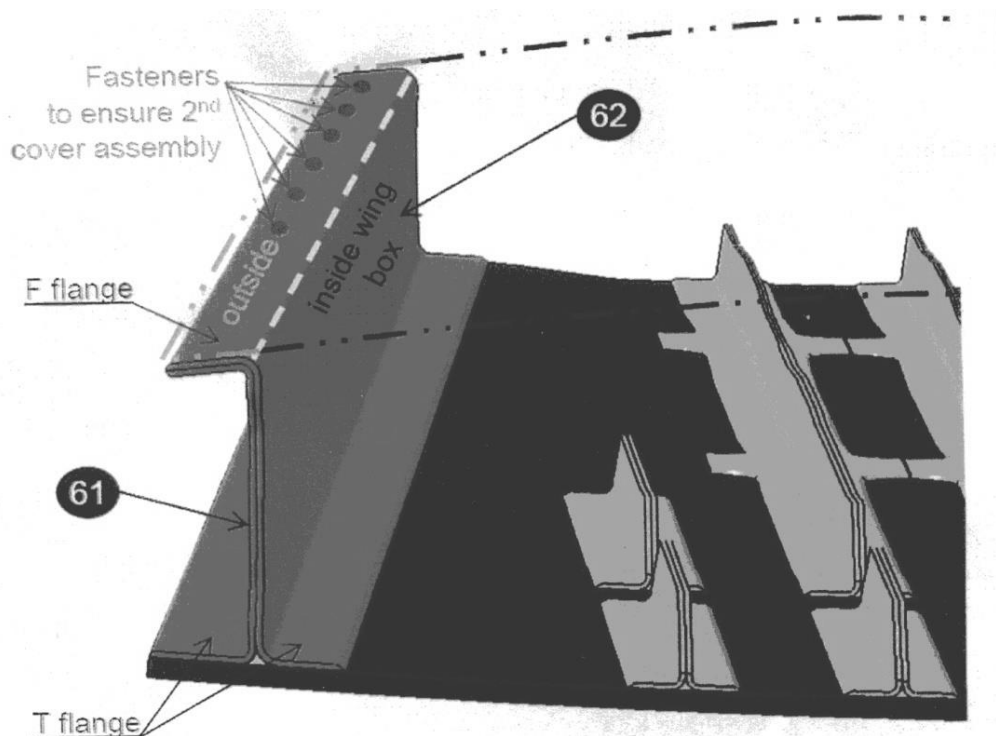


Рис. 5. J-образный лонжерон

Нервюры (рис. 3, поз. 7 и 8) интегрированные в обшивку крышки отсека крыла как и лонжероны могут иметь различные формы поперечного сечения.

Предпочтительной формой относительно стоимости производственного процесса и обеспечения достаточного механического поведения является С-образная форма (рис. 6).

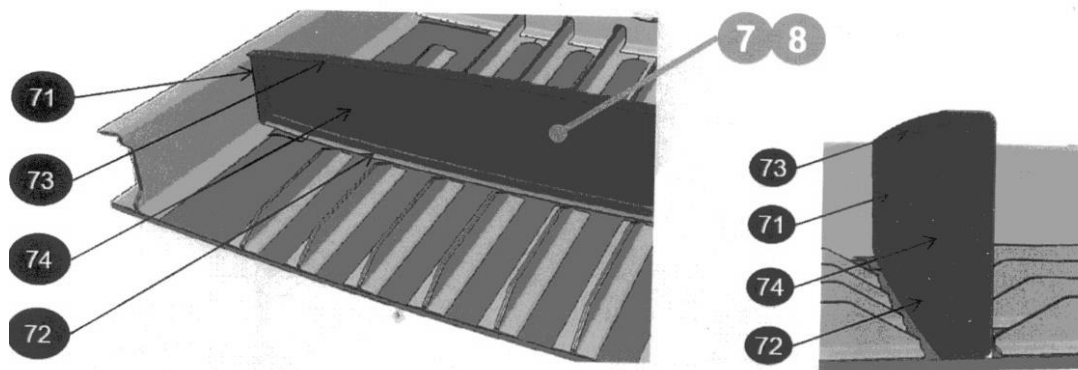


Рис. 6. С-образная нервюра

Нервюры имеют два вида внутренних соединений, которые должны быть интегрированы в отсек крыла:

- крепление полки нервюры (72) к обшивке крышки;
- крепление полки нервюры (71) к лонжерону;

Допуски на свободную отбортовку (полку) нервюры (73) должны быть плотными, чтобы облегчить установку второй крышки (с помощью крепежных элементов) и избежать или минимизировать операцию установки прокладки.

Гермонервюры устанавливаются с целью изолировать от жидкости и/или газа область крыла. В зоне установки гермонервюр стрингеры прерываются (рис. 7).

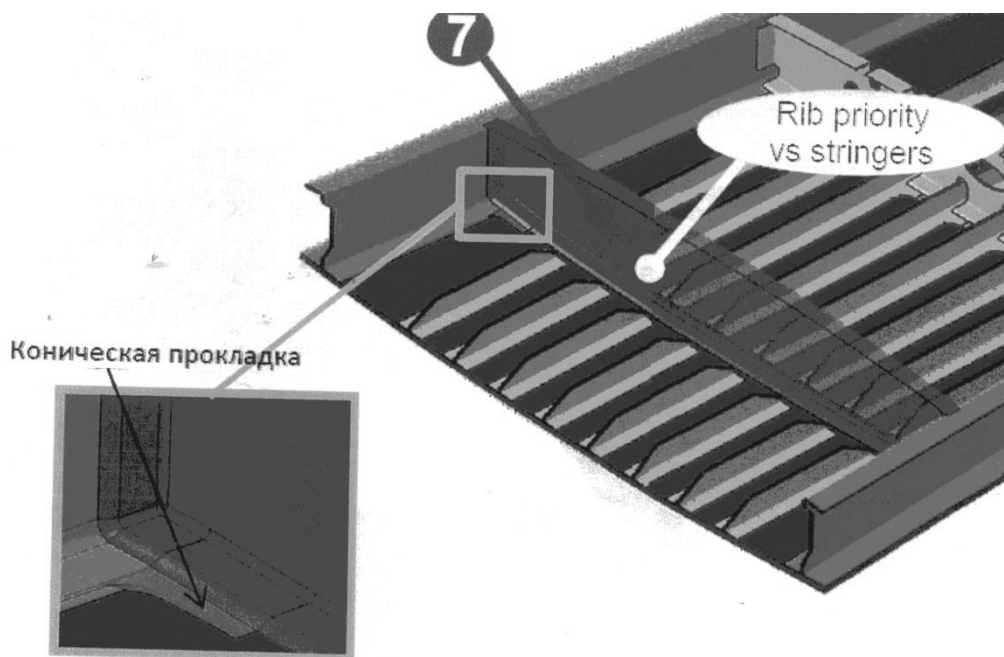


Рис. 7. Разрыв стрингеров в зоне установки гермонервюр

На рис. 8 показана последовательность процесса изготовления образца-демонстратора.



Рис. 8. Последовательность процесса изготовления образца-демонстратора

Ниже на рис. 9-13 более подробно показаны стадии процесса изготовления отсека крыла

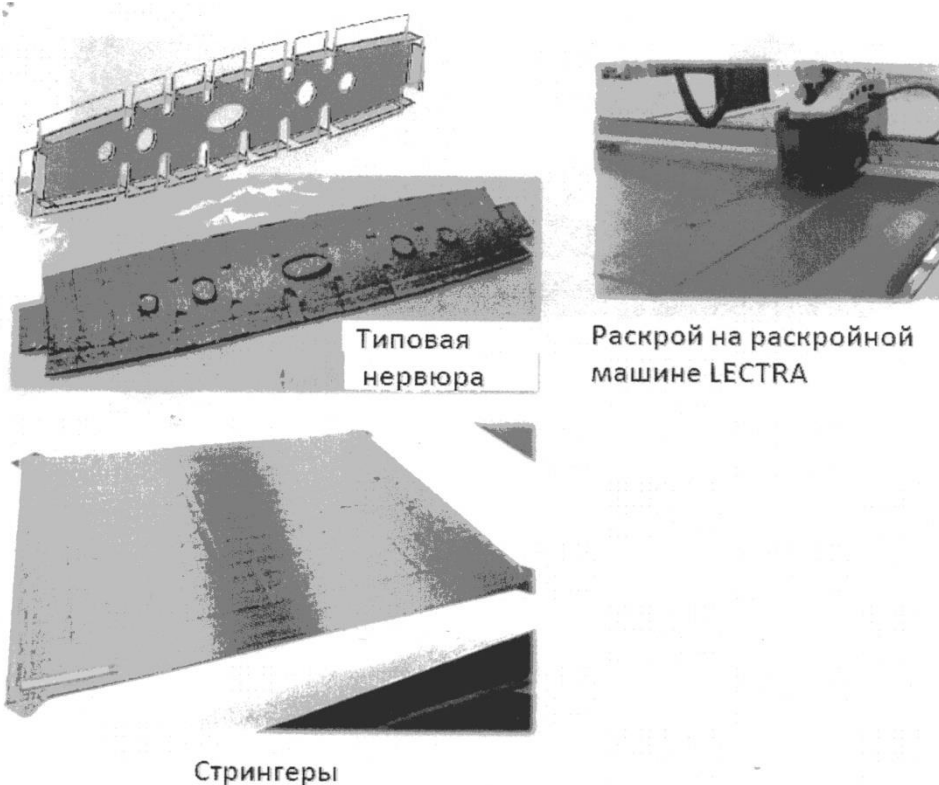


Рис. 9. Раскрой

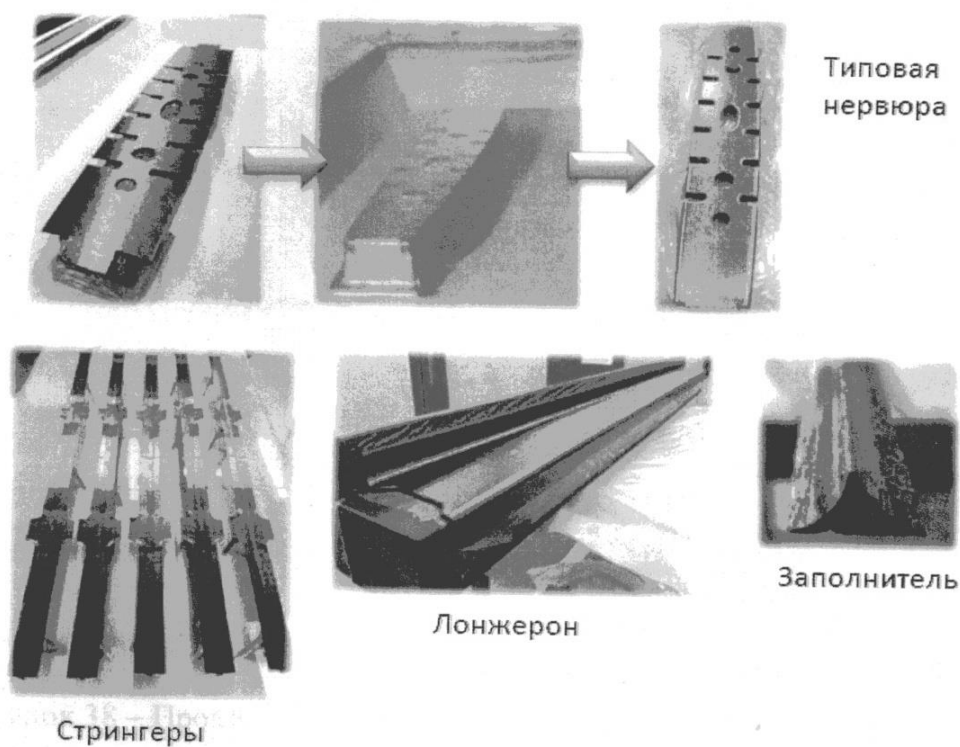
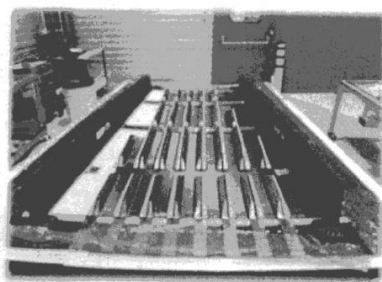
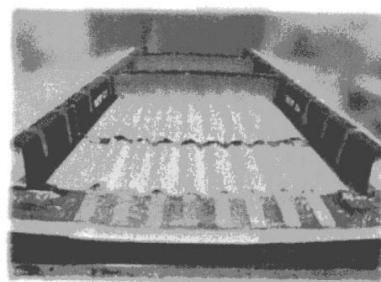


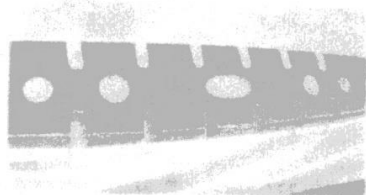
Рис. 10. Подформовка элементов силового набора



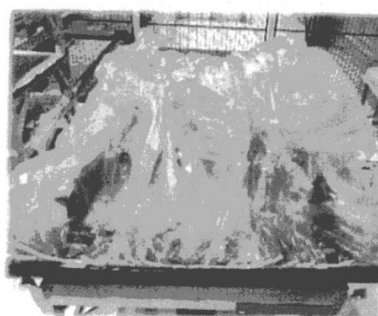
Сборка стрингеров и лонжеронов



Установка нервюр

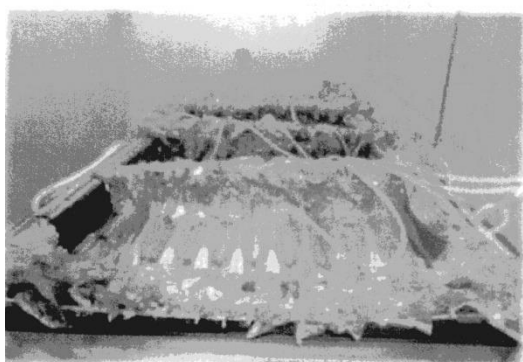


Типовая нервюра

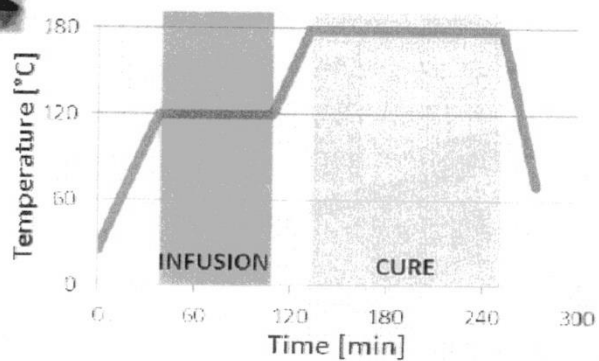


Вакуумный мешок

Рис. 11. Сборка обшивки верхней крышки с элементами силового набора



Инфузия



Режим отверждения RTM6

Рис. 12. Пропитка собранной конструкции связующим марки RTM6 фирмы Hexcel

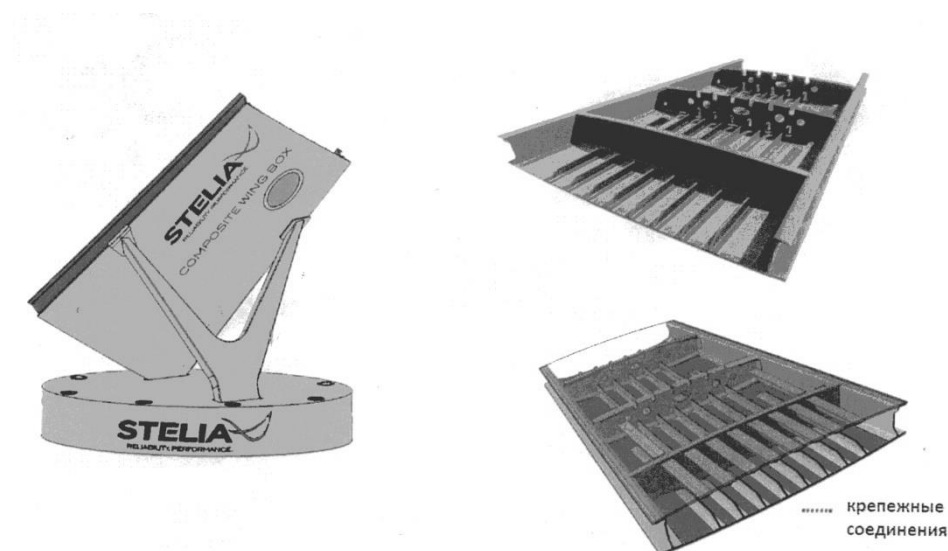


Рис. 13. Готовый демонстратор отсека крыла интегральной конструкции (совместно с верхней крышкой)

Известно, что важной составляющей метрологического обеспечения качества композитных конструкций является эффективный ремонт.

На выставке демонстрировалось также ремонтное оборудование для конструкций из композиционных материалов.

Несколько представителей фирмы Airbus выступали с докладами о ремонте композиционных деталей.

Большая доля ремонтов в процессе эксплуатации самолетов выполняется «на месте» при помощи портативного ремонтного оборудования (рис. 14), которое обеспечивает создание требуемой температуры и вакуумного разрежения в процессе полимеризации композиционных материалов, используемых при ремонте,



Рис. 14. Ремонтное оборудование

Конструкционный ремонт Airbus разделяется на ремонт при помощи клеевых соединений – Bonded Repair и ремонт при помощи механического крепежа – Bolted Repair.

Конструкционный ремонт может быть сделан посредством клеевого или закрепленного болтами ремонта, и оба должны быть сертифицированы в соответствии с EASA/FAA.

Результаты команды Airbus в области ремонта:

- квалификация базовых углеродных ремонтных материалов LG и MG для Hexcel M20/IM7 из препрега для автоклавного ремонта и клейкой пленки Cytac FM300-2M;

- квалифицирован процесс ремонта (отверждение под вакуумом и давлением при 140°C). Обновлено спецификации AIPS и AIPi;

- установлены принципы проектирования в соответствии с правилами АА.

Основными требованиями CS25.603 §8.8 является подтверждение анализом и/или тестом, что методы и техники ремонта восстановят конструкцию до летной годности. Обоснование ремонта производится анализом, подтвержденным испытаниями. Ремонт должен соответствовать тем же требованиям, что и первоначальная структура композита. Репрезентативные размеры повреждения проводятся в полномасштабном тесте (максимально допустимый размер повреждения). Испытательный образец в натуральную величину также включается в доказательную базу.

Ремонт деталей из композиционных материалов требует чистой окружающей среды, для которой влажность, пыль и контроль температуры имеют решающее значение. Фирмы Buldair of Spain и J.B. Roche из Корка, Ирландия, предлагают портативные, надувные и многоразовые укрытия («чистые комнаты») в качестве решения (рис. 15).

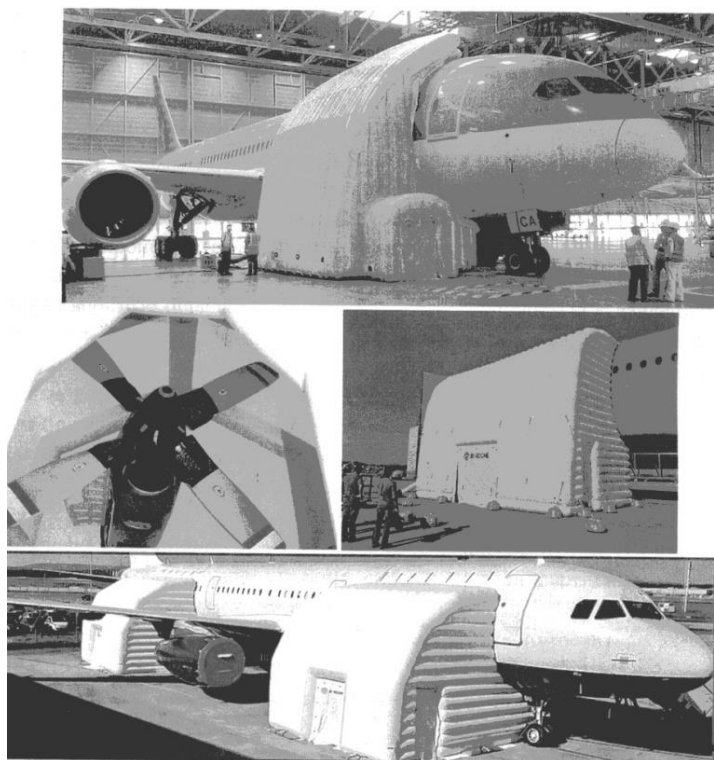


Рис. 15. Портативные «чистые комнаты» для ремонта композитных деталей

Надутые укрытия полностью поддерживаются воздухом при низком давлении, что делает их безопасными для самолетов и обслуживающего персонала. Даже ангар не может обеспечить достаточно незагрязненную среду, необходимую для определенных видов ремонта. Поэтому портативные укрытия были спроектированы таким образом, чтобы полностью изолировать часть участка, на котором ведутся работы – будь-то ремонт внутри ангара или снаружи на рампе. J.B. Roche предлагает три типа авиационных укрытий – для замены двигателя, обслуживания фюзеляжа и гондолы, а также ремонта носа и лобового стекла.

Выводы

1. Показано, что в комплексной проблеме перманентного повышения эффективности применения полимерных композиционных материалов в конструкциях воздушных судов транспортной категории важную роль играет рациональный выбор конструктивно-технологических решений их узлов и агрегатов, в значительной степени способствующих реализации высоких летно-технических и экономических характеристик воздушных судов, конкурентоспособных на мировом рынке продаж и услуг.

2. Проведен обзор и анализ развития новых конструктивно-технологических решений крыльевых композитных структур, обсуждаемых на ежегодной международной выставке Sampe 2019 года по проекту NEWS, формируемом в соответствии со стратегией STELIA Aerospace R&T по разработке композитных технологий с высоким техническим и экономическим потенциалом.

3. Приведено подробное описание экспериментального интегрального демонстратора отсека крыла, формируемого методом инфузии. Обсуждаются преимущества выбранной интегральной инфузионной технологии, включающей минимизацию этапов сборки, автоматизацию процесса, экономичный безавтоматический процесс.

4. Приведена информация представителей фирмы Airbus о ремонте композитных конструкций в процессе эксплуатации самолета при помощи портативного оборудования, обеспечивающего качественный режим отверждения углепластика. Описаны виды конструкционного ремонта.

Список литературы

1. Бычков С. А. Решение проблемы создания авиаконструкций из полимерных композиционных материалов на АНТК «Антонов» / С. А. Бычков, В. Г. Бондарь, В. Н. Король // *Авіаційно-космічна техніка і технологія: сб. наук. пр. Нац. аерокосм. ун-ту ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»*. –Х.: ХАИ, 2003. – Вип.. 5(40). – С. 34-37.

2. Бычков С. А. Состояние и проблемы применения новых конструкционных материалов в отечественных гражданских самолетах в современных условиях. Сообщение 2. Полимерные композиты в отечественных самолетах в современных условиях (1995-2015): Первопричины и закономерности внедрения / С. А. Бычков, А. А. Коцюба // *Авиационно-космическая техника и технология*. Х.: ХАИ, 2016. - № 6(133). – С. 4-14.

3. Андреев А. В. Современные конструктивно-технологические решения агрегатов авиаконструкций из полимерных композиционных материалов и их реализация на предприятии STELIA Aerospace / А. В. Андреев, Я. О. Головченко, А. А. Коцюба // *Вопросы проектирования и производства конструкций лета-*

тельных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Х.: ХАИ, 2015. - Вып. 4(84). - С. 95-104.

4. Коцюба А. А. Новые конструктивно-технологические решения соединений композитных изделий в практике ГП «Антонов» / А.А. Коцюба, А.З. Двейрин, Я.О. Головченко // Технологические системы. К.: УкрНИАТ, 2016. - №1 (74). – С. 19-26.

5. Бычков С. А. Классификационные аспекты рационального применения полимерных композиционных материалов в конструкциях гражданских самолетов / С. А. Бычков, А. В. Гайдачук, А. В. Андреев, Wong Bo // Вісник Національного авіаційного університету, 2019. №3. - С. 16-22.

6. Андреев А. В., Донец А. Д. Тенденции и перспективы применения полимерных композитов в европейском авиастроении / А. В. Андреев, А. Д. Донец. Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Х.: ХАИ, 2019. - Вып. 2(98). – С. 19-31.

7. SAMPE CONFERENCE 2019 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.sampe-europe.org/conferences/sampe-conference-2019-nantes>

References

1. Bychkov, S. A., Bondar', V. G., Korol', V. N. Reshenie problemy sozdaniya aviakonstruktsii iz polimernykh kompozitsionnykh materialov na ANTK «Antonov» [Solving the problem of creating aircraft structures from polymer composite materials at ASTK Antonov]. *Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnologiya: sb. nauk. pr. Nats. aerokosm. un-tu im. M.E. Zhukovs'kogo «KhAI»*. Kharkov: KhAI Publ. 2003. no. 5(40), pp. 34-37.

2. Bychkov, S. A., Kotsyuba, A. A. Sostoyanie i problemy primeneniya novykh konstruktivnykh materialov v otechestvennykh grazhdanskikh samoletakh v sovremennykh usloviyakh. Soobshchenie 2. Polimernye kompozity v otechestvennykh samoletakh v sovremennykh usloviyakh (1995-2015): Pervoprichiny i zakonornosti vnedreniya. [The state and problems of the use of new structural materials in domestic civil aircraft in modern conditions. Communication 2. Polymer composites in domestic aircraft in modern conditions (1995-2015): The root causes and patterns of implementation]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. Kharkov: KhAI Publ. 2016. no. 6(133), pp. 4-14.

3. Andreev, A. V., Golovchenko, Ya. O., Kotsyuba A. A., Sovremennye konstruktivno-tekhnologicheskie resheniya agregatov aviakonstruktsii iz polimernykh kompozitsionnykh materialov i ikh realizatsiya na predpriyatii STELIA Aerospace [Modern design and technological solutions for aircraft structures from polymer composite materials and their implementation at STELIA Aerospace]. *Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruktsii letatel'nykh apparatov: sb. nauch. tr. Nats. aerokosm. un-t im. N.E. Zhukovskogo «KhAI»*. Kharkov: KhAI Publ. 2015. no. 4(84). - pp. 95-104.

4. Kotsyuba, A. A., Dveirin, A. Z., Golovchenko, Ya. O. Novye konstruktivno-tekhnologicheskie resheniya soedinenii kompozitnykh izdelii v praktike GP «Antonov» [New structural and technological solutions of composite products joints in the practice of Antonov]. *Tekhnologicheskie sistemy*. Kyiv: UkrNIAT Publ. 2016. no 1 (74). pp. 19-26.

5. Bychkov, S. A., Gaidachuk, A. V., Andreev, A. V., Wong Bo. Klassifikatsionnye aspekty ratsional'nogo primeneniya polimernykh kompozitsionnykh ma-

terialov v konstruktsiyakh grazhdanskikh samoletov [Classification aspects of the rational use of polymer composite materials in the construction of civil aircraft]. *Visnik Natsional'nogo aviatsiinogo universitetu*. Kyiv: NAU Publ. 2019. no 3pp. 16-22.

6. Andreev, A. V., Donets, A. D. Tendentsii i perspektivy primeneniya polimernykh kompozitov v evropeiskom aviaostroenii [Tendencies and prospects for the use of polymer composites in the European aircraft industry]. *Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruktsii letatel'nykh apparatov: sb. nauch. tr. Nats. aerokosm. un-ta im. N.E. Zhukovskogo «KhAI»*. Kharkov: KhAI Publ. 2019. no. 2(98). pp. 19-31.

7. SAMPE CONFERENCE 2019 Available at:
<https://www.sampe-europe.org/conferences/sampe-conference-2019-nantes>

Поступила в редакцию 12.12.2019, рассмотрена на редколлегии 18.12.2019

Розвиток нових конструктивно-технологічних рішень крил літаків і ремонт композитних конструкцій

Показано, що в комплексній проблемі перманентного підвищення ефективності використання полімерних композиційних матеріалів в конструкціях повітряних суден транспортної категорії важливу роль відіграє раціональний вибір конструктивно-технологічних рішень їх вузлів і агрегатів, що в значній мірі сприяє реалізації високих льотно-технічних і економічних характеристик повітряних суден, які конкурентоспроможні на світовому ринку продажів і послуг. Проведено огляд і аналіз розвитку нових композитних структур для крил, що обговорювалися на щорічній міжнародній виставці Sampe 2019 року за проектом NEWS, що формується відповідно до стратегії STELIA Aerospace R&T з розробки композитних технологій з високим технічним і економічним потенціалом. Наведено детальний опис експериментального інтегрального демонстратора відсіку крила, що формується методом інфузії. Обговорюються переваги обраної інтегральної інфузійної технології, яка включає мінімізацію етапів збирання, автоматизацію процесу, економічний безавтоклавний процес формування і ремонт композитних конструкцій. Наведено інформацію представників фірми Airbus про ремонт композитних конструкцій в процесі експлуатації літака за допомогою портативного обладнання, що забезпечує якісний режим твердіння вуглепластиків. Описані види конструкційного ремонту. Відмічається, що конструкційний ремонт може бути виконаний за допомогою клейової або закріпленої болтами накладок, сертифікованих у відповідності до EASA/FAA. Основними вимогами CS25.603 §8.8 є підтвердження аналізом та/або тестом, що методи і техніка ремонту відновлює конструкцію до льотної придатності. Обґрунтування ремонту проводиться аналізом, підтвердження випробуваннями. Ремонт повинен відповідати тим самим вимогам, що і первісна структура композиту. Репрезентативні розміри пошкодження проводяться в повномасштабному тесті (максимально допустимий розмір пошкодження). Випробуваний зразок в натуральну величину також долучається до доказової бази. Ремонт деталей із композиційних матеріалів вимагає чистого оточуючого середовища, для якого вологість, пил і контроль температури має вирішальне значення. Тому в межах виставки були представлені різноманітні конструкції портативних «чистих кімнат», які розроблені різними компаніями спеціально для виконання ремонту авіаційних конструкцій.

Ключові слова: полімерні композиційні матеріали, конструктивно-технологічні рішення крил повітряних суден, огляд і аналіз матеріалів виставок Sampe, конструкційний ремонт пошкоджень.

Development of new structural and technological solutions for aircraft wings and repair of composite structures

It is shown that in the complex problem of the permanent increase in the efficiency of using polymer composite materials in the construction of aircraft in the transport category, an important role is played by the rational choice of structural and technological solutions of their units and assemblies, which significantly contribute to the implementation of high flight-technological and economic characteristics of aircraft competitive on global market for sales and services. A review and analysis of the development of new wing composite structures discussed at the annual international exhibition Sampe 2019 under the NEWS project, formed in accordance with the STELIA Aerospace R&T strategy for the development of composite technologies with high technical and economic potential, is carried out. A detailed description of the experimental integral demonstrator of the wing compartment molded by infusion is given. The advantages of the selected integrated infusion technology are discussed, including minimizing the assembly steps, process automation, an economical autoclave-free molding process and repair of composite structures. The information provided by Airbus representatives on the repair of composite structures during the operation of the aircraft using portable equipment providing a high-quality curing regime for carbon fiber reinforced plastic. The types of structural repair are described. It is noted that structural repairs can be carried out by means of glue or bolt-on linings certified in accordance with EASA / FAA. The basic requirements of CS25.603 §8.8 are confirmation by analysis and / or test that repair methods and techniques will restore the structure to airworthiness. The justification for the repair is carried out by analysis confirmed by tests. Repairs must meet the same requirements as the original composite structure. Representative damage dimensions are performed in a full-scale test (maximum allowable damage size). A full-size test piece is also included in the evidence base. Repairing composite parts requires a clean environment, for which humidity, dust and temperature control are critical. Therefore, various portable portable “clean room” designs developed by various companies specifically for the repair of aircraft structures were presented at the exhibition.

Keywords: polymer composite materials, structural and technological solutions for aircraft wings, review and analysis of Sampe exhibitions materials, structural repair of damage.

Сведения об авторах:

Бычков Сергей Андреевич – доктор технических наук, профессор, Главный инженер ГП «АНТОНОВ», Украина.

Гайдачук Александр Витальевич – доктор технических наук, профессор Технологического университета г. Нинбо, КНР, arbalet98@ukr.net

Андреев Алексей Викторович – кандидат технических наук, Заместитель Главного инженера ГП «АНТОНОВ», Украина, andreev@antonov.com

Wang Bo – кандидат экономических наук, доцент Технологического университета г. Нинбо, КНР.

About the Authors

Bychkov Sergey Andreevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Engineer of Antonov State Enterprise, Ukraine.

Gaydachuk Alexander Vitalievich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Ningbo University of Technology, China, arbalet98@ukr.net

Alexey Andreev – Candidate of Technical Sciences, Deputy Chief Engineer of Antonov State Enterprise, Ukraine, andreev@antonov.com

Wang Bo – Ph.D. in Economics, Associate Professor, Ningbo University of Technology, China