

УДК 678.8

П.Н. Тимошков¹, М.Н. Усачева¹, А.В. Хрульков¹

ЛИПКость И ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЕПРЕГОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-38-46

В данном обзоре рассматривается свойство липкости препрегов, которое влияет на технологические параметры в процессе выкладки заготовки деталей из полимерных композиционных материалов. Рассмотрены различные методы определения липкости, достоинства и недостатки этих методов. Показано, что липкость препрегов зависит от температуры и условий хранения препрегов. Разработанный в ВИАМ материал ВКУ-25 позволит осуществлять автоматизированную технологию при изготовлении заготовок деталей из полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, липкость, автоматизированная выкладка, препрег, метод определения липкости, композитные конструкции.

P.N. Timoshkov¹, M.N. Usacheva¹, A.V. Khrukov¹

STICKINESS AND POSSIBILITY OF USING PREPREGS FOR AUTOMATED TECHNOLOGIES (review)

In this review, the stickiness property of prepregs is considered, which affects the technological parameters in the process of laying out the workpiece parts from polymer composite materials. Various methods for determining stickiness, advantages and disadvantages of these methods are considered. It is shown that stickiness of prepregs depends on the temperature and storage conditions of prepregs. Dependence of the stickiness of prepregs on the temperature makes it possible to ensure easy separation of the prepreg from the substrate and to pass through the belt tape at a reduced temperature without adhering to the rollers, and then good adhesion to the tooling and to the prepreg layers due to heating to the temperature of high tackiness. The material VKU-25 developed in VIAM will allow to carry out the automated technology at manufacturing of preparations of details from polymeric composite materials.

Keywords: polymeric composite materials, stickiness, automated calculation, prepreg, method of stickiness determination, composite structures.

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

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко используются в промышленности – в частности, авиационной и ракетно-космической. Конструкции из ПКМ обладают высокими физико-механическими характеристиками, изделия и конструкции из них получаются прочными, надежными и легкими, по сравнению с традиционными материалами. Следует отметить, что использование стекло- и углепластиков снижает массу конструкции без уменьшения физико-механических характеристик [1–3].

Изделия из ПКМ можно получить множеством методов – например, автоматизированной выкладкой препрегов. Автоматизированная выкладка позволяет увеличить качество продукции и уменьшить расход препрега и бракованных изделий, однако такая выкладка чувствительна к липкости препрега.

Данный аналитический обзор выполнен в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы», комплексная проблема 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [4].

Липкость: влияющие параметры, методы определения

В настоящее время используются два автоматизированных процесса для выкладки однонаправленных препрегов – автоматизированная выкладка лент ATL (Automated Tape Laying) и автоматизированная выкладка волокон AFP (Automated Fiber Placement). В процессе ATL используется широкая лента (75, 150 и 300 мм), которая выкладывается на оснастку и прикатывается роликом, в процессе AFP применяется узкая лента (3,2; 6,4 и 12,7 мм), собирающаяся на выкладочной головке. Ленты определенного размера должны быть смотаны в бобины. Волокна препрегов должны не расщепляться по длине и ширине в ленте [5–7]. Для простых изделий, имеющих небольшую кривизну поверхности, берут широкую ленту – например, для деталей самолета МС-21 выкладку осуществляют лентой шириной 150 мм (рис. 1, а). Для сложных схем укладки ленты подбирают индивидуально, при этом выкладка может обеспечивать изготовление заготовки с отверстиями благодаря возможности обрезки каждой из лент в нужном месте (рис. 1, б), что обеспечивает экономию дорогостоящего материала.

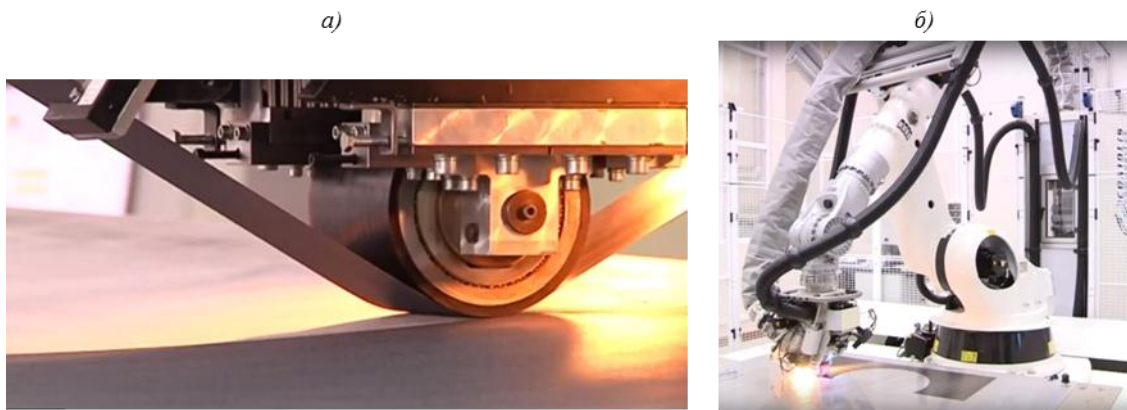


Рис. 1. Автоматизированная выкладка препрегов методами ATL (а – для простых изделий) и AFP (б – для изделий сложной конфигурации)

Впервые в российской практике в процессе производства крупногабаритных деталей применены высокоэффективные технологии изготовления с широким внедрением автоматизации технологических процессов. Автоматизация процессов раскроя и выкладки препрегов, применяемая в производстве кессонов киля и стабилизаторов самолета МС-21, позволяет существенно повысить экономическую эффективность изготовления изделий, при обеспечении высокого уровня физико-механических свойств и их повторяемости от изделия к изделию.

В ВИАМ разработан материал ВКУ-25, который позволяет реализовывать оба процесса. Для процесса ATL препрег нарезается шириной 150 мм, для процесса AFP – шириной 6,35 мм с последующей намоткой на бобины, используемые в установках для процесса AFP (рис. 2). Углепластик ВКУ-25 был успешно опробован при технологических процессах ATL и AFP в ПНИПУ и ОНПП «Технология».

Эффективность процесса ATL во многом зависит от липкости препрега, которая, как правило, определяется производителем как высокая, средняя или низкая с использованием субъективных тактильных ощущений специалиста по соответствующей технологии в сочетании с методом катящегося ролика [8]. Препреги для укладки этим

методом должны легко отделяться от подложки, чтобы часть препрега или смолы не оставалась на ней, но при этом прилипать к оснастке. Между слоями материала также должна быть хорошая адгезия. Таким образом, липкость характеризует качество адгезии. При недостаточной адгезии происходит отслаивание материала от оснастки или предыдущих слоев препрега (рис. 3), что делает реализацию процесса невозможной. Препрег также должен принимать любую конфигурацию формовочной поверхности.



Рис. 2. Бобины с наматывающимися лентами



Рис. 3. Отслаивание препрега от подложки

Если у препрега отсутствует липкость, то либо истек срок годности, либо частично прошел процесс отверждения материала. Такие препреги плохо отверждаются и не пригодны для дальнейшего использования (исключение – часть полиимидных смол, так как они обладают низким уровнем липкости). После изготовления должна быть возможность регулировать вязкость связующего, подбирая необходимые технологические параметры. Важно контролировать липкость препрега, чтобы обеспечить задачу послойной укладки.

Липкость зависит от многих факторов – в частности, от реологии и содержания связующего и летучих веществ, а также от условий окружающей среды. Она может характеризоваться количественно – это удельная сила отрыва или сдвига [9].

Липкость является одним из важнейших свойств, которое регулирует способность препрега к прокатке. Измерение липкости является не решенной до конца проблемой, вызывает некоторые трудности и может приводить к погрешности определения. Фактически, липкость материала оценивается тактильно при удалении пальца от поверхности. Количественное определение остается проблемой, поскольку сила и энергия разрыва играют не последнюю роль. Липкость – это свойство, необходимое для получения достаточной связи (адгезии) между смежными слоями препрега, которая должна быть не слишком высокой, чтобы слой препрега мог быть перемещен с подложки на выкладываемую поверхность [10]. Липкость также может быть определена как неполное соединение под воздействием контактного давления в течение короткого времени контакта [11].

Липкость описывают как основное вязкоупругое свойство препрега. С помощью анализа этого свойства можно определить четыре характеристических параметра материала: модуль релаксации, модуль без релаксации, время релаксации и начальное содержание пустот в препреге. Модули не зависят от температуры, в то время как время релаксации сильно зависит от нее, а также от вязкости матрицы. На время релаксации влияет количество смолы и волокон в препреге. Эти параметры также влияют на начальное содержание пустот в препреге [11].

Ранее авторами работы [11] липкость была определена как усилие отрыва при разделении двух пластин, связанных вязкой жидкостью. Количественный анализ показал линейную зависимость между силой липкости и вязкостью. Однако при высоких скоростях отделения пластин друг от друга экспериментальные данные отклонились от теоретических. Теория вязкого течения не была признана применимой по отношению к липкости, так как в большей степени она относилась к адгезивам [11].

Параметры, влияющие на липкость [12]:

- время контакта – время, в течение которого испытательный зонд и адгезив находятся в контакте под нагрузкой;
- контактная нагрузка – нагрузка в течение времени контакта;
- скорость разделения сформированного соединения;
- температура соединения;
- природа поверхности испытательного зонда;
- шероховатость поверхности испытательного зонда;
- толщина адгезива.

Адгезия измеряется удельной работой разрыва, которая необходима для разделения поверхностей, на единицу площади. При адгезионном отрыве нарушается взаимодействие между молекулами двух фаз. Методы измерения адгезии основаны на равномерном или неравномерном отрыве и сдвиге. Два последних метода по отношению к препрегам применить трудно из-за их способности вытягиваться при продольной нагрузке, поэтому за основу был выбран метод равномерного отрыва.

Когезия характеризует межмолекулярное сцепление внутри одной фазы, при когезионном отрыве нарушается взаимодействие между однородными молекулами в одной фазе.

«Мокрое» (когезионное) отлипание наблюдается в жидкоподобных смолах, которое приводит к образованию нитей смолы. Такие нити в значительном количестве остаются на пластине при низких скоростях подачи, поэтому достигается высокая адгезия между оснасткой и роликом. «Сухое» (межфазное) отлипание происходит в жестких материалах с небольшим или совсем незначительным осаждением смолы на пластине, метод характеризуется низкой адгезией (рис. 4).

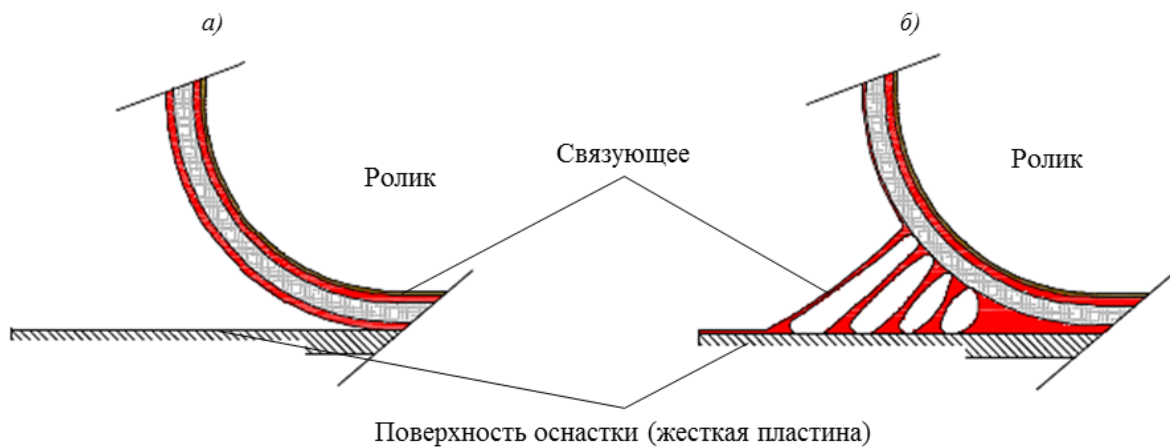


Рис. 4. Модели отлипания препрега с «сухим» или межфазным разрушением (а) и «мокрым» или когезионным разрушением (б)

В работе [13] рассматриваются и сравниваются различные методы определения липкости препрега; компания ChemInstruments разрабатывает приборы для определения липкости [14].

1. Метод определения с помощью вертикально расположенной металлической плиты основан на прикатывании роликом материала к пластине, которую затем ставят вертикально и оценивают степень удерживания препрега на пластине, т. е. липкость. Этот метод прост, но позволяет лишь грубо оценить липкость препрега, так как зависит от условий испытания. Оценивается пригодность для ручной выкладки.

2. Метод катящегося ролика (катящегося шарика) основан на измерении длины пробега катящегося ролика (шарика). Ролик (шарик) с разгонной площадки катится по препрегу и останавливается. Замеряется длина пробега ролика (шарика). Простой, недорогой метод, позволяет сравнить липкость препрегов, так как не показывает значения отрывной нагрузки. Используется для оценки пригодности ручной выкладки.

3. Метод равномерного отрыва [9, 15] – исследуется адгезия к подложке, а не к оснастке или другим слоям препрега. Измерение производится с помощью специального прибора.

В работе [9] описана методика измерения липкости препрегов, в основе которой лежит метод равномерного отрыва. Методика основана на измерении силы отрыва круглых образцов препрега (диаметром 2 см) от разделительной пленки.

В работе [15] использован метод равномерного отрыва с акустической эмиссией (датчик), связанной с когезионным разрушением адгезионных соединений. При акустической эмиссии происходит излучение механических волн от материала, которое вызвано перестройкой внутренней структуры. Количественно липкость выражается усилием отрыва, которое приходится на единицу площади.

4. Метод определения с помощью установки на базе разрывной машины. Условия проведения опыта можно приблизить к реальным условиям, оцениваются препреги для автоматизированных методов выкладки. Этим методом оценивается однородность липкости.

5. Метод определения «петлевой» липкости. Определяется сила, необходимая для отделения петли из препрега определенной ширины (адгезивом наружу) от пластины, имитирующей оснастку. Петлю приводят в контакт с поверхностью, отделяют и фиксируют силу, необходимую для отрыва.

6. Метод определения с использованием зонда. Возможно регулирование параметров, которые влияют на липкость. Плоский зонд контактирует с препрегом, отделяется, и прибор фиксирует значение липкости.

7. В патенте 1716398 (1992 г.) запатентовано устройство для определения липкости препрегов и клейких лент [16], которое предназначено для уменьшения трудоемкости при определении липкости, оно позволяет также увеличить точность исследования. В отличие от устройства, содержащего подвижный зонд, которое не позволяет оперативно определять липкость, данное изобретение имеет контактный элемент, позволяющий измерить липкость с высокой точностью и меньшей трудоемкостью.

8. В патенте 2549469 (2004 г.) запатентован прибор для количественного измерения липкости препрегов [17]. Липкость определяется на основании величины тягового усилия, которое затрачивается на перемещение платформы с образцом, контактирующим с роликом. При измерении липкости не достигаются реальные условия использования препрега, поэтому по результатам измерения невозможно точно предсказать, как поведет себя тот или иной материал при выкладке на обогреваемую платформу.

В работе [9] изучали кинетику отрыва поверхности от препрега на основе связующего ЭДТ-69Н (рис. 5). Видно, что с увеличением температуры сила отрыва уменьшается.

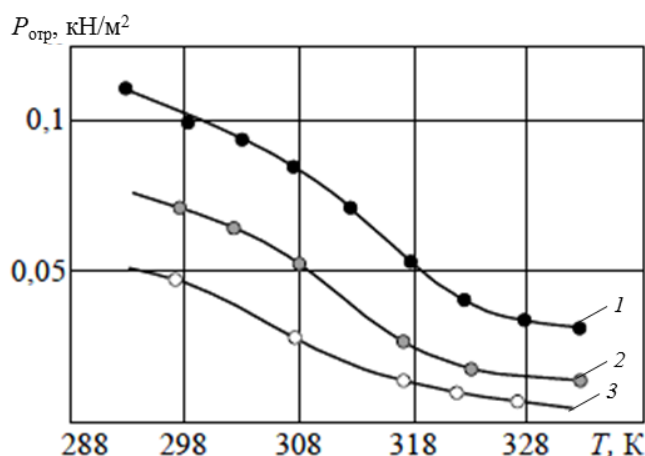


Рис. 5. Зависимость липкости препрега от температуры для угле- (1), органо- (2) и стеклолент (3)

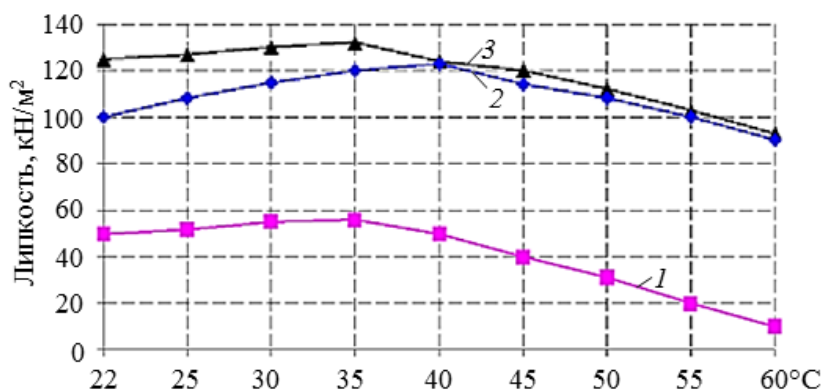


Рис. 6. Зависимость липкости препрега от температуры при различных сроках хранения: 1 – в исходном состоянии; 2, 3 – после 4 и 60 дней соответственно

В работе [18] исследовали влияние продолжительности хранения препрега из стеклоткани Т-10-80 и связующего ФПР-520 на изменение липкости. Полученные результаты показали, что кривые имеют максимум, после достижения которого с течением времени липкость снижается (рис. 6). В этой же работе сравнили липкость препрега со связующим ФПР-520 и препрега с этим же связующим, в который добавили дисперсный наполнитель $Al(OH)_3$. При температуре 22–45°C липкость меньше у препрега со связующим с дисперсным наполнителем (рис. 7).

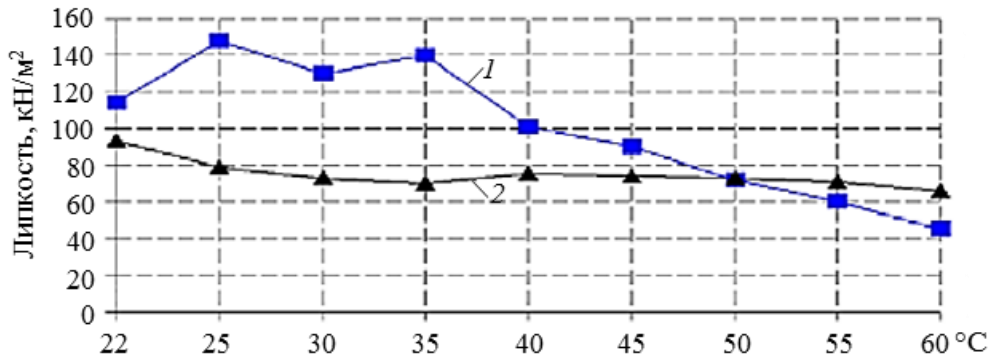


Рис. 7. Зависимость липкости препрегов на основе связующих ФПР-520 (1) и ФПР-520М (2) от температуры

Зависимость липкости препрегов от температуры позволяет при автоматизированной выкладке обеспечивать легкое отделение препрега от подложки и проход по лентотракту при пониженной температуре без налипания препрега на ролики, а также хорошую адгезию к оснастке и к слоям препрега за счет нагрева до температуры повышенной липкости.

В работе [11] протестирован ряд стандартных методов исследования липкости, которые включали катящийся шар, прочность на отрыв, фрикционную ленту и методы перевернутого зонда. Во всех этих методах получаются значения, которые отражают различные явления. Это затрудняет интерпретацию данных с точки зрения фундаментальных физических свойств, которые определяют физический смысл липкости, и может быть связано с методами определения, а также с субъективными методами измерения.

В работе [19] рассмотрены методы определения липкости с помощью испытательного зонда и отслаивания. С учетом проблем, существующих в данных методах, авторы разработали новый метод определения липкости. Так, оказалось, что метод испытательного зонда, чувствителен к шероховатости поверхности, которая вызвана волокнами и смолой, распределенными внутри образца. Этот метод, однако, считается менее подходящим для определения липкости препрега, выложенного методом ATL, из-за повышенной чувствительности к поверхностным и объемным воздушным каналам, кавитации, а в случае наличия непропитанных связующим мест дает неверный результат.

Метод отслаивания также имеет недостатки: отдельные этапы отслаивания не могут быть рассмотрены отдельно, что не дает возможности изучить досконально механизм процесса. Существуют значительные трудности в разделении усилия изгиба от адгезионных сил, так как препрег не может быть рассмотрен как жесткая подложка.

С учетом данных проблем разработан новый метод – метод «плавающего» ролика, который модифицировали путем использования уплотняющего ролика. Значение липкости, полученное этим методом, считается аналогичным значению работе адгезии. Хотя это метод считается непригодным для анализа различных степеней липкости, но вполне применим для сравнения материалов. Метод используется для определения этой характеристики для процессов ATL и ручной выкладки.

В ВИАМ разработан материал ВКУ-25, который успешно опробован при изготовлении деталей крыла самолета МС-21 и элементов конструкции мотогондолы двигателя ПД-14. Это позволит успешно изготавливать композитные конструкции серийных изделий методом автоматизированной выкладки.

В настоящее время разрабатывается технология производства препрегов, адаптированных к автоматизированной выкладке на установке Coatema VL-2800 с использованием наполнителей, изготавливаемых фирмой UMATEX. Данные препреги с толщиной монослоя 0,18–0,20 мм, на рабочую температуру не менее 120°C, предназначены для применения в конструкции хвостового оперения самолета МС-21.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002. М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 23–47.
2. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. №3. С. 8–13.
3. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
4. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
5. Гусев Ю.А., Борщев А.В., Хрульков А.В. Особенности препрегов для автоматизированной выкладки методами ATL и AFP // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №3. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-6-6.
6. Тимошков П.Н. Оборудование и материалы для технологии автоматизированной выкладки препрегов // Авиационные материалы и технологии. 2016. №2 (41). С. 35–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-35-39.
7. Sloan J. ATL and AFP: defining the megatrends in composite aerostructures // High performance composites: Garden Business Media Inc., 2008. P. 20–25.
8. Crossley R.J., Schubel P.J., Warrior N.A. The experimental characterization and Investigate on of prepreg tack // Proceedings of ICCM-18. Edinburgh, 2009. P. 1–11.
9. Постнов В.И., Никитин К.Е., Петухов В.И., Бурхан О.Л., Орзаев В.Г. Метод и устройство для определения липкости препрегов // Авиационные материалы и технологии. 2009. №3. С. 29–33.
10. Dubois O., Le Cam J.-B., Beakou A. Experimental analysis of prepreg tack // Experimental Mechanics, Society for Experimental Mechanics. 2010. №50. P. 599–606.
11. Ahn K.J., Seferis J.C., Pelton T., Wihelm M. Analysis and Characterization of Prepreg Tack // Polymer Composites. 1992. Vol. 13. No. 3. P. 197–206.
12. Gillanders A.M., Kerr S., Martin T.J. Determination of prepreg tack // International Journal Adhesion and Adhesives. 1981. Vol. 1. No. 3. P. 125–134.
13. Орлов Е.В., Гусев Ю.А., Хрульков А.В., Коротков И.А. Сравнительный анализ методов определения липкости препрега // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №7.

- Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-9-9.
14. ChemInstruments: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cheminstruments.com/> (дата обращения: 02.07.2018).
15. Постнов В.И., Бурхан О.Л., Мантусова О.Ю. Методика замера липкости препрегов // Сб. тез. докл. Междунар. науч.-технич. конф. «Современные достижения в области клеев и герметиков. Материалы, сырье, технологии». Н. Новгород: Гладкова О.В., 2013. 227 с.
16. Устройство для определения липкости препрегов и клейких лент: пат. 1716398 СССР; заявл.: 23.01.90; опубл.: 29.02.92.
17. Прибор для измерения липкости препрегов: пат. 2549469 Рос. Федерация; заявл.: 20.02.14; опубл.: 27.04.15.
18. Стрельников С.В., Петухов В.И., Постнов В.И., Швец Н.И. Новые решения в технологии изготовления препрегов для панелей интерьера // Известия СамНЦ РАН. 2011. Т. 13. №4 (2). С. 498–507.
19. Crossley R.J., Schubel P.J., Warrior N.A. The experimental determination of prepreg tack and dynamic stiffness // Composites: Part A. 2012. No. 43. P. 423–434.