

УДК 678.8

*Е.В. Орлов¹, Ю.А. Гусев¹, А.В. Хрульков¹, И.А. Коротков¹***СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИПКОСТИ ПРЕПРЕГА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-9-9

Для повышения точности выкладки при изготовлении крупных деталей из полимерных композиционных материалов с использованием препрегов во всем мире широко используются методы автоматизированной выкладки ATL и AFP. Однако не все марки препрегов подходят для укладки этими способами – к ним предъявляются особые требования по технологической липкости, обеспечивающие точную фиксацию и ориентацию слоев, предусмотренных конструкторской документацией, а также легкое отделение от технологической подложки.

Стандартного метода определения липкости препрега не существует, поэтому в данной статье рассматриваются различные широко используемые в российской и зарубежной промышленности методы, делаются выводы об их точности, эффективности и применимости для различных технологий выкладки.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, препрег, связующее, ATL, AFP, липкость.

ATL and AFP methods of automated placement are widely used worldwide to increase the productivity and accuracy of prepregs placement in manufacture of large PCM-based parts. However conventional prepregs are not always suitable for processing by these methods - they are subject to specific requirements in technological tack providing with precise fixation and orientation of layers and easy separation from backing paper.

There is no standard method for the tack determination, so this article reviews various widely used in Russian and international industry tack determination methods, conclusions are made on their precision, efficiency and usability for different prepreg laying methods.

The work was executed within implementation of the complex scientific direction 13.2. «Constructional PCM» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: polymer composite material, prepreg, resin, ATL, AFP, tack.

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 мировой промышленности полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят все более широкое применение. Они позволяют изготавливать детали с гарантированным уровнем прочностных свойств при существенном снижении массы, придавать деталям необходимые физические и химические характеристики в зависимости от реальных условий эксплуатации, обеспечивать повышение надежности и долговечности машин по сравнению с традиционными конструкциями. Изделия из ПКМ весьма технологичны: для их изготовления требуется минимальный объем механической

обработки, существенно меньшая чем обычно трудоемкость сборки, простые методы и средства коррозионной защиты и т. д. [1–4].

В настоящее время ПКМ (стекло-, угле- и органопластики) благодаря своим уникальным свойствам нашли применение в различных отраслях промышленности [5–8]. Существует большое количество методов получения изделий из ПКМ, одним из которых является автоматизированная выкладка препрега [9, 10].

Современные технологии автоматизированной выкладки, такие как автоматизированные выкладки лент (ATL) и волокон (AFP), имеют чувствительность к уровню технологической липкости препрега. Липкость должна обеспечивать точную фиксацию и ориентацию слоев, предусмотренных конструкторской документацией, а также оптимальное отделение препрега от технологической подложки во избежание попадания неотделенной подложки в выкладываемую деталь или отрыва части волокон и связующего от препрега вместе с подложкой [11].

Под технологической липкостью (в отличие от функциональной – скотчи, одно- и двухсторонние, маркировочные и штрих-кодовые наклейки и т. п.) понимается свойство пограничных слоев препрега оказывать сопротивление разделению, перемещению находящихся в контакте поверхностей в процессе технологического цикла выкладки препрегов при формировании заготовки детали в соответствии с конструкторской документацией. Оценка липкости проводят при контакте между слоями препрегов, между слоем препрега и оснасткой, а также между препрегом и технологической подложкой [12].

В данной статье рассмотрен целый ряд существующих методов оценки липкости в разных областях производства. Анализируя эти материалы, можно сделать вывод, что стандартных методов для определения липкости препрега не существует [13, 14]. Обычно на практике уровень липкости препрега указан производителем как высокий, средний или низкий, что не дает возможности объективного контроля и сравнительной оценки липкости в условиях широкой кооперации – от изготовителя препрега до потребителя. Из-за отсутствия стандартного метода определения липкости препрега затруднено проведение входного и выходного контроля липкости материалов на всех этапах работы с препрегом. В данной статье рассматриваются различные методы определения липкости, применяемые в настоящее время в мировой и отечественной практике, и их сравнительный анализ [15].

Материалы и методы

Метод определения липкости при помощи вертикально расположенной металлической плиты

Метод заключается в определении уровня липкости путем определения способности препрега удерживаться на вертикально расположенной плите. В качестве материала для плиты используется коррозионностойкая сталь с отполированной поверхностью и резиновый ролик $\varnothing 25,4$ мм с тарированным усилием для прикатки препрега.

Методика испытаний.

1. Испытание проводится при температуре $21 \pm 5^\circ\text{C}$ и влажности до 60%.
2. Вырезаются образцы препрега размером $76,2 \times 25,4$ мм; укладка проводится под углом 0 град по длинной стороне.
3. Образец выкладывается на плиту и прикатывается роликом.
4. Второй образец препрега укладывается на первый с повторением прикатки роликом.
5. Плита устанавливается вертикально в специальном зажиме.
6. Липкость разделяется по категориям, обозначаемым римскими цифрами, и определяется по следующим признакам:

I – препрег жесткий, липкость препрега к самому себе и металлической плите отсутствует;

II – препрег практически сухой, но слегка драпируемый;

III – препрег прилипает к самому себе, но не имеет липкости к вертикальной металлической плите или может удержаться на ней до 30 мин;

IV – хорошая липкость – препрег прилипает к самому себе и к металлической плите, может удержаться на плите 30 мин и более;

V – условно высокая липкость – препрег прилипает к рукам или перчаткам, но при этом связующее на них не остается;

VI – высокая липкость – связующее при отлипании препрега от плиты остается на ее поверхности.

Данный метод является самым простым из приведенных в данной статье и имеет шкалу липкости, однако не является точным и сильно зависит от условий испытания – качества поверхности плиты, усилия и равномерности прикатки, а также массы образца препрега. Таким образом, его можно использовать только для грубой оценки липкости препрега и оценить пригодность препрега для ручного метода выкладки.

Метод катящегося ролика для определения липкости препрегов

Метод испытания предусматривает измерение пути, пройденного катящимся роликом по поверхности исследуемого препрега и измеряемого в мм. Используется металлический ролик массой 55 г, $\varnothing 15$ мм, длиной 40 мм, разгонная площадка для ролика длиной 500 мм устанавливается под углом 5 град к поверхности препрега (рис. 1).

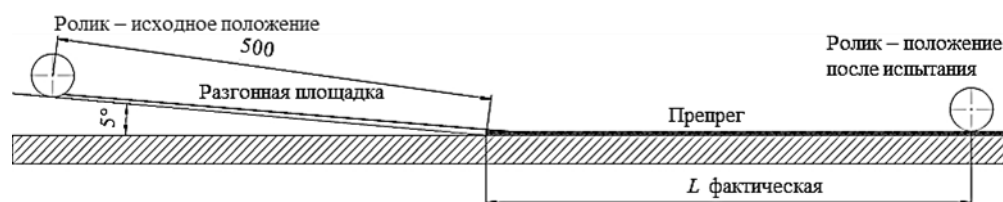


Рис. 1. Схема установки для измерения липкости

Методика испытаний

1. Испытание проводится при температуре $22 \pm 5^\circ\text{C}$ и влажности до 60%.
2. Вырезается образец препрега размером 800×80 мм, выкладывается на основную панель без складок и вздутий и прикатывается роликом с тарированным усилием.
3. С разгонной площадки, расположенной под углом 5 град к основной панели, запускается ролик (путь разгона 500 мм).
4. После остановки ролика проводится замер длины пробега в мм (линейка закреплена на столе).
5. Испытания проводят путем замера десяти последовательных пробегов ролика (ролик протирается после каждого испытания тампоном, смоченным спирто-ацетоновой смесью).

Обработка результатов

1. Исключаются 2–3 замера с минимальным и максимальным значением.
2. С помощью оставшихся значений вычисляют среднее арифметическое, которое и является показателем липкости при температуре испытания.

Данный метод широко использовался в советской промышленности начиная с 1980-х годов для оценки липкости в основном растворных препрегов для ручной вы-

кладки или намотки, которые по современным меркам имели довольно высокий уровень липкости. Значение пройденного роликом пути, полученное по данному методу, позволяет оценить липкость препрега, которая, однако, является сравнительной и не показывает реальную отрывную нагрузку. Пройденный путь также сильно варьируется при множественных испытаниях, что показывает недостаточную точность измерения липкости таким методом. Для данного метода не существует четкой шкалы, характеризующей липкость препрега, но при этом он не требует дорогостоящего оборудования для проведения оценочных испытаний.

Метод равномерного отрыва от субстрата

Метод основан на измерении силы равномерного отрыва круглых образцов $\varnothing 2$ см препрега (адгезив) от разделительной пленки (субстрат). Испытуемый материал закрепляется на специальном вертикально перемещающемся штоке, разделительная пленка – на неподвижном столике. При этом регулируется сила и интервал прижима исследуемого образца к субстрату.

Для реализации методики используется специальная установка ИЛП, которая включает систему нагружения, силоизмеритель, устройство термостатирования и прибор, регистрирующий усилие отрыва адгезива от субстрата (рис. 2) [16].

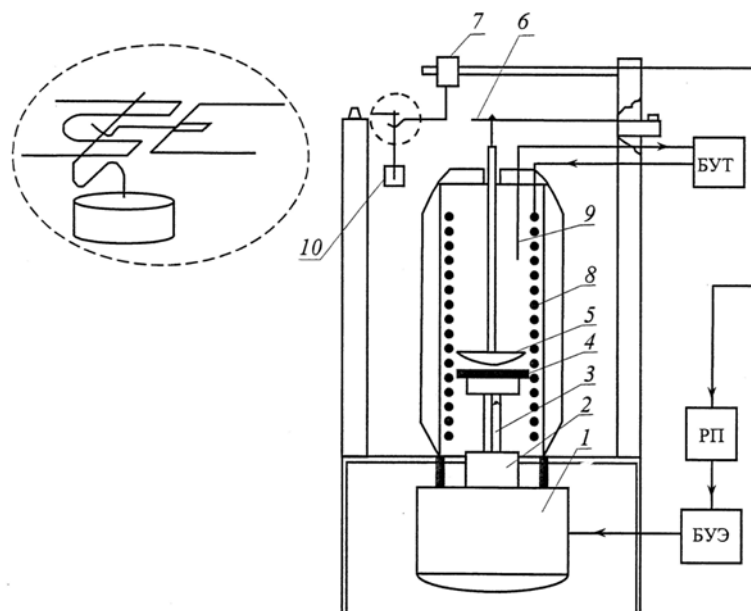


Рис. 2. Схема установки ИЛП:

1 – электродвигатель; 2 – редуктор; 3 – стержень; 4 – столик с образцом; 5 – контактная поверхность; 6 – упругая стальная пластина; 7 – индукционный измеритель линейных перемещений; 8 – нагревательный элемент; 9 – терморезистор; 10 – дополнительные грузы; БУЭ – блок управления электродвигателем; РП – регистрирующий прибор; БУТ – блок управления термостатом

Контактная поверхность (пленка) имеет форму усеченной сферы, что обеспечивает хороший контакт с испытуемым материалом и уменьшает явления смачивания, в результате чего отрыв происходит по механизму симметричного отслаивания.

Для изучения процесса отрыва препрега от пленки используется датчик акустической эмиссии вязкого контактного отрыва.

Данный метод позволяет получать значения липкости препрега при различных температурах в числовом выражении, однако не является приближенным к реальным

условиям переработки препрега, так как изучает адгезию не к оснастке или другим слоям препрега, а к субстрату – разделительной пленке или технологической подложке.

Метод определения липкости при помощи установки на базе разрывной машины

В данном методе для имитации поверхности оснастки используется плита из нержавеющей стали. Образец препрега длиной 300 мм совместно с плитой протягивается через набор подпружиненных роликов и отделяется от плиты под углом 90 град. Первые 160 мм препрега образца имеют бумажную подложку с обеих сторон и используются для определения усилия протяжки, а с последних 140 мм нижняя подложка удалена, и образец этой стороной прилеплен к плите. Усилие фиксируется в процессе протяжки всего образца через приспособление.

Схема установки для проведения испытания липкости препрега на разрывной машине приведена на рис. 3. По результатам записи усилий протягивания ленты определяют липкость препрега путем вычитания значения усилия протяжки свободного конца образца из значения усилия протяжки прилепленного к плите участка образца (рис. 4). Проводят испытание от 3 до 5 образцов для усреднения значения липкости. Статистический анализ показывает некоторый разброс значений липкости, по которому можно оценить однородность липкости препрега.

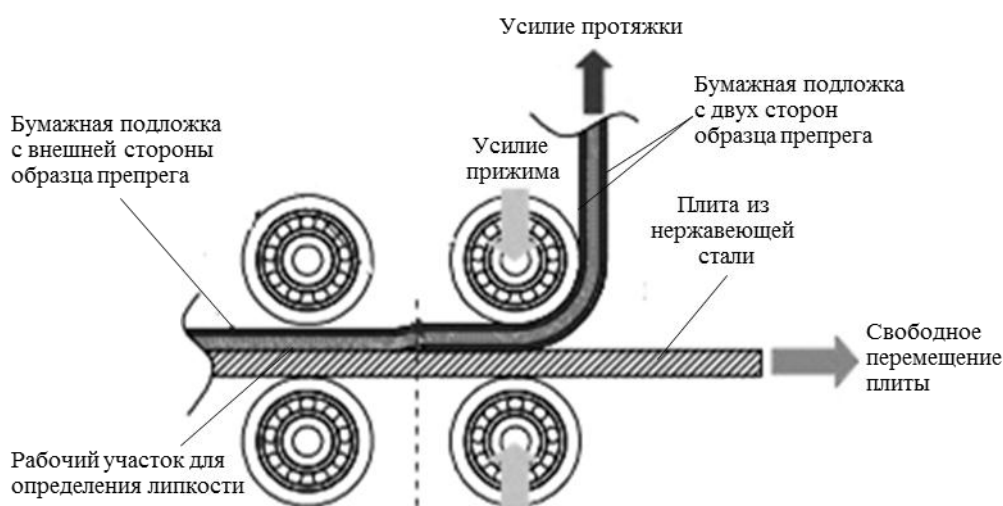


Рис. 3. Схема проведения испытания липкости препрега на разрывной машине

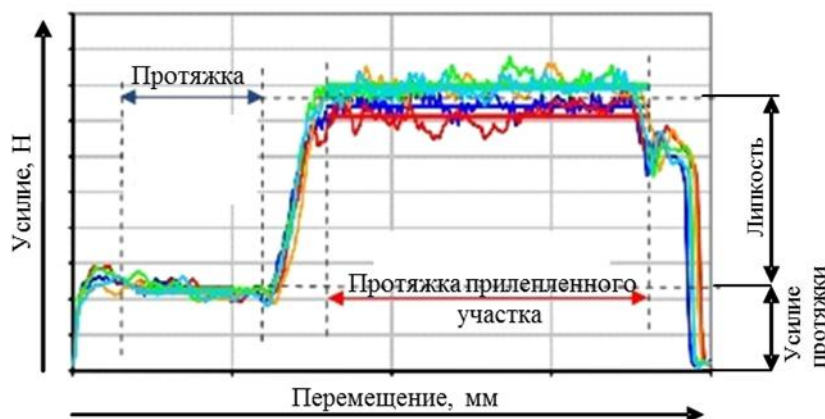


Рис. 4. График процесса, полученный при испытании липкости препрега на разрывной машине

Данный метод показывает наименьший разброс результатов при испытании образцов однонаправленных препрегов, которые чаще всего используются в автоматизированных методах выкладки. Липкость также зависит от температуры, при которой проводится испытание, скорости протяжки, усилия прижима препрега роликами и качества поверхности оснастки, однако эти параметры можно зафиксировать, приблизив к реальным условиям, при которых будет происходить выкладка данного препрега.

В рамках реализации данного метода в мировой практике часто используется приспособление, разработанное для изучения сопротивления отслаиванию клеев и адгезивов методом «плавающего ролика» по стандарту ASTM (рис. 5).

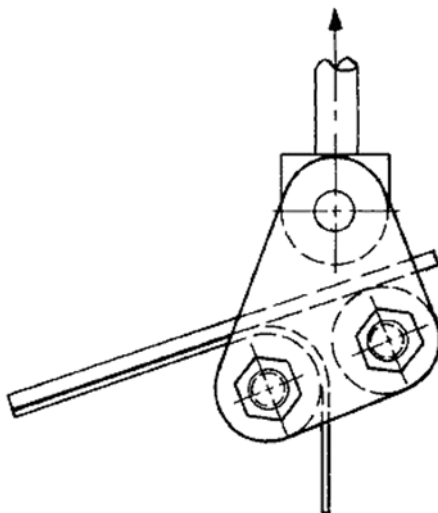


Рис. 5. Приспособление для изучения сопротивления отслаиванию методом «плавающего ролика»

Лента препрега шириной 12 мм аналогично описанному выше процессу прикатывается к металлической плите, свободный конец препрега с подложкой протягивается через систему жестких (не подпружиненных) роликов с постоянной скоростью 152 мм/мин, при этом фиксируется усилие отслаивания. Данное приспособление является стандартным, но требует предварительной равномерной прикатки препрега к плите.

Использование данного метода позволяет получить численные значения липкости препрега при условиях, близких к автоматизированной выкладке, так как система роликов аналогична прикаточным роликам установок для автоматизированной выкладки, имеет стандартизированные приспособления, что позволяет достигать воспроизводимости результатов измерений, но требуются дорогостоящее испытательное оборудование и оснастка.

Результаты и заключения

Описанные методы определения липкости при помощи вертикально расположенной металлической плиты и определения липкости препрегов с помощью катящегося ролика просты с точки зрения требуемых устройств, но имеют меньшую точность и воспроизводимость получаемых результатов. Эти методы используются при оценке липкости препрегов, применяемых для ручной выкладки, но точности получаемых с их помощью результатов недостаточно при использовании автоматических технологий выкладки препрега. При методе равномерного отрыва от субстрата используется экспериментальное оборудование и образцы специальной формы, что не позволяет широко

применять его в авиационной промышленности и однозначно сопоставлять результаты с реальными условиями выкладки.

Более сложный и дорогостоящий метод определения липкости с использованием разрывной машины имеет очень большой потенциал развития, так как позволяет проводить очень точные измерения липкости (при широком диапазоне изменения условий окружающей среды) и наиболее приближен к условиям автоматизированной выкладки. В этом методе можно использовать стандартизированное оборудование и приспособления, что позволяет увеличить воспроизводимость результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // *Вестник Российской академии наук*. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
3. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // *Вестник Российской академии наук*. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
4. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // *Наука и жизнь*. 2010. №4. С. 2–7.
5. Эпоксидная композиция: пат. 2447104 Рос. Федерация; опубл. 05.10.10.
6. 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. №S. С. 260–265.
7. Shaghghi S., Beheshty M.H., Rahimi H. Preparation and rheological characterization of phenolic/glass prepregs // *Iranian Polymer Journal*. 2011. V. 20 (12). P. 969–977.
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. Тимошков П.Н., Хрульков А.В. Современные технологии переработки полимерных композиционных материалов, получаемых методом пропитки расплавным связующим // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2014. №8. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.01.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-4-4.
10. Grimshaw M.N. Automated Tape Laying // *Composites*. 2001. V. 21. P. 480–500.
11. 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: 20.01.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-6-6.
12. Платонов А.А., Душин М.И. Конструкционный углепластик ВКУ-25 на основе однонаправленного препрега // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №11. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.01.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-6-6.
13. Banks R. et al. Development of a new structural prepreg: characterisation of handling, drape and tack properties // *Composite Structures*. 2004. V. 66 (1–4). P. 169–174.
14. 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.
15. 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.
16. 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.