



УДК620.172/.178.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-12-12

**РАЗДИР ПО МОДЕ III ТОНКОЛИСТОВЫХ
ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

Н.О. Яковлев

кандидат технических наук

В.С. Ерасов

кандидат технических наук

Ю.О. Попов

Т.В. Колокольцева

Июнь 2014

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Н.О. Яковлев¹, В.С. Ерасов¹, Ю.О. Попов¹, Т.В. Колокольцева¹

РАЗДИР ПО МОДЕ III ТОНКОЛИСТОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Для тонколистовых (0,30–0,47 мм) слоистых (2–4 слоя) полимерных композиционных материалов с различными схемами укладки слоев, включая несимметричные, на образцах с концентратором напряжений, созданным с помощью разреза, получены сопротивления раздиру (мода III), проанализирован характер разрушений.

Ключевые слова: *полимерный композиционный материал, стеклопластик, сопротивление раздиру, мода III, стеклоткань, ровинг.*

N.O. Yakovlev, V.S. Erasov, J.O. Popov, T.V. Kolokoltseva

TEAR (MODE III) OF THIN LAMINATE POLYMER COMPOSITE MATERIALS FOR AIRCRAFT

For with thin (0,30–0,47 mm) layered (2–4 layers) polymer composite materials with different ply orientation direction, including single-ended, on samples with a stress concentrator, created the cut, determined the tear resistance (mode III), analyze the fracture behavior.

Keywords: *polymer composites, glass fibre plastics, tear resistance, mode III, fiberglass, roving.*

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Слоистые полимерные композиционные материалы (ПКМ), в том числе тонколистовые, находят все более широкое применение в изделиях авиационной техники [1–6]. Они входят в состав слоистых гибридных материалов, таких как СИАЛ и GLARE, в которых тонкие листы (0,3–0,5 мм) алюминиевых конструкционных сплавов чередуются со слоями стеклопластика толщиной 0,2–0,5 мм на основе клеевых препрегов, армированных высокопрочными стеклонеполнителями [7, 8]. Слоистые ПКМ, например боропластики, толщиной до 1 мм применяются в ремонтных технологиях для

стабилизации трещин в алюминиевых сплавах за счет снижения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в вершине трещины [9, 10]. Слоистые тонколистовые ПКМ применяются также для элементов конструкций современной авиационной техники (АТ) [11, 12], например обшивок разрезных хвостовых секций лопастей несущего винта вертолета.

В элементах конструкций слоистые тонколистовые ПКМ подвергаются сложному нагружению, сочетающему в зависимости от условий эксплуатации в различной степени I, II и III *моды* нагружения в вершине трещины. В связи с этим для обоснованного применения тонколистовых ПКМ в изделиях АТ требуется всестороннее исследование их физико-механических свойств [13, 14].

Методы определения физико-механических характеристик тонколистовых материалов при их нагружении по *модам* I, II и III хорошо отработаны для металлических фольг [15–17]. Для неметаллических тонколистовых материалов – тканей, полимерных пленок, бумаг – разработаны и широко применяются стандарты для определения такой характеристики, как сопротивление раздиру. К ним относятся ГОСТ 30304, ГОСТ 26128, ГОСТ 23016, ГОСТ 13525.3 и др., предлагающие различные типы образцов и методы испытаний для определения указанной характеристики.

Наиболее простым методом для определения сопротивления раздиру является метод, описанный в ГОСТ 30304 и ГОСТ 26128, в котором образец в форме полоски с центральным надрезом (рис. 1, а) нагружается по схеме, показанной на рис. 1, б.

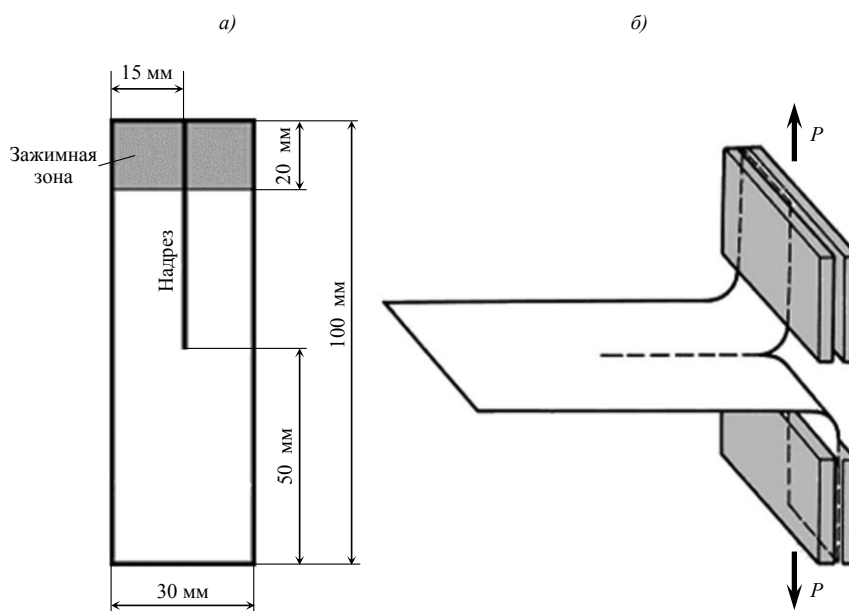


Рисунок 1. Геометрические размеры (а) и схема нагружения (б) образца для испытания на раздир

В данной работе получены значения сопротивлений раздиру по *моде* III в трех основных направлениях (0, 90, 45 град по отношению к главному направлению армирования) для различных тонколистовых слоистых ПКМ толщиной до 0,5 мм, применяемых в изделиях АТ.

Методика и образцы

Для исследований выбраны тонколистовые слоистые ПКМ на основе органических и стеклянных волокон [18]. Схемы армирования, материалы слоев и толщины представлены в табл. 1.

Таблица 1

Данные по полимерным композиционным материалам (ПКМ)

Тип материала	Состав (тип армирующего наполнителя) и структура армирования материала	Толщина, мм
Органопластик	Органит 11ТЛ [0°] ₄ (ткань СВТ, полимерная матрица ВК-36Р)	0,47
Стеклопластик	T-64 [0°]/T-64 [45°]/T-64 [-45°]/T-64 [0°]	0,37
	T-64 [45°]/РВМПН-600-14 [0°]/T-64 [-45°]	0,32
	T-64 [90°]/РВМПН-600-14 [0°]/T-64 [90°]	0,35
	T-64 [0°]/РВМПН-600-14 [0°]/T-64 [90°]	0,33
	РВМПН-600-14 [0°]/РВМПН-600-14 [90°]	0,32
	РВМПН-600-14 [0°]/РВМПН-600-14 [90°]/РВМПН-600-14 [0°]	0,39

Образец в форме полоски размером 100×30 мм с центральным надрезом (см. рис. 1, а) вырезали в одном из направлений (0, 90 или 45 град по отношению к главному направлению армирования материала). Испытания проводились на универсальной электромеханической испытательной машине Zwick/Roell Z100 при комнатной температуре и постоянной скорости нагружения 5 мм/мин. Перед началом испытаний к образцам прикладывалась преднагрузка от 4 до 10 Н в зависимости от нагрузки раздира.

Результаты

Все полученные при испытаниях диаграммы раздира можно условно разделить на три типа. *Первый тип* – диаграммы, имеющие стадию установившегося равномерного раздира (рис. 2, а). По такому типу разрушались образцы 1-1, 1-2, 1-3, 2-1, 4-1, 5-1, 6-1, 7-1, 7-2 и 7-3 (табл. 2). Для них сопротивление раздиру определялось как

$$\tau = \frac{F}{t}, \quad (1)$$

где F – среднее значение нагрузки на участке установившегося раздира, Н; t – толщина образца, мм.

Второй тип – диаграммы с возрастающей, в том числе ступенчатой нагрузкой, включая диаграммы с последующим резким разрушением (рис. 2, б). По такому типу разрушались образцы 3-1, 4-2, 4-3, 6-2 и 6-3. *Третий тип* – ступенчатые диаграммы с

максимумом в начале и последующим ступенчатым спадом нагрузки по мере роста трещины (рис. 2, в) По такому типу разрушались образцы 2-2, 2-3, 3-2, 3-3, 5-2 и 5-3. Для второго и третьего типов диаграмм условное сопротивление раздиру рассчитывалось по формуле (1), где в качестве нагрузки принимались значения первых максимумов. Полученные значения сопротивлений раздиру в зависимости от ориентации начального надреза относительно главных направлений армирования материалов показаны на рис. 3. Видно, что наиболее сбалансированным материалом является Органит 11ТЛ, для которого величина сопротивления раздиру не зависит от направления распространения трещины. Менее сбалансированным оказался трехслойный гибридный материал со схемой армирования Т-64 [45°]/РВМПН-600-14 [0°]/Т-64 [-45°], у которого сопротивления раздиру в направлениях начального надреза 0 и 45 град оказались на ~25% меньше, чем у Органита 11ТЛ, а в направлении 90 град – на ~60% выше.

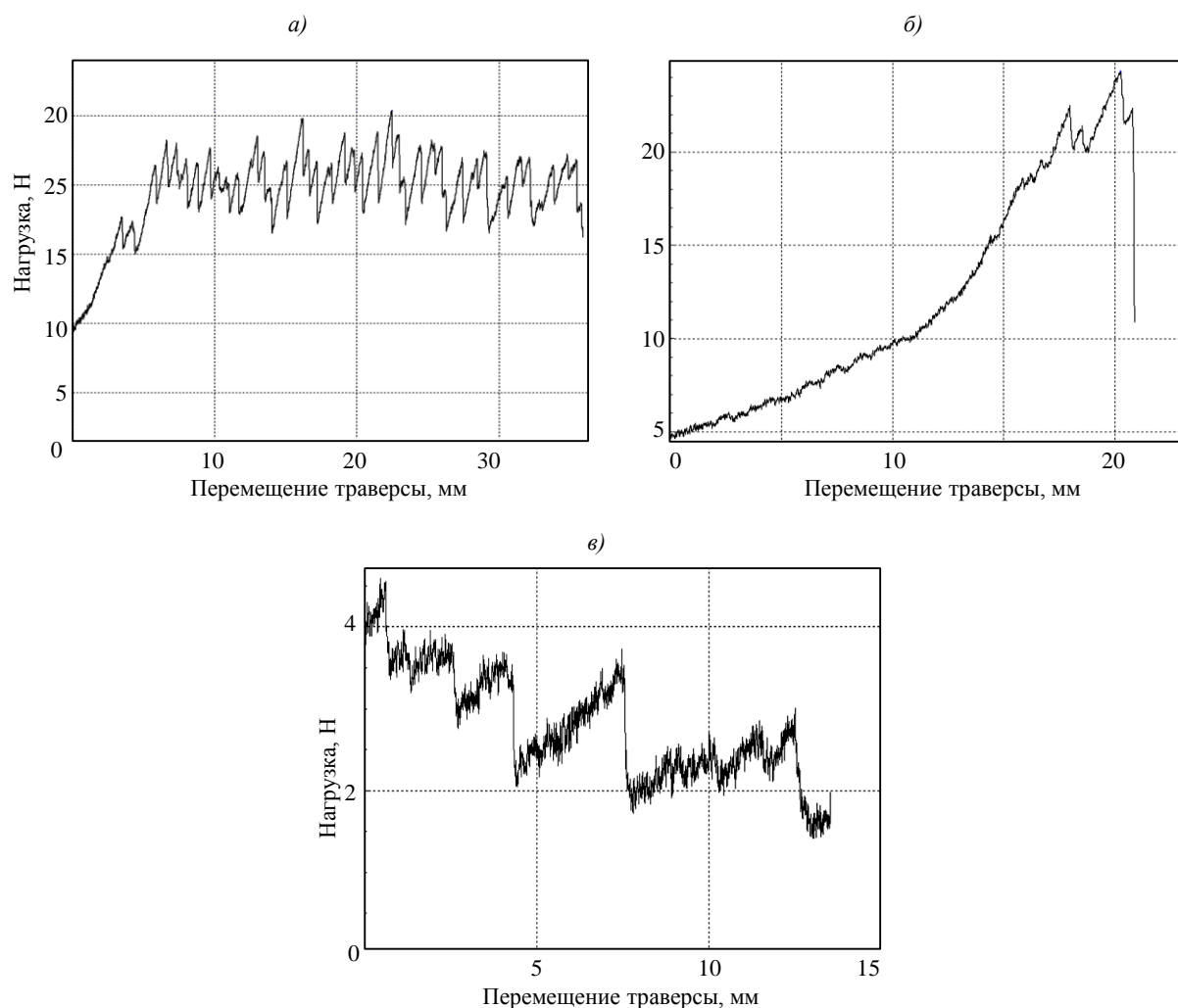

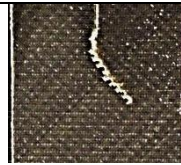






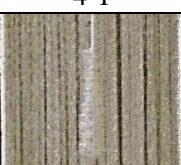
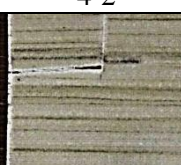




Рисунок 2. Диаграммы при раздире тонколистовых слоистых полимерных композиционных материалов различных типов: 1 (а), 2 (б), 3 (в) – см. текст

Таблица 2

**Типы разрушения тонколистовых полимерных композиционных материалов (ПКМ)
при раздире**

Состав и структура армирования материала	Направление начального надреза		
	[0°]	[90°]	[45°]
Органопластик Органит 11ТЛ	 1-1	 1-2	 1-3
Стеклопластик на основе ткани Т-64 [0°]/Т-64 [±45°]/Т-64 [0°]	 2-1	 2-2	 2-3
Стеклопластики с комбинированным наполнителем			
Т-64 [45°]/РВМПН-600-14 [0°]/Т-64 [-45°]	 3-1	 3-2	 3-3
Т-64 [90°]/РВМПН-600-14[0°]/Т-64 [90°]	 4-1	 4-2	 4-3
Т-64 [0°]/РВМПН-600-14[0°]/Т-64 [90°]	 5-1	 5-2	 5-3
Стеклопластики на основе ровинга			
РВМПН-600-14[0°]/РВМПН-600-14[90°]	 6-1	 6-2	 6-3

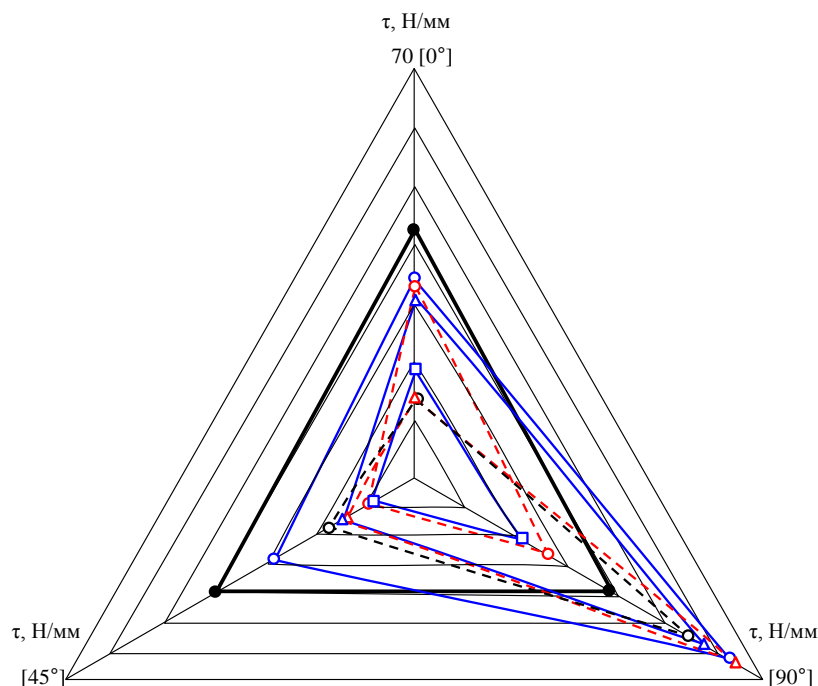
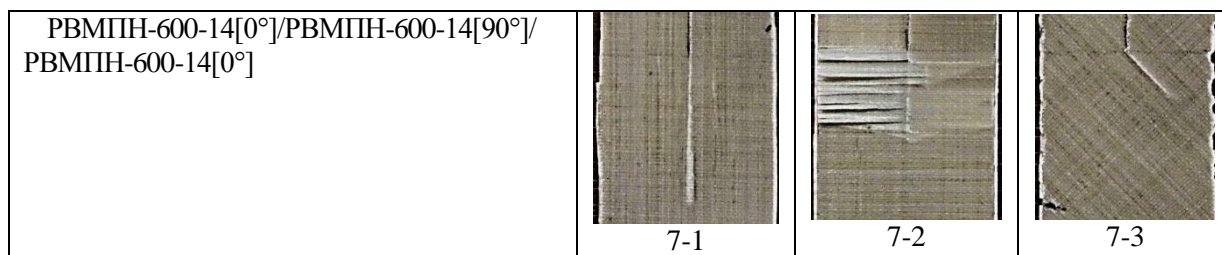


Рисунок 3. Зависимость прочности при раздире от направления начального надреза для органопластика Органит 11ТЛ (●) и стеклопластиков со схемами армирования Т-64 [45°]/РВМПН-600-14 [0°]/Т-64 [-45°] (○), Т-64 [0°]/РВМПН-600-14 [0°]/Т-64 [90°] (□), РВМПН-600-14[0°]/РВМПН-600-14[90°]/РВМПН-600-14[0°] (Δ), Т-64[0°]/Т-64[±45°]/Т-64[0°] (○), Т-64 [90°]/РВМПН-600-14[0°]/Т-64 [90°] (Δ), РВМПН-600-14[0°]/РВМПН-600-14[90°] (○)

Остальные материалы оказались значительно более разбалансированными, например, для материала РВМПН-600-14 [0°]/РВМПН-600-14 [90°]/РВМПН-600-14 [0°] сопротивления раздиру в направлениях 0 и 90 град различаются более чем в 3 раза, или имеющими значительно более низкий уровень сопротивлений раздиру, например, у материала Т-64 [0°]/РВМПН-600-14 [0°]/Т-64 [90°] данные характеристики во всех направлениях ниже более чем в 2 раза, чем у Органита 11ТЛ.

Совместный анализ диаграмм деформирования и характера разрушения образцов показывает, что для образцов, в схеме укладки слоев которых присутствуют слои, ориентированные в направлениях ±45 град, таких как стеклопластики со схемами армирования Т-64 [0°]/Т-64 [±45°]/Т-64 [0°] и Т-64 [45°]/РВМПН-600-14 [0°]/Т-64 [-45°], при раздире в направлениях 0 и 45 град (образцы 2-2, 2-3, 3-2, 3-3) происходит поворот

трещины на 90 град от направления начального надреза, что сопровождается падением нагрузки на диаграмме.

В то же время для направления 0 град начальной трещины в материалах со схемой армирования Т-64 [45°]/РВМПН-600-14 [0°]/Т-64 [-45°] (образец 3-1) происходит равномерный рост площади расслоения за счет отрыва верхнего слоя от слоя материала РВМПН-600-14, сопровождающийся ростом нагрузки на диаграмме деформирования. Такой же вид разрушения наблюдается для двухслойного стеклопластика РВМПН-600-14 [0°]/РВМПН-600-14 [90°] при ориентации начального надреза в направлениях 45 и 90 град (образцы 6-2 и 6-3). Для образцов 4-2, 4-3 и 5-2 из стеклопластиков со схемами армирования Т-64 [90°]/РВМПН-600-14 [0°]/Т-64 [90°] и Т-64 [0°]/РВМПН-600-14 [0°]/Т-64 [90°] наблюдается незначительный рост трещины раздира, после чего происходит разрушение образца с распространением трещины перпендикулярно начальному направлению надреза. Диаграмма деформирования при этом имеет резкий спад. Для образцов 1-1, 1-2, 1-3, 2-1, 4-1, 5-1, 7-1 и 7-3 наблюдался устойчивый равномерный рост трещины раздира со стадией равномерного раздира на диаграмме деформирования (см. рис. 2, а). В случае образца 5-3 устойчивый равномерный рост трещины раздира сопровождался снижением нагрузки на диаграмме. Сложный характер разрушения имели образцы 6-1 и 7-2 из стеклопластиков на основе ровинга РВМПН-600-14, в которых распространение магистральной трещины совпадало с направлением начального надреза и сопровождалось сегментарным отслоением верхнего слоя с образованием в нем трещин, перпендикулярных магистральной.

Таким образом, значения сопротивления раздиру тонколистовых слоистых ПКМ на основе органических и стеклянных волокон при раздире по *моде* III дают дополнительную информацию для обоснованного выбора материалов при проектировании элементов конструкций АТ, выборе материалов для ремонтных технологий, проектирования и создания новых слоистых, в том числе гибридных, материалов, а полученные типы разрушений – для определения возможных причин разрушения тонколистовых ПКМ при эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов И.И., Раскутин А.Е. Углепластики и стеклопластики нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. №4 (viam-works.ru).
2. Гуняев Г.М., Кривонос В.В., Румянцев А.Ф., Железина Г.Ф. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов //Конверсия в машиностроении. 2004. №4 (65). С. 65–69.

3. Попов Ю.О., Колокольцева Т.В., Беспалова Л.С., Хрульков А.В., Коган Д.И. Стеклопластик ВПС-31 и гибридный композиционный материал ВКГ-5 из однонаправленных препрегов на основе расплавленного связующего и жгутовых угле-, стеклонаполнителей // В сб. *Авиационные материалы и технологии*. 2006. №1. С. 10–20.
4. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 7–17.
5. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 231–242.
6. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Стеклопластики – многофункциональные композиционные материалы // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 253–260.
7. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф., Сидельников В.В., Шестов В.В. Слоистые металлополимерные композиционные материалы // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 226–230.
8. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В. Исследование пожаростойкости слоистых гибридных алюмокомпозитов класса СИАЛ // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №3. С. 36–41.
9. Linxia Gu, Ananth Ram, Mahanth Kasavajhala, Shijia Zhao. Finite element analysis of cracks in aging aircraft structures with bonded // *Composites: Part B*. 2011. №42. С. 505–510.
10. Bachir Bouiadjra B., Ouinas D., Serier B., Benderdouche N. Disbond effects on bonded boron/epoxy composite repair to aluminium plates // *Computational Materials Science*. 2008. №42. С. 220–227.
11. Железина Г.Ф. Конструкционные и функциональные органопластики нового поколения // *Труды ВИАМ*. 2013. №4 (viam-works.ru).
12. Железина Г.Ф., Войнов С.И., Плетинь П.И., Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А. Разработка и производство конструкционных органопластиков для авиационной техники // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. №4–2. С. 411–416.
13. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 440–448.
14. Железина Г.Ф. Особенности разрушения органопластиков при ударных воздействиях // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 272–277.

15. Крылов В.Д. Методы испытаний и особенности разрушения тонколистовых материалов //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 54–57.
16. Яковлев Н.О., Чернаткин С.Е., Кузько Е.И., Арсенкин А.М., Штремель М.А. Определение сопротивления K_{III} раздиру тонких листов //Заводская лаборатория. 2008. Т. 74. №5. С. 54–57.
17. Чернаткин С.Е., Яковлев Н.О., Кузько Е.И., Штремель М.А. Соотношения подобия при разрушении тонколистовых материалов //Физика металлов и металловедение. 2009. Т. 108. №2. С. 217–221.
18. Бородулин А.С. Свойства и особенности структур стеклянных волокон, используемых для изготовления стеклопластиков //Материаловедение. 2012. №7. С. 34–37.

REFERENCES LIST

1. Sokolov I.I., Raskutin A.E. Ugleplastiki i stekloplastiki novogo pokolenija [Carbon and fiberglass new generation] //Trudy VIAM. 2013. №4 (viam-works.ru).
2. Gunjaev G.M., Krivonos V.V., Rumjancev A.F., Zhelezina G.F. Polimernye kompozicionnye materialy v konstrukcijah letatel'nyh apparatov [Polymer composite materials in aircraft structures] //Konversija v mashinostroenii. 2004. №4 (65). S. 65–69.
3. Popov Ju.O., Kolokol'ceva T.V., Bepalova L.S., Hrul'kov A.V., Kogan D.I. Stekloplastik VPS-31 i gibridnyj kompozicionnyj material VKG-5 iz odnonapravlennyh prepregov na osnove rasplavnogo svjazujushhego i zhgutovyh ugle-, steklonapolnitelej [Fiberglass AMS-31 and hybrid composite VCG-5 of unidirectional prepregs based on a melt binder and carbon roving, glass] //V sb. Aviacionnye materialy i tehnologii. 2006. №1. S. 10–20.
4. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
5. Grashhenkov D.V., Chursova L.V. Strategija razvitija kompozicionnyh i funkcional'nyh materialov [Development Strategy composite and functional materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 231–242.
6. Davydova I.F., Kavun N.S. Stekloplastiki – mnogofunkcional'nye kompozicionnye materialy [GRP – multifunctional composite materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 253–260.

7. Antipov V.V., Senatorova O.G., Lukina N.F., Sidel'nikov V.V., Shestov V.V. Sloistye metallopolimernye kompozicionnye materialy [Layered metal-composite materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 226–230.
8. Antipov V.V., Senatorova O.G., Sidel'nikov V.V. Issledovanie pozharostojkosti sloistyh gibridnyh aljumostekloplastikov klassa SIAL [Flammability Study of layered hybrid class alyumostekloplastikov Sial] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №3. S. 36–41.
9. Linxia Gu, Ananth Ram, Mahanth Kasavajhala, Shijia Zhao. Finite element analysis of cracks in aging aircraft structures with bonded //Composites: Part B. 2011. №42. S. 505–510.
10. Bachir Bouiadjra B., Ouinas D., Serier B., Benderdouche N. Disbond effects on bonded boron/epoxy composite repair to aluminium plates //Computational Materials Science. 2008. №42. S. 220–227.
11. Zhelezina G.F. Konstrukcionnye i funkcional'nye organoplastiki novogo pokolenija [Structural and Functional organoplastics new generation] //Trudy VIAM. 2013. №4 (viam-works.ru).
12. Zhelezina G.F., Vojnov S.I., Pletin' P.I., Veshkin E.A., Satdinov R.A. Razrabotka i proizvodstvo konstrukcionnyh organoplastikov dlja aviacionnoj tehniki [Development and production of organic plastics for structural aircraft] //Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2012. T. 14. №4–2. S. 411–416.
13. Erasov V.S., Jakovlev N.O., Nuzhnyj G.A. Kvalifikacionnye ispytaniya i issledovanija prochnosti aviacionnyh materialov [Qualification testing and research strength of aircraft materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 440–448.
14. Zhelezina G.F. Osobennosti razrushenija organoplastikov pri udarnyh vozdeystvijah [Features destruction organic plastics under Impact] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 272–277.
15. Krylov V.D. Metody ispytanij i osobennosti razrushenija tonkolistovyh materialov [Test methods and especially the destruction of thin materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №4. S. 54–57.
16. Jakovlev N.O., Chernatkin S.E., Kuz'ko E.I., Arsenkin A.M., Shtremel' M.A. Opredelenie soprotivlenija K_{III} razdiru tonkih listov [Determination of resistance to tearing of thin sheets K_{III}] //Zavodskaja laboratorija. 2008. T. 74. №5. S. 54–57.
17. Chernatkin S.E., Jakovlev N.O., Kuz'ko E.I., Shtremel' M.A. Sootnoshenija podobija pri razrushenii tonkolistovyh materialov [Similarity relations in the destruction of thin materials] //Fizika metallov i metallovedenie. 2009. T. 108. №2. S. 217–221.

18. Borodulin A.S. Svojstva i osobennosti struktur stekljannyh volokon, ispol'zue-myh dlja izgotovlenija stekloplastikov [Properties and features structures of glass fibers used for the manufacture of GRP] //Materialovedenie. 2012. №7. S. 34–37.