



УДК 620.165.79:678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-10-10

**К ВОПРОСУ О ДЕФЕКТАХ ОБРАЗЦОВ
ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ УГЛЕПЛАСТИКОВ**

Ю.В. Столянков

кандидат технических наук

И.В. Исходжанова

Н.В. Антюфеева

кандидат технических наук

Октябрь 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.

Ю.В. Столянков¹, И.В. Исходжанова¹, Н.В. Антюфеева¹

К ВОПРОСУ О ДЕФЕКТАХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ УГЛЕПЛАСТИКОВ

Для оценки прочностных характеристик и свойств полимерных композиционных материалов (ПКМ), в частности углепластиков на основе клеевых эпоксидных связующих и волоконистых углеродных наполнителей, проводят испытания, необходимым этапом которых является изготовление образцов. Образцы, как правило, изготавливают из плит, в свою очередь полученных различными методами формования. Среди множества существующих методов изготовления образцов наиболее распространенным является механическая обработка материала с использованием режущего инструмента. При изучении влияния способа резки на состояние поверхности образцов обнаружено, что, помимо трещин, на поверхности материала отмечены дефекты в виде сколов и другие дефекты, которые в совокупности характеризуют качество реза, а следовательно, в значительной мере определяют и результат испытаний материала. Описаны дефекты области реза, а также проведена их количественная оценка. Предложена методика количественной оценки оптическим металлографическим анализом с использованием компьютерных программ обработки изображений.

Ключевые слова: ПКМ, углепластик, образцы для испытаний, дефекты, количественный металлографический анализ.

Yu. V. Stolyankov, I. V. Iskhodzhanova, N. V. Antyufeeva

ON THE QUESTION OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS (CFRP) TEST SPECIMEN FLAWS

For strength characteristics and properties evaluation test of composite polymer materials (PCM), i.e. CFRP on the basis of glue epoxy resin and carbon fillers, it is necessary to make test specimen first. As a rule test specimen make from CFRP plates produced by means of some molding technique. Cutting tool machining is the most widespread method among various existing methods of test specimen production. When studying the cutting technology influence on specimen surface quality some flaws have been revealed in the form of cleavage in addition to cracks and other flaws, which are responsible for test specimen surface quality, and, therefore, the CFRP characteristics. Test specimen flaws have been described with their quantitative estimation. Flaws quantitative estimation technique has been worked out by means of computerized quantitative optical metallographic analysis method.

Keywords: PCM, CFRP, test specimen, flaws, quantitative metallographic analysis.

¹Федеральное 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

Введение

По оценкам специалистов, мировой рынок композиционных материалов растет на 5–7% в год. Так, в области авиастроения объем применения ПКМ составляет 50% от массы планера и наблюдается уверенная тенденция к увеличению использования ПКМ [1–3] в составе современных летательных аппаратов. Это обусловлено высокими прочностными характеристиками ПКМ [4], освоением технологии их производства [5–7] и значительным снижением себестоимости изготовления. Качество и эксплуатационная надежность изделий из композиционных материалов зависят от применяемых связующих [8, 9], свойств препрегов, используемых для изготовления углепластиков [10–12], способов модифицирования [13, 14] композиционного материала и ряда других факторов [15, 16]. В международной нормативно-технической документации по испытаниям материалов особое внимание уделяется процессу пробоподготовки и изготовлению образцов [17], регламентируются условия кондиционирования или выдержки материала образцов перед испытаниями. Так, согласно требованиям международных стандартов, для получения достоверных значений прочности углепластика на торце образцов (резе) для испытаний должно быть не более пяти дефектов на один погонный дюйм длины [18, 19]. К наиболее распространенным дефектам торцевой поверхности образцов для испытаний, изготовленных с использованием методов механической обработки, следует отнести трещины, сколы, расслоения и др. [20–22]. Исследование дефектов торцевой поверхности способом оптической металлографии позволило провести их количественную оценку и связать состояние обрабатываемой поверхности со способом механической обработки.

Методика проведения исследований

В ходе выполнения работы проведено металлографическое исследование торцевой поверхности образцов углепластиков, изготовленных с использованием различных типов оборудования для механической обработки. Для сравнения выбраны следующие способы обработки: абразивный круг с охлаждением, роботизированный фрезерный станок и традиционный способ – алмазный круг без охлаждения. Для резки абразивным и алмазным кругами использовали отрезные круги $\varnothing 250$ мм, частота вращения вала поддерживалась на уровне 2850 об/мин. Резка материала на роботизированном станке осуществлялась фрезой $\varnothing 6$ мм, с частотой вращения 8000 об/мин при подаче – до 1 мм/мин.

Металлографическое исследование поперечных резов проводили на оптическом микроскопе типа Leica DM IRM при увеличении $\times 100$. Съемку изображений вели при помощи цифровой камеры VEC-335 с разрешением 3 мегапикселя. Панорамные снимки

с двух противоположных сторон образца проводили при помощи компьютерной программы «Image Expert Sequencer 4» при увеличении $\times 100$. Подготовку изображений к количественному анализу и их математическую обработку выполняли при помощи компьютерной программы «Image Expert Pro 3x».

Результаты исследований и их обсуждение

Исследование дефектов и определение их количественных характеристик на торцевой поверхности образцов для испытаний проводили на поперечных относительно направления углеродных волокон резах.

В результате анализа выявлено два основных типа дефектов (рис. 1) – трещины и сколы. Отмечено также расслоение по границе раздела «наполнитель–матрица».

На панорамных снимках, полученных при помощи графического планшета «Wasom Intios», измерена общая видимая длина реза (рис. 1, *a*). Вручную контрастным цветом закрашены дефекты торцевой поверхности образцов углепластиков, и приводится изображение (рис. 1, *б*), подготовленное к количественному анализу: желтым цветом прорисованы сколы, красным – трещины.

Как правило, оба типа дефектов сопровождают друг друга, однако проявляются в различных количественных соотношениях для разных типов отрезного оборудования на одном и том же материале.

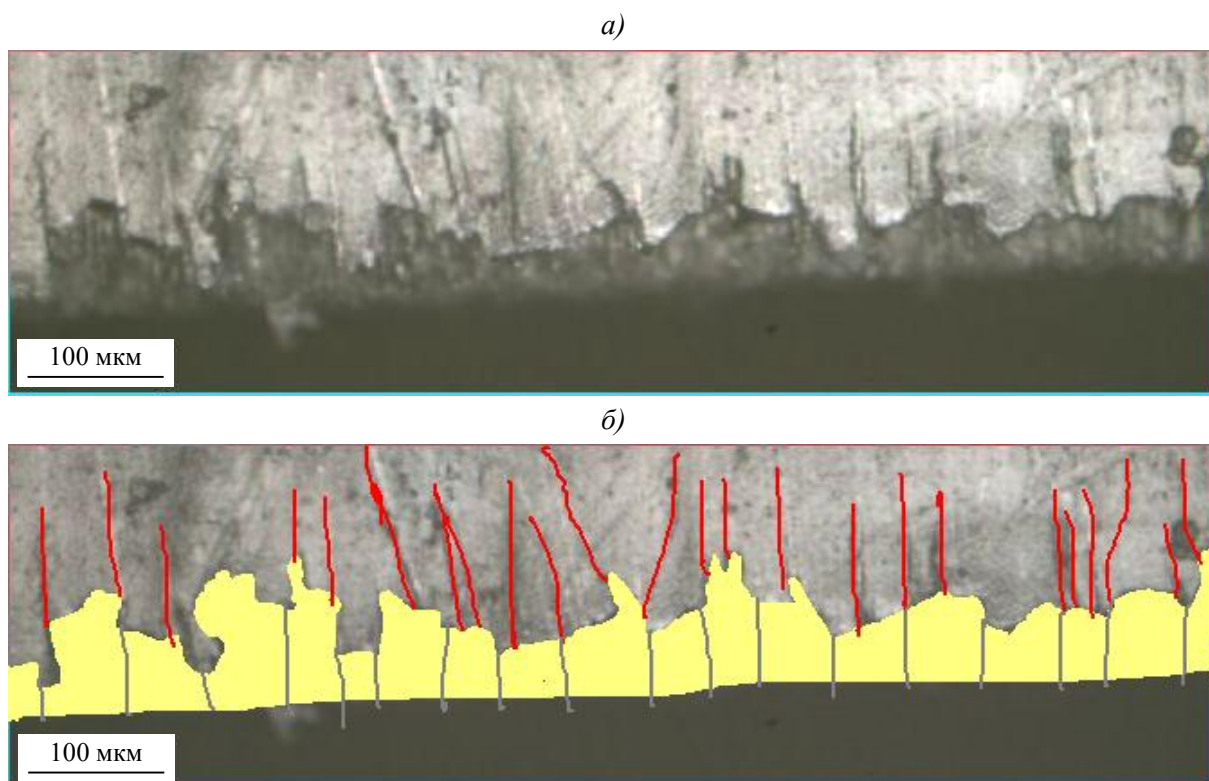


Рисунок 1. Фрагмент панорамного снимка реза углепластика, выполненного с помощью роботизированного фрезерного станка:

a – исходное изображение; *b* – после обработки для количественного анализа

На рис. 2 видно, что дефекты поверхности плиты из углепластика при резке вдоль наполнителя представляют собой преимущественно сколы по материалу матрицы. Образование трещин (см. рис. 1) связано с преодолением режущим инструментом анизотропной границы раздела «наполнитель–матрица». Данный факт является еще одним косвенным подтверждением того, что для композиционных материалов граница раздела оказывает большое влияние на уровень их прочностных характеристик [23].

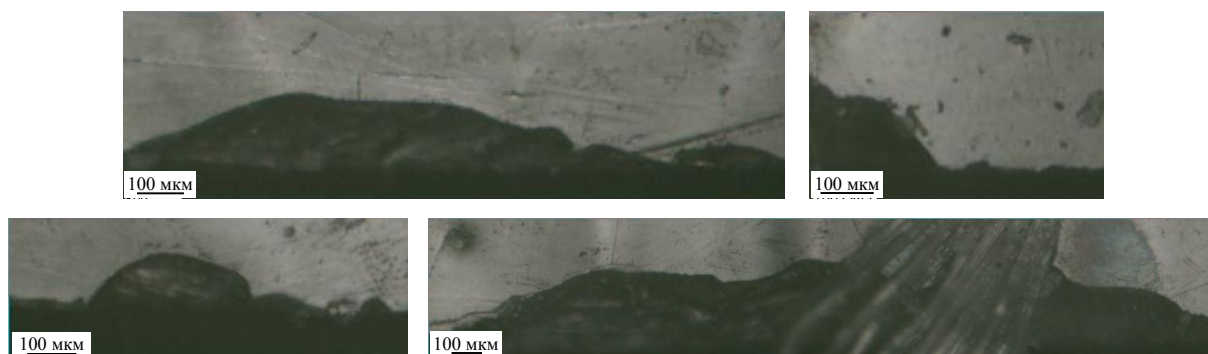


Рисунок 2. Дефекты поверхности плиты из углепластика в области реза, выполненного абразивным инструментом с охлаждением, вдоль армирующих волокон

Трещины (рис. 3), обнаруженные в образцах исследуемого материала, представляют собой продолговатые дефекты, имеющие в направлении оси Y (по нормали к поверхности реза) значительно бóльшую протяженность, чем по оси X (вдоль реза).



Рисунок 3. Трещины на торце образца из углепластика, подготовленного для испытаний

Форму и расположение трещин, их протяженность и структуру анализировали с учетом следующих параметров: общей площади трещин, приведенной площади трещин (на единицу длины торца), максимальной глубины трещин, средних глубины и длины трещин. По данным параметрам наибольшая повреждаемость отмечена в случае обработки углепластика на роботизированном станке. Наименьшее количество трещин

зафиксировано при резки диском с использованием охлаждения. Резка плиты углепластика традиционным способом по данному параметру характеризуется промежуточными значениями распространенности дефектов. Еще одним распространенным дефектом поверхности реза являются сколы – это участки материала, расположенные, как правило, на поверхности образца, имеющие в двух взаимно перпендикулярных направлениях (по осям X и Y) сопоставимые размеры. Оценка глубины сколов производилась по их профилю на поверхности (рис. 4).



Рисунок 4. Сколы на торце образца из углепластика, подготовленного для испытаний

Форму сколов, их расположение анализировали с учетом следующих параметров: общей суммарной площади сколов на панорамном снимке, относительной доли сколов на видимом поле, приведенной площади сколов на единицу длины реза, максимальной и средней глубин скола. Как и в случае оценки состояния поверхности по наличию трещин, наибольшая повреждаемость материала образцов в виде сколов отмечена при использовании роботизированного станка. Однако по параметру глубины сколов следует отметить, что, в случае резки материала традиционным способом (алмазным кругом без охлаждения), глубина сколов в 2 раза превышает аналогичный параметр при резке с помощью роботизированного станка. Это, по-видимому, связано с более регулярным воздействием кромки режущего инструмента на материал в случае использования роботизированного станка в отличие от резки традиционным способом, когда подача материала осуществляется вручную. И это несмотря на то что при выбранных режимах резания линейная скорость режущей кромки алмазного режущего инструмента на порядок превышает аналогичный параметр для фрезерного станка.

Описанные особенности состояния поверхности в области реза образцов, подготовленных для испытаний, свидетельствуют о том, что практически по всем оценочным параметрам наименьшее количество дефектов на торцевой поверхности образцов углепластиков отмечено после раскроя плиты углепластика абразивным кругом с охлаждением (рис. 5, б). Как было отмечено, исключением здесь является глубина сколов, которая значительно выше в случае резки традиционным способом (рис. 5, в).

Наибольшее количество дефектов в совокупности наблюдается при использовании роботизированного фрезерного станка (рис. 5, *а*).

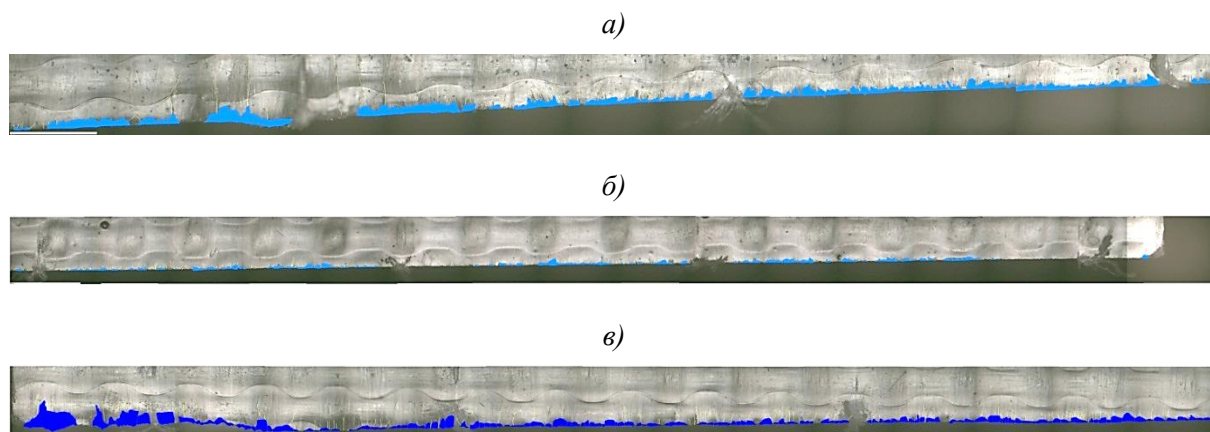


Рисунок 5. Панорамный снимок ($\times 100$) торцевой поверхности плиты из углепластика, обработанной с помощью роботизированного фрезерного станка (*а*), а также абразивным (*б*) и алмазным кругами (*в*), с резом в продольном (*а*) и поперечном (*б*, *в*) направлениях относительно волокон наполнителя

Заключение

В соответствии с требованиями международных стандартов, распространенность дефектов по длине торцевой поверхности образцов для испытаний углепластика является залогом получения достоверных результатов при проведении различного рода механических испытаний. Это связано с тем, что каждый из дефектов можно рассматривать в качестве концентратора напряжений, влияние которых в совокупности и определяет уровень прочностных характеристик всего материала. Для получения сопоставимых результатов (в особенности при проведении арбитражных испытаний в нескольких испытательных лабораториях по аналогичным методикам) целесообразно изготавливать образцы одним из доступных методов, предпочтительно причиняющим материалу наименьшее количество повреждений. Из рассмотренных способов можно рекомендовать резку с использованием абразивного отрезного инструмента с охлаждением. Однако следует отметить, что, для полноты освещения поднятого в данной статье вопроса, целесообразно провести аналогичное исследование поверхности образцов, полученных с использованием таких методов раскроя материала, как гидроабразивная резка, резка лазерным лучом и др., с последующим определением прочностных характеристик и сопоставлением полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники //Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
3. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы //Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
4. Перепёлкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. СПб: Научные основы и технологии. 2009. С. 171–185.
5. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р., Чурсова Л.В. Особенности изготовления изделий из ПКМ методом пропитки под давлением //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 18–26.
6. Хрульков А.В., Душин М.И., Попов Ю.О., Коган Д.И. Исследования и разработка автоклавных и безавтоклавных технологий формования ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 292–301.
7. Григорьев М.М., Коган Д.И., Твердая О.Н., Панина Н.Н. Особенности изготовления ПКМ методом RFI //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 03 (viam-works.ru).
8. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 38–42.
9. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Ким М.А., Бабин А.Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 260–265.
10. Препрег и изделие, выполненное из него: пат. 2427594 Рос. Федерация; опубл. 21.12.2009.
11. Алексашин В.М., Антюфеева Н.В. Развитие методов термического анализа в исследовании полимерных композиционных материалов /В сб. 75 лет. Авиационные материалы и технологии. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. М.: ВИАМ. 2007. С. 245–249.
12. Антюфеева Н.В., Алексашин В.М., Железина Г.Ф., Столянков Ю.В. Методические подходы термоаналитических исследований для оценки свойств препрегов и углепластиков //Приложение к журналу «Все материалы. Энциклопедический справочник». 2012. №4. С. 18–28.

13. Гуняев Г.М., Каблов Е.Н., Алексахин В.М. Модифицирование конструкционных углепластиков углеродными наночастицами //Российский химический журнал. 2010. Т. 54. №1. С. 3–11.
14. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов //Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8. №3–4. С. 24–42.
15. Кириллов В.Н., Старцев О.В., Ефимов В.А. Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути решения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 412–423.
16. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Шведкова А.К., Николаев Е.В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 41–45.
17. Антюфеева Н.В., Столянков Ю.В., Исходжанова И.В. Исследование и оценка свойств полимерных композиционных материалов по методикам, гармонизированным с международными стандартами //Конструкции из композиционных материалов. №3. 2013. С. 41–45.
18. ASTM D5687M-95. 2002.
19. ISO 20134. 2003.
20. Портной К.И., Салибеков С.Е., Светлов И.Л., Чубаров В.М. Структура и свойства композиционных материалов. М. Машиностроение. 1979. 255 с.
21. Чабина Е.Б., Алексеев А.А., Филонова Е.В., Лукина Е.А. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов //Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 06 (viam-works.ru).
22. Баурова Н.И. Микроструктурные исследования поверхностей разрушения углепластика //Все материалы. Энциклопедический справочник. Композиционные материалы. 2012. №8. С. 25–30.
23. Черепанов Г.П. Механика разрушения композиционных материалов. М.: Наука. 1983. С. 32–37.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technolo-

- gies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
2. Kablov E.N. Materialy i himicheskie tehnologii dlja aviacionnoj tehniki [Materials and chemical technologies for aircraft equipment] //Vestnik Rossijskoj akademii nauk. 2012. T. 82. №6. S. 520–530.
 3. Kablov E.N. Aviacionnoe materialovedenie: itogi i perspektivy [Aeronautical materials: results and prospects] //Vestnik Rossijskoj akademii nauk. 2002. T. 72. №1. S. 3–12.
 4. Perepjolkin K.E. Armirujushhie volokna i voloknistye polimernye kompozity [Reinforcing fibers or fibrous polymer composites]. SPb: Nauchnye osnovy i tehnologii. 2009. S. 171–185.
 5. Dushin M.I., Hrul'kov A.V., Muhametov R.R., Chursova L.V. Osobennosti izgotovlenija izdelij iz PKM metodom propitki pod davleniem [Features the manufacture of PCM by pressure impregnation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 18–26.
 6. Hrul'kov A.V., Dushin M.I., Popov Ju.O., Kogan D.I. Issledovanija i razrabotka avtoklavnyh i bezavtoklavnyh tehnologij formovanija PKM [Research and development and autoclave molding technology bezavtoklavnogo PCM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 292–301.
 7. Grigor'ev M.M., Kogan D.I., Tverdaja O.N., Panina N.N. Osobennosti izgotovlenija PKM metodom RFI [Peculiarities of PCM by RFI] //Trudy VIAM. 2013. №4. St. 03 (viam-works.ru).
 8. Muhametov R.R., Ahmadijeva K.R., Chursova L.V., Kogan D.I. Novye polimernye svjazujushhie dlja perspektivnyh metodov izgotovlenija konstrukcionnyh voloknistyh PKM [New polymeric binders for the promising methods for the manufacture of structural fibrous PCM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №2. S. 38–42.
 9. Muhametov R.R., Ahmadijeva K.R., Kim M.A., Babin A.N. Rasplavnnye svjazujushhie dlja perspektivnyh metodov izgotovlenija PKM novogo pokolenija [Melt binders for advanced methods of manufacturing a new generation of PCM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 260–265.
 10. Prepreg i izdelie, vypolnennoe iz nego [Prepreg and a product made therefrom]: pat. 2427594 Ros. Federacija; opubl. 21.12.2009.
 11. Aleksashin V.M., Antjufeeva N.V. Razvitie metodov termicheskogo analiza v issledovanii polimernyh kompozicionnyh materialov [Development of methods for thermal analysis in the polymer composite material] /V sb. 75 let. Aviacionnye materialy i tehnologii. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2007. M.: VIAM. 2007. S. 245–249.

12. Antjufeeva N.V., Aleksashin V.M., Zhelezina G.F., Stoljankov Ju.V. Metodicheskie podhody termoanaliticheskikh issledovanij dlja ocenki svojstv prepregov i ugleplastikov [Methodological approaches thermoanalytical studies to evaluate the properties of the prepreg and carbon fiber reinforced plastics] //Prilozhenie k zhurnalu «Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravochnik». 2012. №4. S. 18–28.
13. Gunjaev G.M., Kablov E.N., Aleksashin V.M. Modificirovanie konstrukcionnyh ugleplastikov uglerodnymi nanochasticami [Modification of structural carbon fiber reinforced plastics with carbon nanoparticles] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. 54. №1. S. 3–11.
14. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Jurkov G.Ju. Perspektivy ispol'zovanija uglerod-soderzhashhih nanochastic v svjazujushhih dlja polimernyh kompozicionnyh materialov [Prospects for the use of carbonaceous nanoparticles in polymeric binders for composite materials] //Rossijskie nanotehnologii. 2013. T. 8. №3–4. S. 24–42.
15. Kirillov V.N., Starcev O.V., Efimov V.A. Klimaticheskaja stojkost' i povrezhdaemost' polimernyh kompozicionnyh materialov, problemy i puti reshenija [Weather resistance and a defect of polymeric composite materials, problems and solutions] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 412–423.
16. Kirillov V.N., Efimov V.A., Shvedkova A.K., Nikolaev E.V. Issledovanie vlijanija klimaticheskikh faktorov i mehanicheskogo nagruzhenija na strukturu i mehanicheskie svojstva PKM [Investigation of the influence of climatic factors and mechanical loading on the structure and mechanical properties of the PCM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №4. S. 41–45.
17. Antjufeeva N.V., Stoljankov Ju.V., Ishodzhanova I.V. Issledovanie i ocenka svojstv polimernyh kompozicionnyh materialov po metodikam, garmonizirovannym s mezhdunarodnymi standartami [Research and evaluation of properties of polymeric composite materials according to the procedures harmonized with international standards] //Konstrukcii iz kompozicionnyh materialov. №3. 2013. S. 41–45.
18. ASTM D5687M-95. 2002.
19. ISO 20134. 2003.
20. Portnoj K.I., Salibekov S.E., Svetlov I.L., Chubarov V.M. Struktura i svojstva kompozicionnyh materialov [Structure and properties of composite materials]. M. Mashinostroenie. 1979. 255 s.
21. Chabina E.B., Alekseev A.A., Filonova E.V., Lukina E.A. Primenenie metodov analiticheskoj mikroskopii i rentgenostrukturnogo analiza dlja issledovanija strukturno-

fazovogo sostojanija materialov [Application of the methods of analytical microscopy and X-ray analysis for the study of structural-phase state materials] //Trudy VIAM. 2013. №5. St. 06 (viam-works.ru).

22. Baurova N.I. Mikrostrukturnye issledovanija poverhnostej razrushenija ugleplastika [Microstructural studies of the fracture surfaces of CFRP] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. Kompozicionnye materialy. 2012. №8. S. 25–30.
23. Cherepanov G.P. Mehanika razrushenija kompozicionnyh materialov [Fracture mechanics of composite materials]. M.: Nauka. 1983. S. 32–37.