

УДК 629.735

Коцюба А. А., Двейрин А. З., Головченко Я. О.

Государственное предприятие «АНТОНОВ». Украина, г. Киев

**НОВЫЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ
КОМПОЗИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ В ПРАКТИКЕ ГП «АНТОНОВ»**

Рассмотрены современные тенденции в области самолетостроения. Проведен анализ работ, посвященных разработке принципиально новых конструктивно-технологических решений соединений композитных изделий на основе трансверсальных и продольных крепежных микроэлементов. Проведены первые экспериментальные исследования для оценки возможности применения этого вида соединений в конструкции самолетов семейства Ан.

Ключевые слова: самолет; композит; материал; конструкция; соединение; конструктивно-технологическое решение.

Основной тенденцией современного развития самолетостроения является постепенное увеличение доли композитных изделий в конструкции самолетов с целью снижения их массы и повышения доли полезной нагрузки. Ведущими зарубежными фирмами Boeing и Airbus ведется активная работа по разработке новых технологических процессов изготовления и обработки деталей из композиционных материалов (КМ), снижению их себестоимости путем уменьшения трудоемкости и повышением автоматизации производства. Большое внимание уделяется снижению энергоемкости производства, что подтверждается тематикой докладов, представленных на таких международных конференциях, как JEC Composites и SAMPE [1].

Одним из преимуществ композитов является возможность изготовления изделий сложной формы и конструкции, состоящих из меньшего числа входящих деталей по сравнению с аналогичной металлической конструкцией, что уменьшает число стыков и количество используемого крепежа, но и при этом до 20% массы агрегата будет приходиться на различные соединительные и крепежные элементы.

Разработкой эффективных конструктивно-технологических решений (КТР) соединений композитных деталей занимаются различные научные организации. Решению этого вопроса посвящено большое количество работ, поскольку традиционные виды применяемых соединений, преимущества и недостатки которых на сегодня определены, уже исчерпали возможности повышения своей эффективности.

Авторами работ [2–5] были решены многие фундаментальные задачи конструирования и проектирования композитных изделий, а также сформулированы основные принципы конструирования металлокомпозитных гетерогенных структур для соединительных элементов деталей и агрегатов (рис. 1) [6–14].

Принципиальное отличие предложенных КТР от традиционных способов соединений состоит в применении крепежных микроэлементов различной конфигурации (рис. 1, а, б, в и г), сформовываемых в пакет КМ при изготовлении деталей (рис. 1, д и е).

Размеры крепежных микроэлементов новых КТР близки к диаметру волокон армирующих материалов (АМ). Это позволяет реализовать эффективный переход от полимерного композита к металлическим фитингам – способу соединения деталей, который досконально изучен и проверен в ходе многолетней эксплуатации [3]. Также следует отметить, что, в отличие от традиционного соединения композитной детали с металлической законцовкой посредством болтов, при внедрении крепежных микроэлементов проходят между волокнами АМ, не разрушая их. Результаты исследований, проведенных в рамках изучения данного класса КТР стыковых узлов авиаконструкций, показали их эффективность.

Подобные КТР можно встретить и в других источниках. Например, авторы работы [15] также пришли к выводу о необходимости миниатюризации крепежа и предложили некоторые КТР соединений лонжеронов с композитной обшивкой, композитного лонжерона и силовых нервюр. В работе [16] подробно рассмотрена замена части слоев

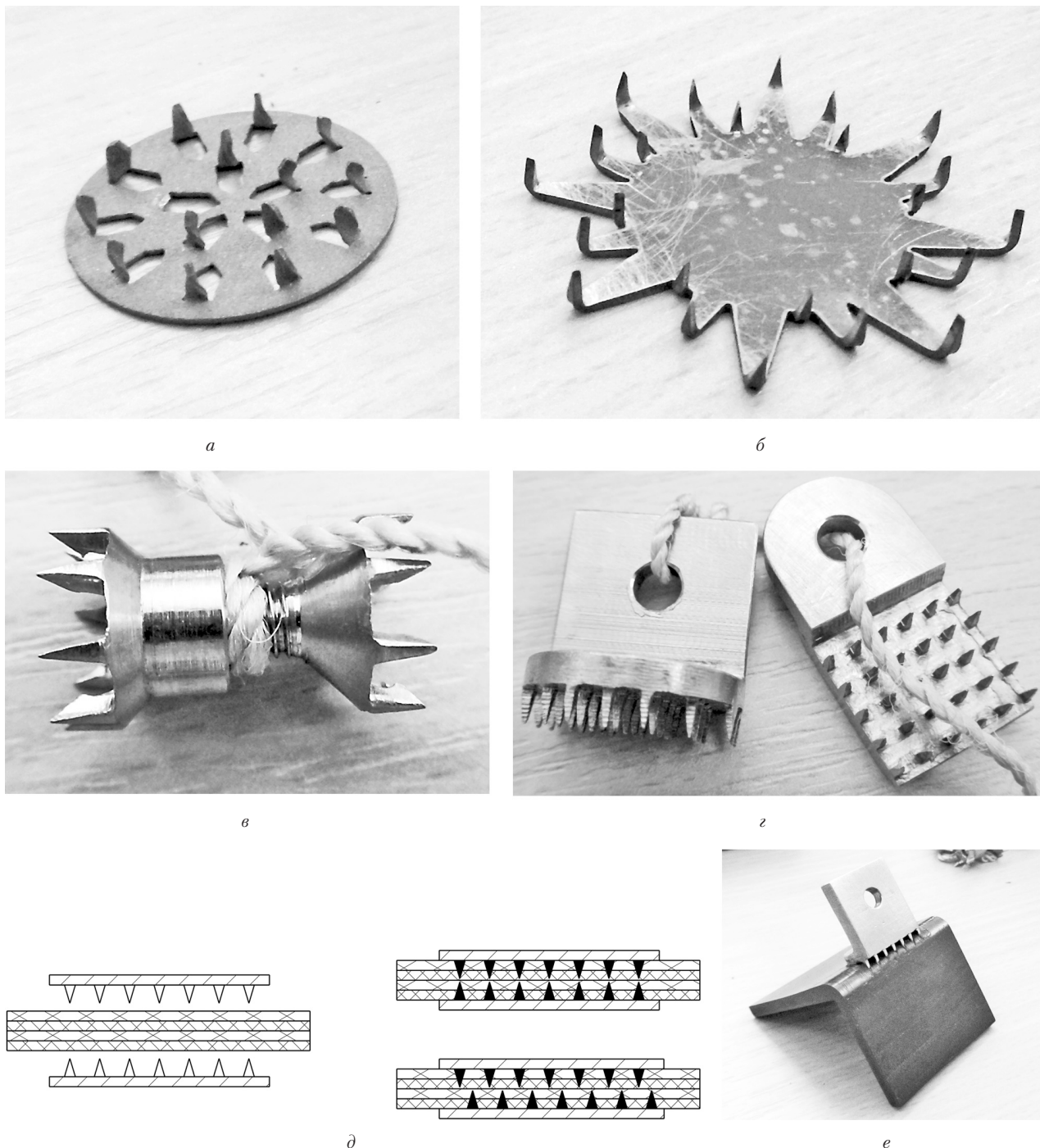


Рис. 1. Новый вид КТР для соединений композитных изделий:

a, б – накладки с крепежными микроэлементами различной формы, применяемые в районе установки крепежа; *в* – элемент типа «болт-гайка»; *г* – образцы соединительных элементов; *д* – схема изготовления; *е* – готовое изделие

пакета КМ на титановые листы, аналогичная предложенному в работах [4, 11–14] армированию металлической фольгой (рис. 2, *a* и *б*).

Таким образом, применение нового перспективного класса КТР стыковых узлов является актуальным вопросом для современного самолетостроения, где ведущее место занимают композитные конструкции, а традиционные виды соединений уже исчерпали свои возможности.

Авторами были проведены научно-исследовательские работы по проектированию, изготовлению и испытанию новых композитных авиаконструкций, частью которых являлись исследования в области соединений композитных деталей, где одним из основных направлений является повышение несущей способности пакета КМ на смятие.

Основными требованиями к новым КТР, помимо функциональности и эффективности, являются

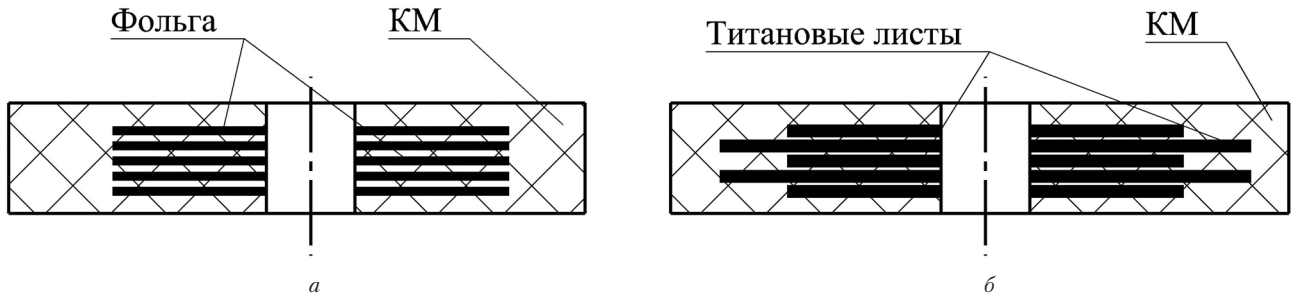


Рис. 2. Армирование металлической фольгой (а) и замена части слоев пакета КМ на титановые листы (б)

технологичность, низкая трудоемкость изготовления, а также возможность применения в серийном производстве самолетов.

Ввиду многообразия конфигурации крепежных микроэлементов и типов соединительных элементов было принято решение о проведении первой стадии исследований для соединительных элементов типа «канцелярская кнопка», крепежные микроэлементы которого имеют форму зубьев.

Комплексные исследования заключались в решении ряда вопросов: выбора материалов и технологии изготовления металлических соединительных элементов, видов покрытия, отработки технологии внедрения крепежных микроэлементов в заготовку из препрега и формования металлокомпозитного образца, проверке эффективности применения металлических крепежных микроэлементов путем проведения сравнительных испытаний композитных образцов на смятие.

Анализ показал, что соединительные элементы типа «канцелярская кнопка», представляющие собой по сути металлические накладки с крепежными микроэлементами в виде зубьев (далее зубчатые накладки), могут быть получены методом холодной штамповки из металлической листовой

заготовки. Для этого был разработан специальный штамп (рис. 3, а) и принято решение об изготовлении заготовок зубчатых накладок в виде лент (рис. 3, б) с последующим вырезанием из них деталей требуемой конфигурации, что существенно упрощает конструкцию оборудования. С учетом особенностей изготовления композитных изделий в качестве материалов для изготовления зубчатых накладок рассмотрены наиболее часто применяемые конструкционные стали, титановые и алюминиевые сплавы: лента 12Х18Н10Т, лента ВТ1-0, лист Д16АМ, лист АМГ2М.

Результаты осмотра полученных образцов показали, что для изготовления подобного рода деталей способом холодной штамповки подходит нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, на образцах из остальных рассмотренных материалов были обнаружены трещины в районе основания зубьев или полное их отламывание (рис. 4).

Составной частью эксперимента был этап выбора состояния внешней поверхности зубчатых накладок, поскольку этот фактор в значительной мере оказывает влияние на адгезию на границе между металлом и композитом. Для нержавеющей стали рассматривались следующие варианты:

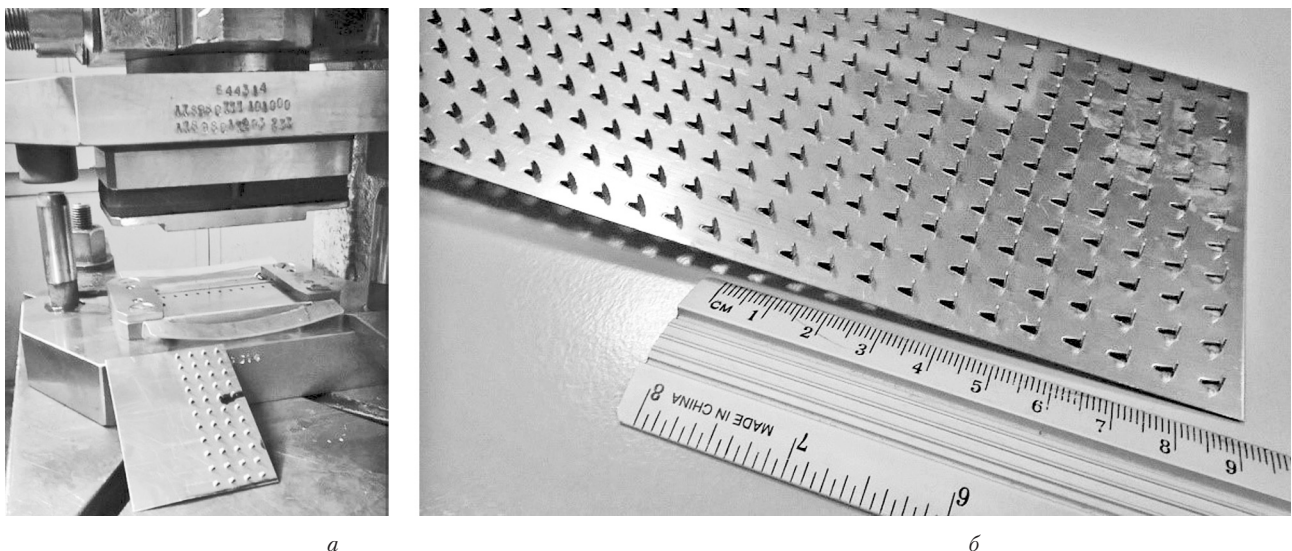


Рис. 3. Штамп для изготовления зубчатых накладок (а) и полученная заготовка (б)

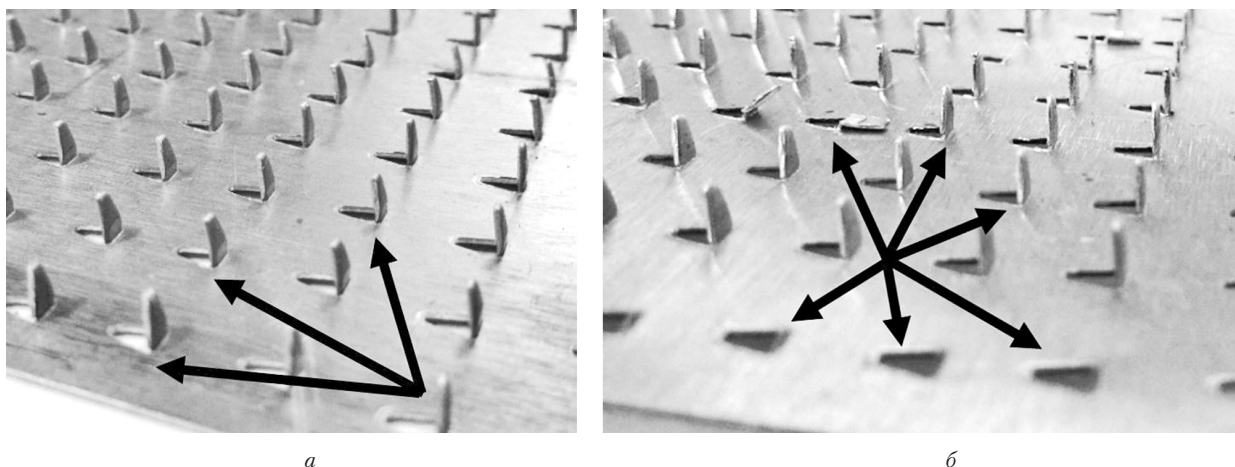


Рис. 4. Изготовленные образцы зубчатых накладок:
a – трещины в районе основания зубьев; *б* – частичное и полное отламывание зубьев

- химическое пассивирование (Хим. Пас) заготовки в состоянии поставки;
- пескоструйная обработка поверхности детали после холодной штамповки с последующим Хим. Пас.

Поскольку состояние лицевой поверхности зубчатой накладки не влияет на уровень адгезии с КМ, а также должно отвечать эстетическим требованиям к видимой поверхности деталей, то пескоструйной обработке была подвержена только внутренняя поверхность образцов, в результате чего произошло значительное коробление детали.

Далее были изготовлены специальные образцы из стеклопластика (стеклоткань Т-10-80 на связующем ЭДТ-69Н) с приформованными зубчатыми

накладками (рис. 5, *a, б, в* и *г*) и проведены сравнительные испытания на отрыв (рис. 5, *д* и *е*) для оценки различных состояний поверхности металлических зубчатых накладок.

Результаты сравнительных испытаний на отрыв металлических зубчатых накладок с различным состоянием поверхности показали, что пескоструйная обработка ($F_{отр} = 600 \text{ Н}$) приводит к короблению детали, увеличивает трудоемкость ее изготовления, а также уступает Хим. Пас. ($F_{отр} = 850 \text{ Н}$) по значениям усилия отрыва.

После выбора материала и состояния поверхности металлических зубчатых накладок были изготовлены образцы для проведения испытаний на смятие (рис. 6, *a* и *б*), а также образцы таврового



Рис. 5. Изготовление образцов и проведение испытаний на отрыв

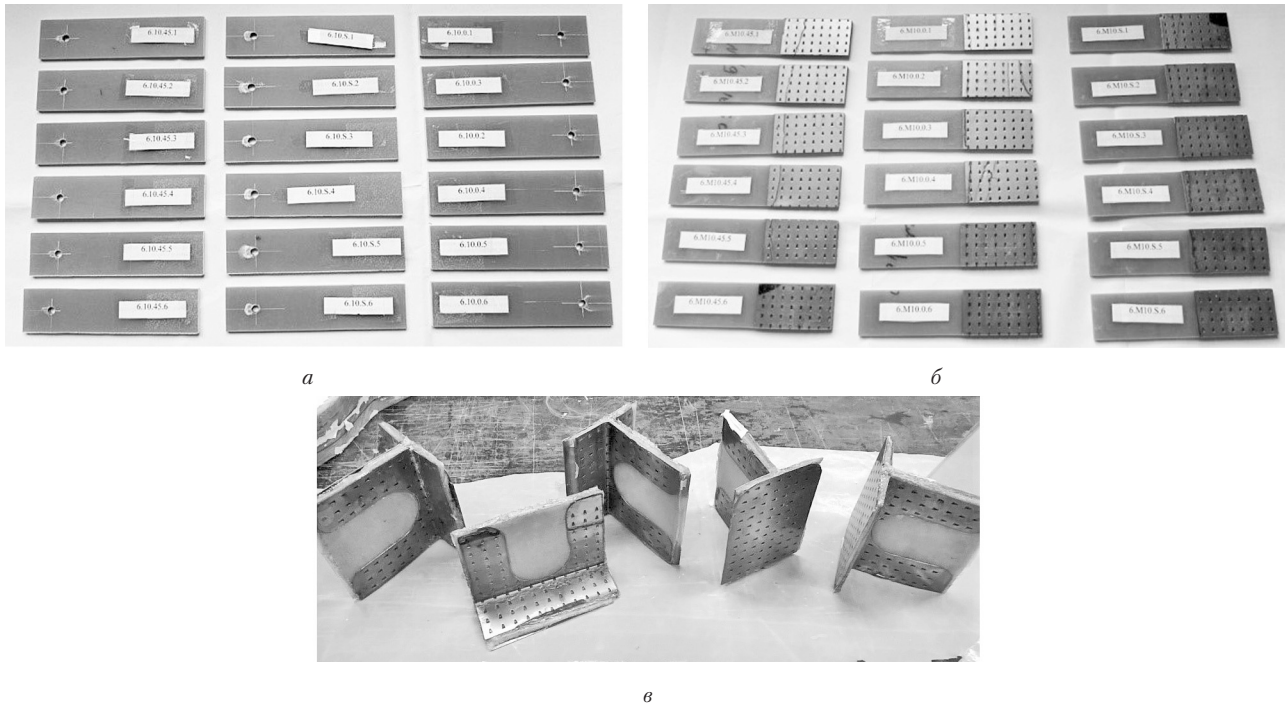


Рис. 6. Изготовленные образцы:
 а — без зубчатых накладок; б — с зубчатыми накладками; в — таврового сечения

сечения, имитирующие соединение балок (рис. 6, в). Во всех образцах зубчатые накладки приформовывались с обеих сторон образца.

При проведении эксперимента рассмотрены наиболее часто применяемые в авиаконструкциях структуры пакета КМ: $[0^\circ]$, $[0^\circ, (+45^\circ, -45^\circ)]$, $[+45^\circ, -45^\circ]$, а также крепеж диаметром 5, 6 и 8 мм.

На испытательной машине Instron 5582 (рис. 7, а) были проведены сравнительные испытания изготовленных образцов для крепежа диаметром 5, 6 и 8 мм (рис. 7, б) с записью соответствующих диаграмм нагружения (рис. 7, в). Анализ источников [17–19], показал, что допускается овализация отверстия, составляющая четыре процента его диаметра.

Итоговые результаты испытаний приведены на рис. 8.

Таким образом, результаты первого этапа исследований возможности применения новых КТР соединений композитных изделий в конструкции самолетов семейства Ан показали следующее:

отработана технология изготовления металлических накладок с крепежными микроэлементами методом холодной штамповки из нержавеющей стали;

применение металлических накладок с крепежными микроэлементами повышает несущую способность пакета КМ на смятие в местах установки крепежа на 18–57% в зависимости от структуры пакета.

дальнейшему научному исследованию подлежит изучение влияния ориентации зубьев;

применение данного вида соединения целесообразно для композитных конструкций различного уровня нагружения и подлежит дальнейшему изучению и апробации на типовых композитных деталях агрегатов самолета, среди которых стоит отметить следующие: различные панели, крышки, створки, лючки и т.п.

Литература

- [1] Андреев, А.В. Современные конструктивно-технологические решения агрегатов авиаконструкций из полимерных композиционных материалов и их реализация на предприятии STELIAAEROSPACE [Текст] / А.В. Андреев, Я.О. Головченко, А.А. Коцюба // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». — Харьков, 2015. — Вып. 4 (84). — в печати.
- [2] Гайдачук А.В. Роль ХАИ в решении проблемы научного обеспечения внедрения композиционных материалов в авиационно-космическую технику: итоги и перспективы [Текст] / А.В. Гайдачук, В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов // Авиационно-космическая техника и технология. — Харьков, 2005. — Вып. 7. — С. 21 — 39.
- [3] Карпов, Я.С. Результаты решения некоторых фундаментальных задач конструирования и проектирования изделий из композиционных материалов [Текст] / Я.С. Карпов // Авиационно-космическая техника и технология. — 2005. — Вып. 7. — С. 96 — 127.

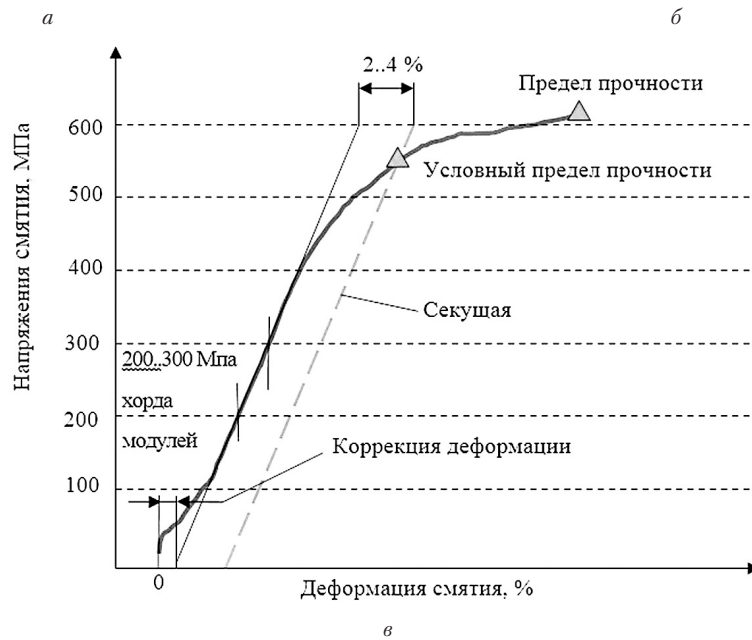


Рис. 7. Оборудование для проведения испытаний (а, б) и типовая диаграмма нагружения (в)

- [4] Карпов, Я.С. Проектирование деталей и агрегатов из композиционных материалов: Учебник [Текст] / Я.С. Карпов. — Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2010. — 768 с.
- [5] Гайдачук В.Є. Тридцять років наукової школи з проблеми створення виробів авіаційно-космічної техніки з полімерних композиційних матеріалів [Текст] / В.Є. Гайдачук, О.В. Гайдачук, Я.С. Карпов // Авіа-

- ціонно-космічна техніка і технологія. — 2010. — Вип. 2 (69). — С. 12 — 19.
- [6] Проектирование соединений деталей из композиционных материалов с элементами продольной связи [Текст] / В. Е. Гайдачук, Я. С. Карпов, В. Ф. Несвит // Вопросы проектирования и производства тонкостенных силовых конструкций: темат. сб. науч. тр. / М-во высш. и среднего спец.

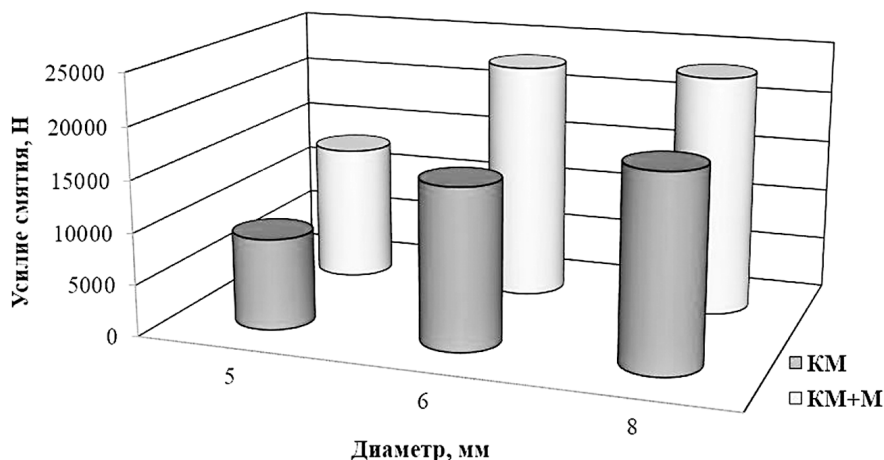


Рис. 8. Результаты испытаний

образования СССР, Харьк. авиац. ин-т им. Н. Е. Жуковского. — Х., 1984. — С. 9 — 12.

- [7] Карпов, Я.С. Распределение напряжений в комбинированных соединениях деталей из композиционных материалов [Текст] / Я.С. Карпов // Вопросы проектирования и производства тонкостенных силовых конструкций: Темат. сб. науч. трудов. — Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1984. — С. 55 — 60.
- [8] Карпов, Я.С. Исследование анизотропии прочности композиционных материалов на смятие крепежными элементами [Текст] / Я.С. Карпов, В.А. Макаренко, В.Г. Марченко // Расчет и проектирование конструкций летательных аппаратов: Темат. сб. науч. трудов. — Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1989. — С. 82 — 91.
- [9] Деформативные свойства соединения деталей из композиционных материалов с крепежными микроэлементами [Текст] / Я. С. Карпов, В. Д. Локтионов // Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов : тез. докл. XII Всесоюз. конф. — Обнинск, 1990. — Ч. 3 : Полимерные композиционные материалы. — С. 16 — 17.
- [10] Проектирование оптимальных соединений с элементами поперечной связи [Текст] / Я. С. Карпов, В. И. Парасюк // Конструирование и производство изделий из полимерных и металлических композиционных материалов : тез. докл. конф., 18–20 мая 1993 г., Евпатория / О-во «Знание» Украины, Укр. Дом экон. и науч.-техн. знаний, Укр. НИИ авиац. технологий. — К. : 1993. — С. 79.
- [11] Карпов, Я.С. Принципы и методы синтеза параметров металлокомпозитных гетерогенных структур авиаконструкций: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.07.02 [Текст] / Карпов Яков Семенович. — Х., 1993. — 490 с.
- [12] Принципы конструирования металлокомпозитных гетерогенных структур и их взаимосвязь с проектными параметрами агрегатов летательных аппаратов [Текст] / Я. С. Карпов, С. П. Кривенда // Авиационно-космическая техника и технология : тр. Харьк. авиац. ин-та им. Н. Е. Жуковского 1995 г. — Х., 1996. — С. 343 — 349.
- [13] Карпов, Я.С. Проектирование и конструирование соединений деталей из композиционных материалов [Текст] / Я.С. Карпов, С.П. Кривенда, В.И. Рябов. — Учеб. пособие по курсовому и дипломному проектированию. — Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1997. — 200 с.
- [14] Карпов, Я.С. Соединение деталей и агрегатов из композиционных материалов: Учеб. пособие [Текст] / Я.С. Карпов. — Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2006. — 359 с.
- [15] Буланов, И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: Учеб. пособие [Текст] / И.М. Буланов, В.В. Воробей. —М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. — 516 с.
- [16] Гришин, В.И. Прочность и устойчивость элементов и соединений авиационных конструкций из композитов [Текст] / В.И. Гришин, А.С. Дзюба, Ю.И. Дударьков. —М.: Издательство физико-математической литературы, 2013. — 272 с.
- [17] Тарнопольский, Ю.М. Методы статических испытаний армированных пластиков. — 3-е изд., перераб. и доп. [Текст] / Ю.М. Тарнопольский, Т.Я. Киндес. — М.: Химия, 1981. — 272 с.
- [18] ASTM D5961/ D5961M-05 Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates.
- [19] MIL-HDBK-17-2F Composite materials handbook, 2002.

Kotsiuba O. A., Dveirin O. Z., Golovchenko I. O.

ANTONOV, State-owned Enterprise. Ukraine, Kiev

NEW STRUCTURAL-MANUFACTURING SOLUTIONS OF JOINTS OF COMPOSITE PRODUCTS IN ANTONOV COMPANY PRACTICE

Modern trends in the field of aircraft construction are considered. The analysis of works devoted to development of essentially new structural and manufacturing solutions of joints of composite products based on transversal and longitudinal fixing microcells is carried out. The early pilot studies are conducted for an assessment of possibility of this type of joints application in a design of planes of family An.

Keywords: plane; composite; material; structure; joint; structural-manufacturing solution.

References

- [1] Gaydachuk A.V. Rol HAI v reshenii problemy nauchnogo obespecheniya vnedreniya kompozitsionnykh materialov v aviatsionno-kosmicheskuyu tekhniku: itogi i perspektivy [Tekst] / A.V. Gaydachuk, V.E. Gaydachuk, Ya.S. Karpov // Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. – Harkov, 2005. – Vyip. 7. – P. 21 – 39.
- [2] Karpov, Ya.S. Rezultaty resheniya nekotorykh fundamentalnykh zadach konstruirovaniya i proektirovaniya izdeliy iz kompozitsionnykh materialov [Tekst] / Ya.S. Karpov // Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. – 2005. – Vyip. 7. – P. 96 – 127.
- [3] Karpov, Ya.S. Proektirovanie detaley i agregatov iz kompozitsionnykh materialov: Uchebnik [Tekst] / Ya.S. Karpov. – H.: Nats. aerokosm. un-t im. N.E. Zhukovskogo «HAI», 2010. – 768 p.
- [4] Gaydachuk V.E. Tridtsyat rokiv naukovoyi shkoly z problem stvorenniya virobiv aviatsionno-kosmicheskoyi tekhniki z polimernykh kompozitsionnykh materialiv [Tekst] / V.E. Gaydachuk, O.V. Gaydachuk, Ya.S. Karpov // Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. – 2010. – Vyip. 2 (69). – P. 12 – 19.
- [5] Proektirovanie soedineniy detaley iz kompozitsionnykh materialov s elementami prodolnoy svyazi [Tekst] / V. E. Gaydachuk, Ya. S. Karpov, V. F. Nesvit // Voprosy proektirovaniya i proizvodstva tonkostennykh silovykh konstruksiy : temat. sb. nauch. tr. / M-vo vyssh. i srednego spets. obrazovaniya SSSR, Hark. aviats. in-t im. N. E. Zhukovskogo. – H., 1984. – P. 9 – 12.
- [6] Karpov, Ya.S. Raspredelenie napryazheniy v kombinirovannykh soedineniyakh detaley iz kompozitsionnykh materialov [Tekst] / Ya.S. Karpov // Voprosy proektirovaniya i proizvodstva tonkostennykh silovykh konstruksiy: Temat. sb. nauch. trudov. – H.: Hark. aviats. in-t, 1984. – P. 55 – 60.
- [7] Karpov, Ya.S. Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv voloknistogo kompozitsionnogo materiala v okrestnosti krepzhnogo elementa [Tekst] / Ya.S. Karpov, V.D. Loktionov // Proektirovanie elementov konstruksiy letatelnykh apparatov: Temat. sb. nauch. trudov. – H.: Hark. aviats. in-t, 1988. – P. 23 – 29.
- [8] Karpov, Ya.S. Issledovanie anizotropii prochnosti kompozitsionnykh materialov na smyatie krepzhnymi elementami [Tekst] / Ya.S. Karpov, V.A. Makarenko V.G. Marchenko // Raschet i proektirovanie konstruksiy letatelnykh apparatov: Temat. sb. nauch. trudov. – H.: Hark. aviats. in-t, 1989. – P. 82 – 91.
- [9] Deformativnyye svoystva soedineniya detaley iz kompozitsionnykh materialov s krepzhnymi mikroelementami [Tekst] / Ya. S. Karpov, V. D. Loktionov // Konstruksii i tekhnologiya polucheniya izdeliy iz nemetallicheskh materialov : tez. dokl. XII Vsesoyuz. konf. – Obninsk, 1990. – Ch. 3 : Polimernyye kompozitsionnyye materialy. – P. 16 – 17.
- [10] Proektirovanie optimalnykh soedineniy s elementami poperechnoy svyazi [Tekst] / Ya. S. Karpov, V. I. Parasyuk // Konstruirovaniye i proizvodstvo izdeliy iz polimernykh i metallicheskh kompozitsionnykh materialov : tez. dokl. konf., 18–20 maya 1993 g., Evpatoriya / O-vo «Znaniye» Ukrainy, Ukr. Dom ekon. i nauch.-tehn. znaniy, Ukr. NII aviats. tekhnologiy. – K. : 1993. – P. 79.
- [11] Karpov, Ya.S. Printsipy i metody sinteza parametrov metallokompozitnykh geterogennykh struktur aviakonstruksiy: diss. ... d-ra tehn. nauk: 05.07.02 [Tekst] / Karpov Yakov Semenovich. – H., 1993. – 490 p.
- [12] Printsipy konstruirovaniya metallokompozitnykh geterogennykh struktur i ih vzaimosvyaz s proektnymi parametrami agregatov letatelnykh apparatov [Tekst] / Ya. S. Karpov, S. P. Krivenda // Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya : tr. Hark. aviats. in-ta im. N. E. Zhukovskogo 1995 g. – H., 1996. – P. 343 – 349.
- [13] Karpov, Ya.S. Proektirovanie i konstruirovaniye soedineniy detaley iz kompozitsionnykh materialov [Tekst] / Ya.S. Karpov, S.P. Krivenda, V.I. Ryabkov. – Ucheb. posobie po kursovomu i diplomnomu proektirovaniyu. – Harkov: Hark. aviats. in-t, 1997. – 200 p.

- [14] Karpov, Ya.S. Soedinenie detaley i agregatov iz kompozitsionnykh materialov: Ucheb. posobie [Tekst] / Ya.S. Karpov. – H.: Nats. aerokosm. un-t im. N.E. Zhukovskogo «HAI», 2006. – 359 p.
- [15] Bulanov, I.M. Tehnologiya raketnykh i aerokosmicheskikh konstruksiy iz kompozitsionnykh materialov: Ucheb. posobie [Tekst] / I.M. Bulanov, V.V. Vorobey. – M.: Izdatelstvo MGTU im. N.E. Baumana, 1998. – 516 p.
- [16] Grishin, V.I. Prochnost i ustoychivost elementov i soedineniy aviatsionnykh konstruksiy iz kompozitov [Tekst] / V.I. Grishin, A.S. Dzyuba, Yu.I. Dudarkov. – M.: Izdatelstvo fiziko-matematicheskoy literatury, 2013. – 272 p.
- [17] Tarnopolskiy, Yu.M. Metodyi staticheskikh ispytaniy armirovannykh plastikov. – 3-e izd., pererab. i dop. [Tekst] / Yu.M. Tarnopolskiy, T.Ya. Kintsis. – M.: Himiya, 1981. – 272 p.
- [18] ASTM D5961/ D5961M-05 Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates.
- [19] MIL-HDBK-17-2F Composite materials handbook, 2002.