

*И. О. Кондаков**, *А. В. Чернов*, *А. Н. Шаныгин*, *С. Б. Сапожников*

*Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского,
научный центр мирового уровня "Сверхзвук", Московская обл., г. Жуковский, Россия*

ЗАЩИТА СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОМПОЗИТНОЙ СЕТЧАТОЙ ОБОЛОЧКИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ОТ НИЗКОСКОРОСТНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

I. O. Kondakov, A. V. Chernov, A. N. Shanygin, and S. B. Sapozhnikov

PROTECTION OF AIRCRAFT LATTICE SHELL MADE OF UD CFRP RIBS FROM LOW-VELOCITY IMPACTS

Keywords: composite, lattice structure, low-velocity impact, composite aircraft

The paper considers new protection pads located under a lattice shell of aircraft made of UD CFRP ribs and the problems arising from low-velocity impacts (LVI). It is shown that the aerodynamic sheathing and the load-bearing lattice shell should be separated by protective pads made of an elastoplastic material to absorb the impact energy without damaging the ribs. With finite element modeling, the calculation models were developed to assess the strength of UD CFRP ribs. On the example of the lattice shell of a business-class aircraft with a diameter of 2 m, rational parameters of the shell protection under LVI with an energy of up to 50 J were determined. Variation of the thickness of the protective pads allows to ensure the required maximum level of damage to the lattice shell. The results of impact tests on the shell fragments and their residual compressive strength are in good agreement with the calculated by FEM.

Ключевые слова: композит, конструкция сетчатая, удар низкоскоростной, самолет композитный

Рассмотрены новые конструкции силовых схем летательных аппаратов на основе сетчатых оболочек из однонаправленного

*Автор, с которым следует вести переписку: ivan.kondakov@tsagi.ru
Corresponding author: ivan.kondakov@tsagi.ru

углепластика и проблемы, возникающие при защите их элементов от низкоскоростных ударных воздействий. Показано, что аэродинамическая обшивка и силовой сетчатый каркас должны быть разделены защитным слоем из упругопластического материала, способного поглощать энергию удара без повреждения каркаса. На основе метода конечных элементов разработаны расчётные модели, позволяющие дать оценку прочности элементов каркаса из однонаправленного углепластика. На примере сетчатой оболочки самолета бизнес-класса диаметром 2 м найдены рациональные параметры защиты каркаса при ударах с энергией до 50 Дж. Вариация толщины защитного слоя позволяет обеспечить требуемый максимальный уровень повреждений каркаса. Результаты экспериментальных исследований удара по фрагментам каркаса и их остаточной прочности при сжатии хорошо согласуются с расчётными.

Введение

Традиционная схема конструкции корпуса летательного аппарата (ЛА) из лёгких сплавов состоит из тонкостенного силового набора (шпангоуты и лонжероны) и тонкой обшивки, работающей в основном на сдвиг [1, 2]. Обшивка создает наружный контур ЛА и выдерживает дополнительные аэродинамические нагрузки. Случайные локальные ударные воздействия (удары градом, гравием со взлётно-посадочной полосы или инструментом при техническом обслуживании) воспринимаются обшивкой, которая поглощает энергию падающего тела за счёт прогибов и пластических деформаций [3, 4].

Для современных конструкций ЛА из композитных материалов случайные удары по обшивке приводят к локальным повреждениям (разрывам волокон и расслоениям [5, 6]), которые наиболее существенно снижают прочность обшивок при сжатии, облегчая потерю устойчивости. Чтобы исключить катастрофические последствия таких ударов, толщину обшивок приходится увеличивать в 2—3 раза [7, 8], что существенно снижает весовую эффективность от применения композитов в конструкциях ЛА.

Новым решением, позволяющим значительно снизить остроту названной проблемы, является патент [9], в котором предложено выполнять несущий элемент фюзеляжа самолета в виде сетчатого силового каркаса из однонаправленного углепластика (рис. 1).

Сетчатый каркас способен выдерживать весь комплекс внутренних усилий фюзеляжа за счёт наличия спиральных и кольцевых рёбер. Наружная тонкая обшивка выполняет лишь вспомогательную роль — создает гладкую аэродинамическую форму.

Однако непосредственный контакт обшивки с силовыми рёбрами не обеспечивает достаточной прочности рёбер при локальном ударе, поскольку однонаправленный углепластик обладает низкой прочностью при растяжении поперек волокон [10, 11].

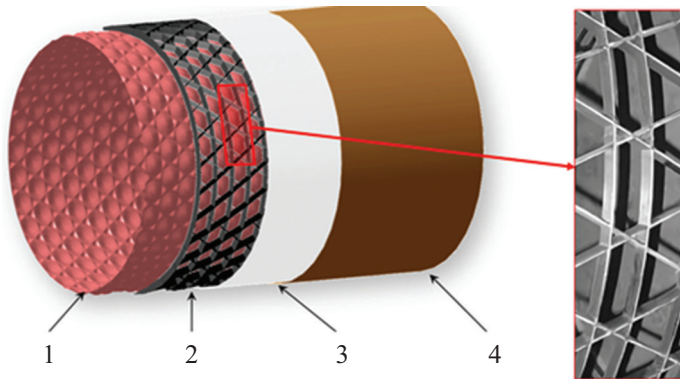


Рис. 1. Сетчатая оболочка и ее основные части: 1 — волнообразная гибкая гермообшивка; 2 — жесткий сетчатый композитный каркас; 3 — легкий изолирующий наполнитель; 4 — гладкая гибкая “аэродинамическая” обшивка. На врезке — фото фрагмента реальной оболочки.

Таким образом, возникает новая научная проблема — разработка методов снижения повреждений однонаправленного композита при локальном контактно-ударном воздействии при минимальном утяжелении конструкции силового сетчатого каркаса ЛА. В литературе по этой теме публикаций нет. Решению названной проблемы посвящена данная статья, в которой предложен специальный элемент-прокладка, рассеивающий кинетическую энергию удара за счёт больших пластических деформаций. Прокладка изготовлена из термопластичного полимера и расположена между внешней обшивкой и силовым каркасом.

Рассмотрен пример: часть фюзеляжа самолёта бизнес-класса с наружным диаметром 2 м и длиной 4 м, в которой сетчатая оболочка должна быть защищена от удара падающим телом с энергией до 50 Дж.

1. Материалы, образцы и технология производства

Основной материал сетчатого каркаса — однонаправленный углепластик, содержащий высокопрочные волокна HTA40 E13 6K 400 tex ([12] Teijin Carbon, Япония) и терморективную матрицу на основе эпоксидной смолы ЭХД-МД ([13] ЦНИИСМ, Россия). Объёмная доля волокон в ребрах не превышает 40%, поскольку технология изготовления сетчатого каркаса — намотка жгута из углеродных волокон, пропитанного смолой, на оправку, содержащую спиральные и кольцевые канавки. Эти канавки имеют неизменную глубину и ширину, поэтому в узлах пересечения канавок происходит удвоение объёмной доли до предельно возможного значения ~80%. Эта технология успешно используется в космических конструкциях [14] и адаптирована для авиационной конструкции в рамках программы FP7 POLARBEAR [15] в 2015 году.

Механические свойства углепластика (трансверсально-изотропный материал), экспериментально определённые в ЦНИИСМ, следующие: модули упругости в направлении волокон и в плоскости изотропии $E_1 = 102$ ГПа, $E_2 = 8$ ГПа; модуль сдвига в плоскости 12 $G_{12} = 3$ ГПа; $G_{23} = 2,9$ ГПа; коэффициенты Пуассона при нагружении в направлении волокон и в плоскости изотропии $\mu_{12} = 0,3$, $\mu_{23} = 0,4$; плотность $\rho = 1,44$ г/см³. Прочностные характеристики углепластика: $F_{1t} = 1500$ МПа, $F_{2t} = 40$ МПа, $F_{1c} = 800$ МПа, $F_{2c} = 100$ МПа, $F_{12} = 60$ МПа.

Важно отметить, что в направлении, ортогональном волокнам, деформации разрушения композита весьма малы и составляют $\varepsilon_2 \approx F_{2t} / E_2 = 40/8000 = 0,05\%$.

В качестве энергопоглощающего материала выбран термопласт АБС (акрил бутадиен стирол). Детали сложной формы из него (демпфирующие прокладки) произведены методом 3D-печати из заготовки в виде филамента диаметром 1,75 мм (производитель Picaso-3D [16], Россия) на принтере Picaso Designer Pro 3D [17]). Механические свойства АБС-пластика при статических испытаниях следующие [18]: $E = 2,20$ ГПа, $\mu = 0,35$, предел текучести $\sigma_y = 41$ МПа, модуль упрочнения $E_t = 0,02$ ГПа, $\rho = 1,05$ г/см³.

На рис. 2 приведены X-образные образцы-фрагменты сетчатого каркаса и прокладки из АБС-пластика. Образцы-фрагменты имели рёбра из однонаправленного углепластика размером $250 \times 8 \times 8$ мм, а прокладки —

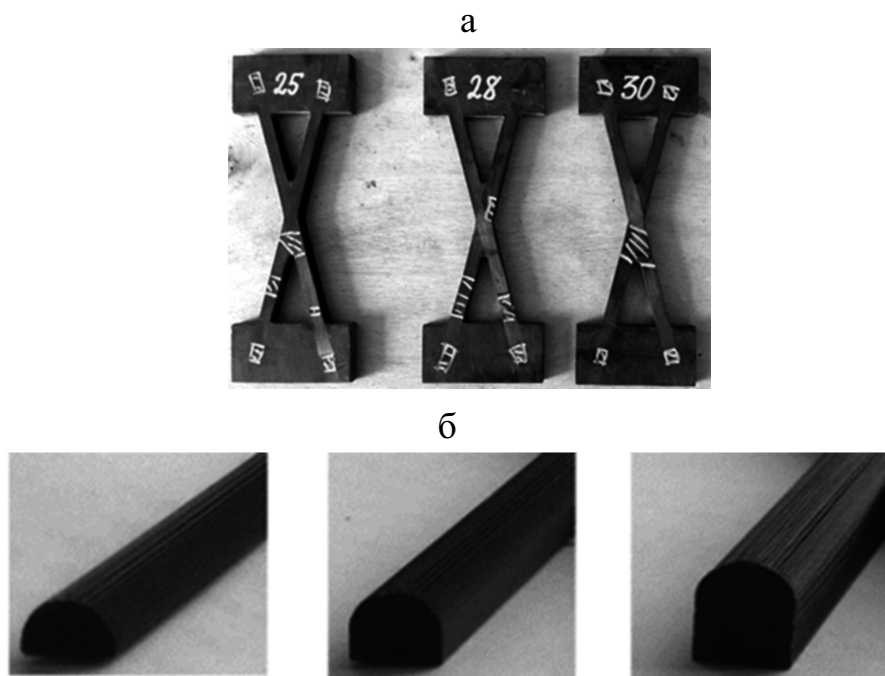


Рис. 2. Фрагменты сетчатого каркаса $250 \times 90 \times 8$ мм (а) и защитные прокладки из АБС-пластика шириной 8 мм и высотой 4, 6 и 8 мм соответственно (б).

200×8×4 (6 или 8) мм. Концы ребер углепластика залиты эпоксидным компаундом в области размером 40×90 мм, обеспечивая совместную работу при испытаниях. Угол между осями ребер равен 30°.

2. Математическое моделирование процесса удара (МКЭ)

Моделирование ударного нагружения X-образного фрагмента крупногабаритной конструкции требует корректного задания граничных условий, обеспечивающих эквивалентность такой упрощённой задачи с задачей удара по полноразмерной оболочке. Иными словами, необходимо в расчётах (и затем в экспериментах) правильно задать эквивалентную жёсткость основания. Для расчёта жёсткости изогридный сетчатый каркас (см. рис. 1) диаметром 2 м и толщиной 8 мм был заменен эквивалентной изотропной оболочкой толщиной 8 мм с осреднёнными по правилу смеси упругими свойствами $E_{\text{eqv}} = E_1 \cdot V_{\text{ribs}} / 3$. Согласно классической теории слоистых пластин эта формула точна для квазиизотропных укладок слоёв, у которых $E_1 \gg E_2$, G_{12} (см. данные выше). Здесь E_1 — модуль упругости углепластика вдоль волокон, V_{ribs} — “объёмная доля” ребер в эквивалентной сплошной оболочке. В изогридной оболочке расстояние между ребрами равно $A = 120$ мм. Тогда при ширине ребер $b = 8$ мм $V_{\text{ribs}} = A / b = 8 / 120 = 0,067$. Отсюда следует, что $E_{\text{eqv}} = E_1 \cdot V_{\text{ribs}} / 3 = 102 \cdot 0,067 / 3 \approx 2,3$ ГПа. Плотность эквивалентной оболочки $\rho_{\text{eqv}} = \rho \cdot V_{\text{ribs}} = 1440 \cdot 0,067 = 96$ кг/м³.

Далее рассмотрим ударное нагружение по гладкой оболочке с энергией 50 Дж (диаметр стального шара 2 дюйма, масса 538 г, скорость 13 м/с) в пакете ANSYS (явная динамическая формулировка). 3D-модель оболочки и сетка конечных элементов со сгущением в зоне удара показаны на рис.3.

Эквивалентная сплошная оболочка (см. рис. 3) при ударном нагружении деформируется локально. К моменту начала отскока (время 2,0 мс) шара перемещение составляет 20,6 мм (рис. 4), расчётное максимальное

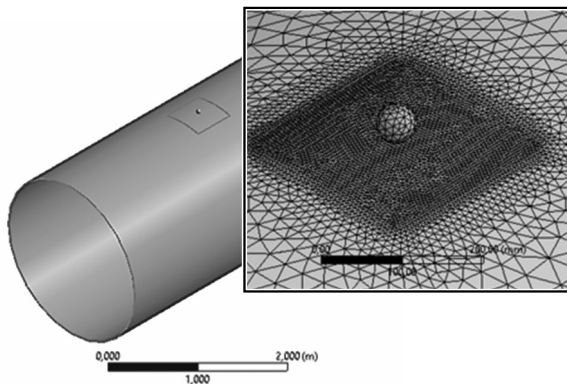


Рис. 3. Сплошная оболочка и фрагмент сетки КЭ.

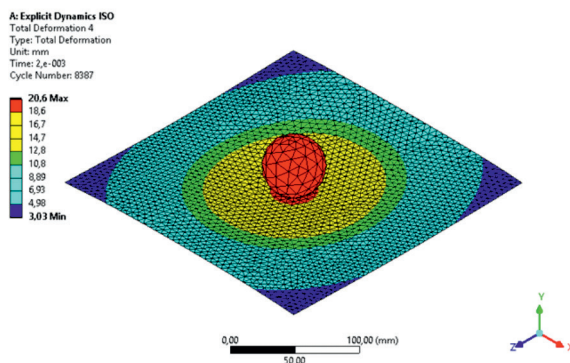


Рис. 4. Картина перемещений в оболочке для времени 2 мс.

контактное усилие равно 4,2 кН (рис. 5). Усилие в контакте определено умножением массы ударника на ускорение, полученное дифференцированием средней скорости ударника. Такой метод обработки обусловлен большими осцилляциями ускорения, получаемого в процессе расчёта МКЭ, из-за волновых эффектов по толщине образца.

Учитывая близкий к линейному закон возрастания усилия P и перемещения U (см. рис. 5), можно определить эквивалентную квазистатическую жёсткость фрагмента оболочки размером 250×250 мм при контакте $C = P / U \approx 5 / 25 = 0,20$ кН/мм. Эта величина будет необходима далее для назначения жёсткости упругого основания в ходе расчётов динамики деформирования фрагмента сетчатой оболочки при ударе индентором.

Стоит обратить внимание на то, что контактное усилие в начале процесса не равно нулю. Это произошло потому, что для вычисления усилия контакта использовали произведение ускорения на массу ударника. Ускорение получали дифференцированием средней скорости ударника, которую аппроксимировали полиномом. В полиноме линейный член был

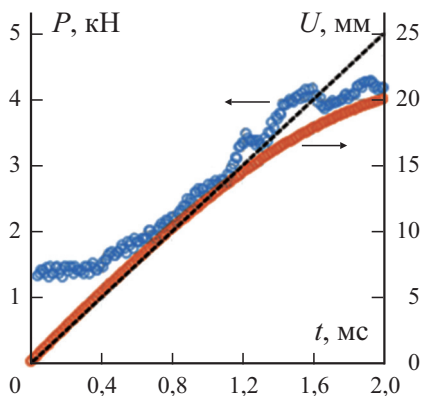


Рис. 5. Усилие и перемещение в контакте сферы с оболочкой в функции времени. (---) — линейная аппроксимация.

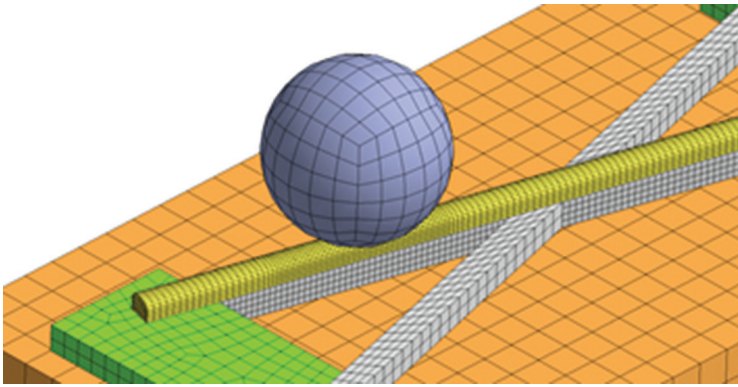


Рис. 6. Трёхмерная модель с сеткой конечных элементов.

небольшим, но ненулевым. Среднее ускорение ударника, выдаваемое ANSYS напрямую, имело значительные осцилляции из-за волновых процессов по толщине образца при отсутствии искусственного демпфирования.

Для имитации удара с энергией 50 Дж по X-образному фрагменту на рис. 6 приведена трехмерная модель с сеткой конечных элементов. Здесь жёлтым показана защитная прокладка, серым — ребра, зелёным — заливка концов ребер эпоксидным компаундом, коричневым — упругое основание ($300 \times 150 \times 50$ мм).

Конечно-элементное моделирование проведено со стандартными установками явного решателя “по умолчанию”. Объёмные конечные элементы имели одну точку интегрирования, подложка X-образного фрагмента выполнена из упругого материала и располагалась на жёстком основании. В X-образном фрагменте все контактные пары имели тип ‘bonded’ (склейка, алгоритм поверхность—поверхность). Расчётное время выбирали из условия включения первой контактной фазы с максимальными контактными напряжениями. Это составило около 1 мс, при

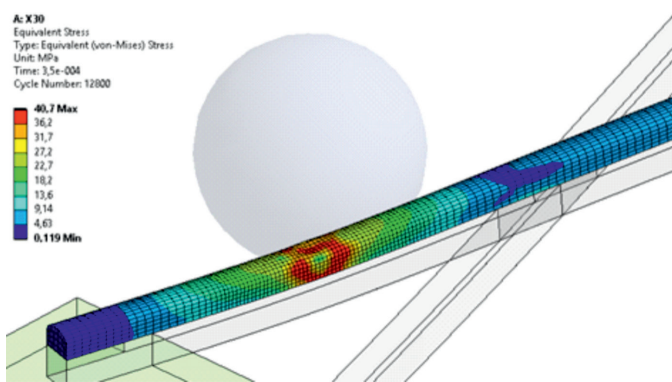


Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений в защитной прокладке ($t = 0,35$ мс).

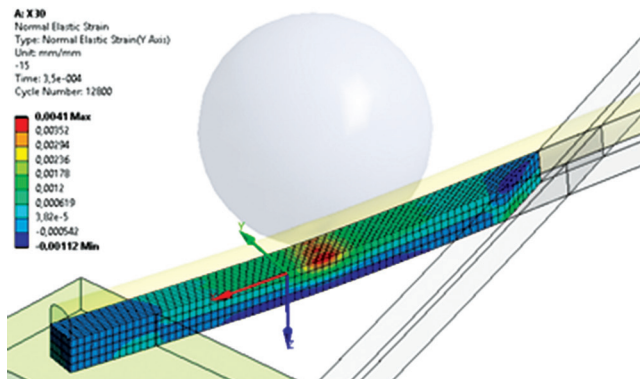


Рис. 8. Распределение поперечных деформаций ε_y в ребре ($t = 0,35$ мс).

этом процессорное время составило около 60 мин (использован много-процессорный кластер с 10 ядрами).

Распределение эквивалентных по Мизесу напряжений в защитной прокладке (рис. 7), поперечных деформаций в ребре (рис. 8) и перемещений (рис. 9) показано в критический момент времени $t = 0,35$ мс (в этот момент времени поперечные деформации достигают наибольшего значения 0,41%).

Получено, что прокладка толщиной 6 мм способна защитить ребро сетчатой оболочки из однонаправленного углепластика от удара с энергией 50 Дж. Повреждений поперек волокон при этом не произойдет, так как максимальные поперечные деформации в процессе удара составляют около 0,4%. Вес такой прокладки — около 85% от веса ребра.

Для подтверждения достоверности расчётов можно указать, что энергия песочных часов (hourglass energy) составляла менее 1% от общей энергии системы в каждом расчётном случае.

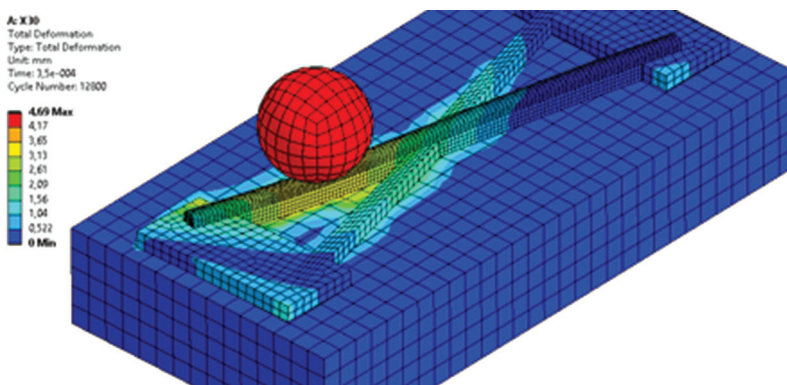


Рис. 9. Распределение перемещений ($t = 0,35$ мс).

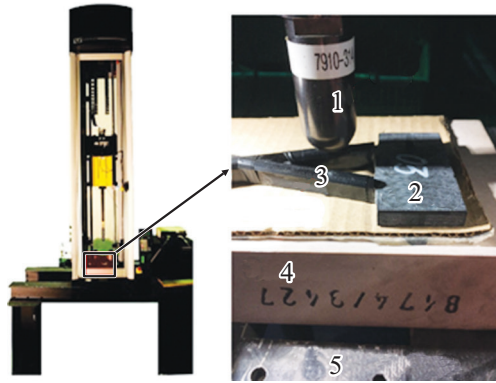


Рис. 10. Копер Instron DynaTup 9250 HV и схема испытаний [20]: 1 — боёк; 2 — образец; 3 — защитная прокладка; 4 — подложка; 5 — испытательный стол.

3. Экспериментальные исследования (механические испытания, удар, дефектоскопия)

При ударных испытаниях фрагмента сетчатой оболочки на копре с падающим грузом (рис. 10) в качестве подложки предложено использовать слой гофрокартона СОТОКОМ (поставщик КАТФУЛ [19]) суммарной толщиной 50 мм. Этот слой при сжатии X-образного фрагмента сетчатой оболочки на испытательной машине даёт жёсткость $C \approx 0,205$ кН/мм, обеспечивая близкие к требуемым максимальное перемещение ударника и контактное усилие.

При испытаниях защитные элементы из АБС-пластика были закреплены на ребрах оборачиванием самоклеющейся ПХВ-лентой толщиной 100 мкм. Испытания проведены при энергии удара от 10 до 50 Дж. На рис. 11 приведены фотографии образцов после испытаний. Ударные

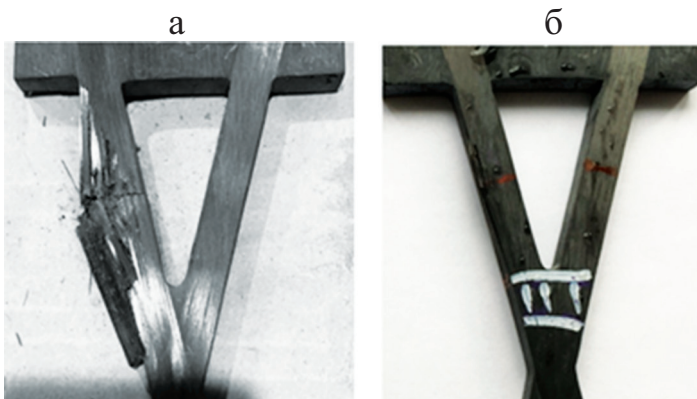


Рис. 11. X-образные образцы после испытаний при ударе 30 Дж: без защитной прокладки (а) и с прокладкой толщиной 4 мм (б).

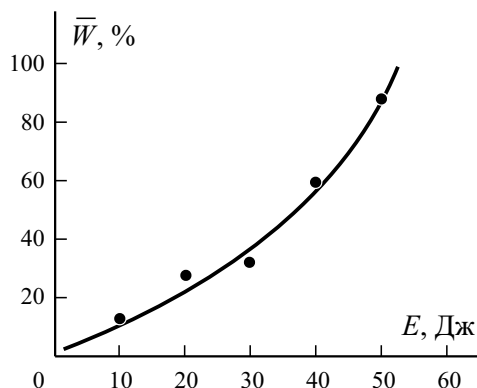


Рис. 12. Вес защитных элементов W (% от веса ребра), необходимый для обеспечения полной защиты ребра в зависимости от энергии удара. Точки — эксперимент.

испытания завершались исследованием повреждения образцов визуальным осмотром на предмет наружных трещин и ультразвуковым контролем (прибор SiteScan D-20 [21]).

На рис. 12 приведена зависимость веса защитных элементов, необходимых для обеспечения полной защиты (без внутренних повреждений ребра), от энергии падающего тела. Данная зависимость представляет собой аппроксимацию, полученную по экспериментальным данным, приведенным на графике. Экспериментальные значения для каждой точки были получены следующим образом. Образец с защитной прокладкой подвергался ударному воздействию с выбранным уровнем энергии по описанному методу, после чего проводили его неразрушающий контроль. В случае, если повреждения после удара не были обнаружены, образец подвергался сжимающему воздействию для определения остаточного модуля упругости (стандарт ASTM D7012). Если модуль упругости образца совпадал с неповрежденным в пределах погрешности $\pm 5\%$, он считался полностью неповрежденным. В этом случае испытания повторялись с аналогичным образцом на больший уровень энергии удара. В случае, если повреждения образца были незначительны, уменьшали толщину защитной прокладки и испытания повторялись для того же уровня энергии удара. Для каждого из испытанных образцов проводили взвешивание защитных элементов.

Получено, что для полной защиты однонаправленного композитного ребра от “сертификационного” удара с энергией 50 Дж потребуется “добавить” около 90% веса за счёт защитной прокладки (согласуется с результатами расчётов, п.2). Для защиты от удара 35 Дж необходима прокладка весом лишь 40% от веса ребра.

Выводы и задачи на будущее

По результатам проведенных расчётных и экспериментальных исследований эффективности защиты ребер сетчатой силовой структуры фюзеляжа

самолёта из однонаправленного углепластика от ударных воздействий, сделаны следующие выводы:

— установка защитной прокладки из АБС-термопласта позволяет обеспечить большее время контактного взаимодействия (растянуть ударный импульс) по сравнению с ударом без защиты, снизить контактные усилия и обеспечить высокий уровень защиты ребер от ударных повреждений;

— для полной защиты однонаправленного композитного ребра от “сертификационного” удара с энергией 50 Дж потребуется защитная прокладка весом около 90% от веса ребра, а для защиты от удара 35 Дж — лишь 40% от веса ребра;

— использование более сложной формы прокладки или выполнение 3D-печати с программируемыми внутренними полостями могут привести к снижению массы прокладки при сохранении необходимого уровня защиты.

Работа подготовлена в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня “Сверхзвук” на 2020—2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от 8 декабря 2020 г. № 075-11-2020-023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *David J. P., Azar J. J.* Aircraft structures. — 2nd ed. — 1982.
2. *Sun C. T., Adnan A.* Mechanics of aircraft structures. — John Wiley & Sons, 2021.
3. *Lang N. C., Kwon Y. W.* Investigation of the effect of metallic fuselage dents on compressive failure loads // *J. Aircraft.* — 2007. — Vol. 44, No. 6. — P. 2026—2033.
4. *Anghileri M. et al.* A survey of numerical models for hail impact analysis using explicit finite element codes // *Int. J. Impact Eng.* — 2005. — Vol. 31, No. 8. — P. 929—944.
5. *Zhou J. et al.* Low-velocity impact behavior and residual tensile strength of CFRP laminates // *Composites: Part B.* — 2019. — Vol. 161. — P. 300—313.
6. *Brostow W., Lobland H. E. H.* Brittleness of materials: implications for composites and a relation to impact strength // *J. Mater. Sci.* — 2010. — Vol. 45, No. 1. — P. 242—250.
7. *Lindsay T. C.* Designing composite structures for low-velocity impact. — Delaware Univ. Newark Center for Composite Materials, 1990.
8. *Heimbs S. et al.* Low velocity impact on CFRP plates with compressive preload: test and modelling // *Int. J. Impact Eng.* — 2009. — Vol. 36, No. 10—11. — P. 1182—1193.
9. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2558493C1/en> (дата обращения: 12.07.2021)
10. *Zhang B. et al.* Blast response of hierarchical anisogrid stiffened composite panel: considering the damping effect // *Int. J. Mech. Sci.* — 2018. — Vol. 140. — P. 250—259.
11. *Baker D. et al.* Optimal design and damage tolerance verification of an isogrid structure for helicopter application // 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conf. — 2004. — P. 1502.
12. URL: https://www.tejincarbon.com/fileadmin/PDF/Datenbl%C3%A4tter_en/Product_Data_Sheet_TSG01en_EU_Filament_.pdf (дата обращения 12.07.2021)
13. *Molochov V. P.* Development of composite pressure vessels for space applications // *Mech. Compos. Mater. Constr.* — 2010. — Vol. 16, No. 4. — P. 587—596.

14. *Vasiliev V. V., Barynin V. A., Razin A. F.* Anisogrid composite lattice structures—Development and aerospace applications // *Compos. Struct.* — 2012. — Vol. 94, No. 3. — P. 1117—1127.

15. *Dubovikov E., Fomin V., Glebova M.* Damage tolerance and repair of UD-ribs of lattice composite fuselage structures // 30th Congr. Int. Council Aeronautical Sci. — 2016.

16. URL: <https://picaso-3d.ru/ru/> (дата обращения 12.07.2021)

17. URL: <https://picaso-3d.ru/ru/products/designer-pro-250/> (дата обращения 12.07.2021).

18. *Sapozhnikov S. B. et al.* Experimental and FEM short-term tensile strength assessment of U-and sharp V-notched specimens made of ductile material // *PNRPU Mech. Bullet.* — 2018. — No. 2. — P. 96—106.

19. URL: <http://cartful.ru/> (дата обращения 12.07.2021)

20. URL: <https://www.metrologyworld.com/doc/dynatup-9250-impact-tester-0001> (дата обращения 12.07.2021)

21. URL: https://sonatest.com/application/files/6015/0530/5482/Sitescan_D_Series_brochure.pdf (дата обращения 12.07.2021)

Поступила в редакцию 24.08.2021

Окончательный вариант поступил 22.11.2021

Received Aug. 24, 2021 (Nov. 22, 2021)
