



УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-6-6

ОСОБЕННОСТИ ПРЕПРЕГОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВЫКЛАДКИ МЕТОДАМИ ATL И AFP

Ю.А. Гусев

А.В. Борщев

А.В. Хрульков

Март 2015

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.

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-6-6

Ю.А. Гусев¹, А.В. Борщев¹, А.В. Хрульков¹

ОСОБЕННОСТИ ПРЕПРЕГОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВЫКЛАДКИ МЕТОДАМИ ATL И AFP

Для увеличения производительности и точности выкладки при изготовлении крупных деталей из ПКМ на основе препрегов во всем мире широко используются методы автоматизированной выкладки ATL и AFP. Однако традиционные препреги не всегда подходят для переработки этими методами – к ним предъявляются особые требования по форме выпуска, качеству и технологичности.

В данной статье рассматриваются особенности препрегов для автоматизированной выкладки, требования к ним и зависимость их технологических свойств от параметров выкладки.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал (ПКМ), препрег, связующее, ATL, AFP, липкость, драпируемость.

Y.A. Gusev, A.V. Borshchev, A.V. Khrulkov

FEATURES OF PREPREGS INTENDED FOR AUTOMATED LAYING BY ATL AND AFP TECHNOLOGIES

Automated laying made by ATL and AFP methods is used worldwide to increase productivity and accuracy of prepregs laying in the course of manufacture of large-sized PCM-based parts. However, conventional prepregs are not always suitable for processing by these methods – they have to meet special requirements in terms of delivery form, quality and processability. Some features of prepregs intended for automated laying, requirements to them and an influence of laying parameters on their technological properties are discussed in the article.

Keywords: polymer composite material (PCM), prepreg, resin, ATL, AFP, adhesiveness, drapability.

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

Реализация стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки, разработанных в ВИАМ, станет стимулом для перехода Российской Федерации к новому этапу индустриализации, включающему проведение технической модернизации производств путем оснащения современным автоматизированным оборудованием [1].

Область изготовления изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе препрегов – предварительно пропитанных связующим волокон армирующего наполнителя, является одной из самых перспективных в авиастроении [2–5]. В настоящее время доля ПКМ в конструкциях самолетов может достигать 50% и производители стремятся ее увеличить.

Для массового производства крупногабаритных и ответственных деталей из композиционных материалов все более широко используются методы автоматизированной выкладки препрегов, так как это дает ряд преимуществ, в том числе значительно увеличивает скорость и точность выкладки препрега. Без внедрения такого оборудования в производство становится невозможным конкурировать с крупнейшими производителями авиационной техники, такими как фирмы Boeing и Airbus, оснащенными автоматизированным оборудованием.



Рис. 1. Автоматизированная выкладка препрегов методами AFP (а) и ATL (б) с помощью роботизированной «руки» фирмы Coriolis Composites (а) и установки портального типа с горизонтальной балкой фирмы MТorres (б)

Автоматизированная выкладка ленты Automated Tape Laying (ATL) и автоматизированная выкладка волокон Automated Fiber Placement (AFP) – две основных технологии, используемые для производства ПКМ из однонаправленных препрегов [6]. В

методе ATL широкая лента препрега выкладывается на оснастку и прикатывается специальным роликом по заданной программе с одновременной смоткой защитной подложки на отдельную катушку. Метод AFP отличается тем, что в нем вместо широкой ленты используется лента из узких полосок препрега, которая собирается на выкладочной головке. Каждая полоска препрега может подаваться и обрезаться независимо от остальных, что позволяет варьировать ширину подаваемой на оснастку ленты и выкладывать поверхности сложной формы. Для сложных поверхностей в AFP установках обычно используют роботизированную «руку» с большим количеством степеней свободы, тогда как при ATL выкладке часто используют порталную конструкцию с горизонтальной балкой, которая позволяет выкладывать большие, но несложные по форме детали (рис. 1) [7].

Материалы и методы

При использовании автоматизированных методов к препрегам и их качеству предъявляются требования, учитывающие особенности используемого оборудования [8].

В методах ATL и AFP используют только однонаправленные препреги, волокна которых должны удерживаться в составе ленты без расщепления по ширине и толщине. Ширина используемой ленты выбирается в зависимости от сложности выкладываемой поверхности. Для простых поверхностей выбирается лента максимальной ширины, что увеличивает скорость выкладки готовой детали, для более сложных – подбирается индивидуально так, чтобы лента могла плотно прилегать к требуемой поверхности без замятий и складок.

В зависимости от типа выкладочной головки необходимая ширина препрега (обычно 300, 150 и 75 мм – для метода ATL, 3,2; 6,4 и 12,7 мм – для метода AFP) достигается либо при производстве (с обрезкой кромок), либо разрезкой или расщеплением препрега на ленты на специальном оборудовании. Разрезка осуществляется по направлению волокон, чтобы избежать их перерезания. Кромки разрезанного препрега должны быть ровными, без выступающих нитей, а отклонение кромок от прямолинейности после перемотки должно быть минимальным.

Перемотка разрезанного препрега должна осуществляться на картонные или пластиковые гильзы достаточной жесткости во избежание их деформации. Деформация гильзы может привести к невозможности установки катушки на оборудование, а также к колебанию натяжения ленты при выкладке [9].

На катушке с препрегом не допускаются замятия, складки, непропитанные и другие дефектные участки. Некоторые установки для методов ATL и AFP позволяют

выкладывать дефектные участки препрега вне рабочей поверхности и продолжать выкладку с момента обнаружения дефекта, однако могут возникнуть проблемы с позиционированием инструмента после остановки процесса, при этом затрачивается значительное время.

Препрег для переработки методами ATL и AFP поставляют на катушке с технологической подложкой с одной стороны ленты. Подложка не дает слипаться соседним виткам препрега и доставляет его до выкладочной головки. Регулирование натяжения подложки также позволяет компенсировать сдвиговые силы [10].

Немаловажно подобрать технологическую подложку так, чтобы она легко отделялась от препрега при любой температуре и скорости выкладки после прохождения прикаточного валика, но при этом не отделялась самостоятельно при перематке препрега и прохождении лентотракта машины. При этом она не должна рваться и деформироваться в процессе перематки или выкладки.

После прохождения выкладочной головки препрег отделяется и прикатывается к оснастке, а подложка сматывается на отдельную катушку. Схема на рис. 2 показывает как происходит отделение препрега от подложки. Механизм прилипания препрега к оснастке зависит от силы прилипания препрега к подложке и его жесткости на оснастке, поэтому эти параметры важно знать, чтобы понять подходит ли материал для автоматизированного метода переработки.

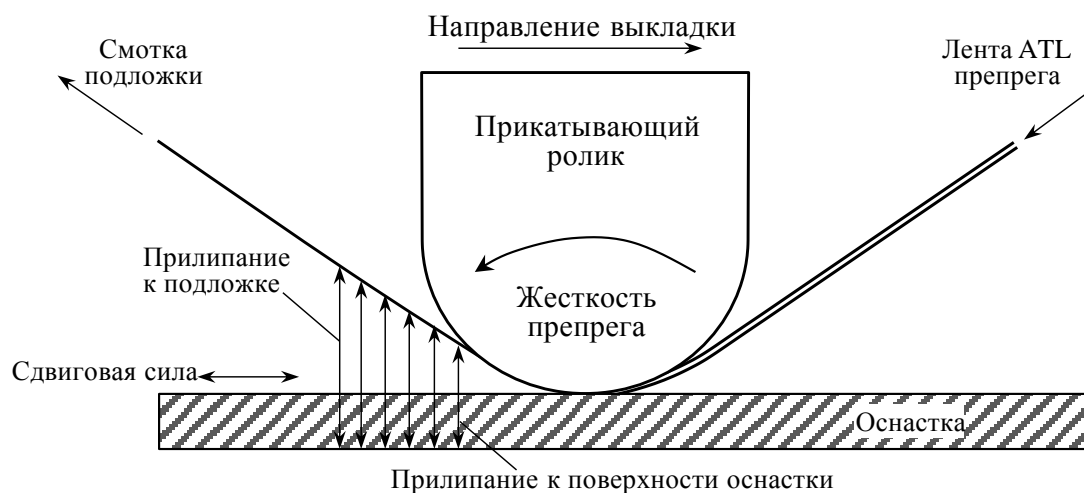


Рис. 2. Упрощенная схема выкладки препрега на оснастку методом ATL

В работах [11, 12] рассмотрено влияние условий переработки препрегов методом ATL на пористость конечного композита и его прочностные свойства. Главным образом на пористость с последующим ухудшением механических свойств влияет со-

держание в препреге растворенной влаги, а также воздух, находящийся в замкнутом пространстве между слоями выложенного препрега.

Для того чтобы уменьшить пористость от растворенной влаги, необходимо поддерживать низкую влажность в производственном помещении, а также проводить кондиционирование предварительно замороженного препрега при температуре помещения во избежание образования в нем конденсата.

Воздух, находящийся в замкнутом пространстве, образуется либо внутри связующего в препреге, либо при неполном прилипании ленты препрега к оснастке или соседнему слою. Удалить этот воздух можно при правильном подборе параметров при автоклавном формовании [13, 14], но его изначальное наличие сильно зависит от липкости и драпируемости препрега.

Драпируемость характеризует гибкость и эластичность препрега, а также возможность выкладывать его на оснастку любой сложности так, чтобы он принимал нужную форму, не образуя трещин и складок, разрывов при удалении его с оснастки.

Уровень липкости определяет будет ли препрег держаться на оснастке при выкладке и последующем формовании и может ли он при необходимости быть отделен от нее и обычно описывается производителями как «высокий», «средний» и «низкий» на основе субъективного испытания на слипание образца препрега с образцом для тестирования или роликом или же на основе испытания образца связующего, зажато между двух металлических пластин [15, 16].

В первую очередь уровень липкости зависит от реологических свойств связующего и его содержания [17, 18], но этот параметр не постоянен и зависит от многих других факторов. Если при ручном методе одна из главных проблем при прилипании препрега к оснастке заключается в том, что этот фактор сильно зависит от квалификации сотрудника, выкладывающего препрег, то при автоматизированных методах большинство параметров можно регулировать и к вопросу изучения липкости подходят более серьезно, так как она влияет и на сам процесс выкладки, и на свойства получаемого после формования композита. В работах [19, 20] авторами предложен метод исследования липкости максимально, по мнению авторов, приближенный к реальности.

Результаты

В процессе выкладки методами ATL и AFP возможно регулировать ряд параметров, которые влияют на прилипание препрега к оснастке:

– скорость выкладки (обычно от 0 до 50 м/мин);

- сила прижима (обычно от 265 до 1300 Н для ролика $\varnothing 150$ мм и шириной 300 мм);
- температура выкладки (обычно от комнатной температуры до 80°C при использовании нагревательного элемента);
- шероховатость оснастки и наличие на ней антиадгезионных покрытий.

Обычно не рассматривается прилипание слоев препрега друг к другу, так как считается, что к оснастке препрег всегда прилипает хуже, чем к самому себе, особенно при использовании антиадгезионных покрытий, применение которых продиктовано необходимостью легкого отделения от оснастки готовой детали после формования.

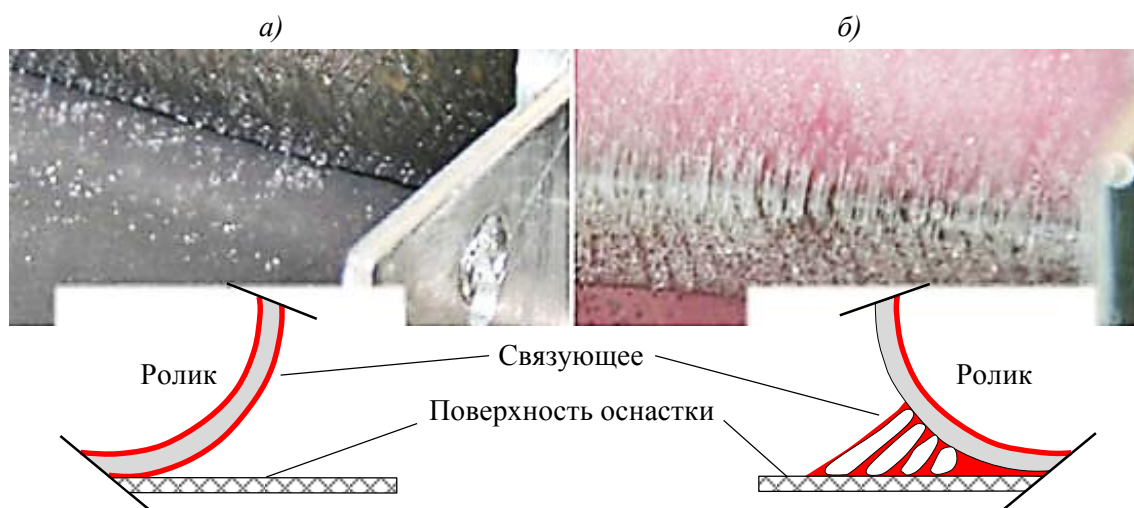


Рис. 3. Модели отлипания препрега: межфазное «сухое» (а) и когезионное «мокрое» (б)

Влияние каждого из приведенных выше параметров зависит от модели отлипания препрега от оснастки. Существует две основные модели, показанные на рис. 3:

- межфазное («сухое») отлипание происходит при высоком модуле упругости, когда связующее слишком вязкое, чтобы заполнить всю область контакта, что приводит к слабой адгезии и минимальному распределению связующего на поверхности оснастки;
- когезионное («мокрое») отлипание происходит при низком модуле упругости, когда достигается высокая адгезия связующего к поверхности.

На промышленных установках для методов ATL и AFP обычно установлены нагревательные элементы для увеличения липкости выкладываемого препрега. Однако варьировать температуру следует осторожно, потому что увеличение температуры увеличивает липкость при «сухой» модели отлипания, но уменьшает при «мокрой». Липкость зависит от реологических свойств связующего [19, 20] при «мокрой» отлипании, но не при «сухом». Увеличение температуры увеличивает текучесть связующего и сма-

чивание им поверхности, но уменьшает его внутреннюю прочность, что можно заметить, когда при отрывании препрега от поверхности оснастки вытягиваются «нити» прилипшего к ней связующего. Таким образом, оптимальный уровень липкости может быть достигнут при хорошей адгезии связующего к поверхности, но с сохранением им внутренней прочности. Этого невозможно достигнуть без разработки связующих нового поколения, предназначенных для изготовления препрегов для автоматизированной выкладки [21–23].

Еще одна проблема при увеличении температуры заключается в том, что оно (увеличение) приводит к уменьшению жесткости ленты препрега с одновременным увеличением липкости между препрегом и подложкой, что может привести к отрыванию препрега от оснастки при отделении подложки или прилипанию к подложке.

Для скорости выкладки действует похожая зависимость: при низкой скорости выкладки связующее лучше распределяется между материалом и оснасткой (другим слоем материала), что приводит к когезионному отлипанию («мокрая» модель). В этом случае прилипание характеризуется вязкоэластичными свойствами связующего. При дальнейшем увеличении скорости выкладки отлипание снова становится межфазным («сухая» модель) и липкость перестает расти.

При использовании антиадгезионных покрытий препрег теряет адгезионную связь с оснасткой и может прилипнуть только по механизму «сухой» модели. Таким образом, даже препрег, липкость которого описана производителем как «высокая», может все равно плохо прилипнуть к оснастке, если он не рассчитан для использования в методе ATL (или AFP).

Не следует также забывать, что вязкоэластичные свойства связующего зависят также от условий и продолжительности хранения. При длительном хранении падает не только текучесть связующего в препреге, что уменьшает его липкость, но и ухудшается его драпируемость, поэтому важно хранить препрег не больше указанного производителем времени.

Обсуждение и заключения

Для модернизации производства композитов в России путем внедрения современного автоматизированного оборудования недостаточно просто приобрести и смонтировать оборудование, основанное на методах ATL или AFP, необходимо также разработать и внедрить ряд передовых технологий для производства препрегов. Для этого должно быть организовано производство связующих нового поколения и препрегов, разработанных специально для переработки автоматизированными методами.

В данной статье рассмотрены требования к качеству и форме выпуска данных препрегов и подняты вопросы о необходимости тщательного подбора их технологических свойств, которые зависят не только от реологических свойств связующего, но и от параметров работы оборудования и условий в производственном помещении.

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. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Каблов Е.Н. Эпоксидное связующее, препрег на его основе и изделие, выполненное из него //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
3. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
4. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Балинова Ю.А. Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и керамических композиционных материалов //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 05 (viam-works.ru)
5. Kobets L.P., Deev I.S. Carbon fibres: structure and mechanical properties //Composites science and technology. 1998. V. 57. №12. P. 1571–1580.
6. Sloan J. ATL and AFP: defining the megatrends in composite aerostructures //High performance composites. July 2008. P. 20–25.
7. Grimshaw M.N., Grant C.G., Diaz J.M.L. Advanced technology tape laying for affordable manufacturing of large composite structures /In: 46-th International SAMPE Symposium. 2001. P. 2484–2494.
8. Dirk H., Lukaszewicz J.A., Ward C., Potter K.D. The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future //Composites: Part B. 2012. V. 43. P. 997–1009.
9. Grimshaw M.N. Automated tape laying //Composites. 2001. V. 21. P. 480–500.
10. Banks R. Development of a new structural prepreg: characterisation of handling, drape and tack properties //Composite Structures. 2004. V. 66(1–4). P. 169–174.
11. Lukaszewicz DH-JA, Weaver P.M., Potter K. The impact of processing conditions on the final part quality in automated tape deposition technologies /In: Sampe Seico. Paris. 2009. P. 45–70.
12. Lukaszewicz DH-JA, Weaver P.M., Potter K. An empirical model for the automated deposition of thermoset composite /In: ACS – 24-th technical conference. Newark-Delaware. 2009. P. 22–76.
13. 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.

14. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. Выбор технологических параметров автоклавного формования деталей из полимерных композиционных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 20–26.
15. Ahn K.J., Seferis J.C., Pelton T., Wilhelm M. Analysis and characterization of prepreg tack //Polym Compos. 1992. V. 13(3). P. 197–206.
16. Seferis J.C., Meissonnier J. Development of a tack and drape test for prepreps based on viscoelastic principles //Sampe Quarterly-Soc Adv Mater Process Eng. 1989. V. 20(3). P. 55–64.
17. Мухаметов Р.Р., Меркулова Ю.И., Чурсова Л.В. Термореактивные полимерные связующие с прогнозируемым уровнем реологических и деформативных свойств //Клеи. Герметики. Технологии. 2012. №5. С. 19–24.
18. Эпоксидная композиция: пат. 2447104 Рос. Федерация; опубл. 05.10.2010.
19. Crossley R.J., Schubel P.J., Warrior N.A. The experimental determination of prepreg tack and dynamic stiffness //Composites. Part A. 2012. V. 43. P. 423–434.
20. Crossley R.J., Schubel P.J., Warrior N.A. The experimental characterisation and investigate on of prepreg tack /In: Proceedings of ICCM-18. Edinburgh. 2009. P. 1–11.
21. 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.
22. Бабин А.Н. Связующие для полимерных композиционных материалов нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. №4 (viam-works.ru).
23. 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.

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 technologies to process them for the period up to 2030] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Muhametov R.R., Ahmadiyeva K.R., Chursova L.V., Kablov E.N. Jepoksidnoe svjazujushhee, prepreg na ego osnove i izdelie, vypolnennoe iz nego [Epoxy binder prepreg on its base and a product made therefrom] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 3–4.
3. Kablov E.N. Himija v aviacionnom materialovedenii [Chemistry aviation materials] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 3–4.
4. Kablov E.N., Shhetanov B.V., Ivahnenko Ju.A., Balinova Ju.A. Perspektivnye armirujushhie vysokotemperaturnye volokna dlja metallicheskih i keramicheskikh kompozicionnyh materialov [Prospective reinforcing fibers for high temperature ceramic composites and metal materials] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 05 (viam-works.ru)

5. Kobets L.P., Deev I.S. Carbon fibres: structure and mechanical properties //Composites science and technology. 1998. V. 57. №12. P. 1571–1580.
6. Sloan J. ATL and AFP: defining the megatrends in composite aerostructures //High performance composites. July 2008. P. 20–25.
7. Grimshaw M.N., Grant C.G., Diaz J.M.L. Advanced technology tape laying for affordable manufacturing of large composite structures /In: 46-th International SAMPE Symposium. 2001. P. 2484–2494.
8. Dirk H., Lukaszewicz J.A., Ward C., Potter K.D. The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future //Composites: Part B. 2012. V. 43. P. 997–1009.
9. Grimshaw M.N. Automated tape laying //Composites. 2001. V. 21. P. 480–500.
10. Banks R. Development of a new structural prepreg: characterisation of handling, drape and tack properties //Composite Structures. 2004. V. 66(1–4). P. 169–174.
11. Lukaszewicz DH-JA, Weaver P.M., Potter K. The impact of processing conditions on the final part quality in automated tape deposition technologies /In: Sampe Seico. Paris. 2009. P. 45–70.
12. Lukaszewicz DH-JA, Weaver P.M., Potter K. An empirical model for the automated deposition of thermoset composite /In: ACS – 24-th technical conference. Newark-Delaware. 2009. P. 22–76.
13. Hrul'kov A.V., Dushin M.I., Popov Ju.O., Kogan D.I. Issledovanija i razrabotka avto-klavnyh i bezavtoklavnyh tehnologij formovanija PKM [Research and development autoclave and non-autoclave molding technology PCM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 292–301.
14. Dushin M.I., Hrul'kov A.V., Muhametov P.P. Vybora tehnologicheskikh parametrov avtoklavnogo formovanija detalej iz polimernyh kompozicionnyh materialov [The choice of process parameters autoclave molding parts from polymeric composite materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №3. S. 20–26.
15. Ahn K.J., Seferis J.C., Pelton T., Wilhelm M. Analysis and characterization of prepreg tack //Polym Compos. 1992. V. 13(3). P. 197–206.
16. Seferis J.C., Meissonnier J. Development of a tack and drape test for prepregs based on viscoelastic principles //Sampe Quarterly-Soc Adv Mater Process Eng. 1989. V. 20(3). P. 55–64.
17. Muhametov R.R., Merkulova Ju.I., Chursova L.V. Termoreaktivnye polimernye svjazujushhie s prognoziruemym urovnem reologicheskikh i deformativnykh svojstv [Thermosetting polymeric binders with the projected level of rheology and deformation properties] //Klei. Germetiki. Tehnologii. 2012. №5. S. 19–24.
18. Jepoksidnaja kompozicija [Epoxy composition]: pat. 2447104 Ros. Federacija; opubl. 05.10.2010.
19. Crossley R.J., Schubel P.J., Warrior N.A. The experimental determination of prepreg tack and dynamic stiffness //Composites. Part A. 2012. V. 43. P. 423–434.
20. Crossley R.J., Schubel P.J., Warrior N.A. The experimental characterisation and investigate on of prepreg tack /In: Proceedings of ICCM-18. Edinburgh. 2009. P. 1–11.

21. Muhametov R.R., Ahmadiyeva K.R., Chursova L.V., Kogan D.I. Novye polimernye svjazujushhie dlja perspektivnyh metodov izgotovlenija konstrukcionnyh voloknistyh PKM [New polymeric binders for advanced manufacturing methods of structural fiber PCM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №2. S. 38–42.
22. Babin A.N. Svjazujushhie dlja polimernyh kompozicionnyh materialov novogo pokolenija [Binders for polymeric composite materials of new generation] //Trudy VIAM. 2013. №4 (viam-works.ru).
23. Muhametov R.R., Ahmadiyeva K.R., Kim M.A., Babin A.N. Rasplavnye svjazujushhie dlja perspektivnyh metodov izgotovlenija PKM novogo pokolenija [Melt binders promising methods of manufacture of a new generation of PCM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 260–265.