

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-33-46

ЛИПКОСТЬ ПРЕПРЕГОВ КАК ФУНКЦИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ВЫКЛАДКЕ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ И ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.В. Хрульков¹, К.И. Донецкий¹, Д.А. Мельников¹, О.Н. Клименко¹, А.В. Славин¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Полимерные композиционные материалы постепенно заменяют металлы, в том числе в таких ответственных конструкциях, как крыло самолета или фюзеляж. Одним из технологических переделов при изготовлении заготовок будущих деталей является процесс выкладки препрега на оснастку. При выполнении выкладки особое значение имеет липкость препрега. Липкость препрега к подложке должна быть такой, чтобы он не отделялся от нее при транспортировке и легко отделялся при перемещении на оснастку. Проанализирована зависимость липкости от температуры, силы уплотнения и скорости отделения от подложки.

Ключевые слова: препрег, липкость, когезия, адгезия, температура, оснастка

Для цитирования: Хрульков А.В., Донецкий К.И., Мельников Д.А., Клименко О.Н., Славин А.В. Липкость препрегов как функция различных параметров при выкладке заготовок деталей и образцов из полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ. 2025. № 3 (145). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-33-46.

Scientific article

PREPREG TACK AS A FUNCTION OF VARIOUS PARAMETERS DURING LAYING OUT BLANKS OF PARTS AND SAMPLES FROM POLYMER COMPOSITE MATERIALS

A. V. Khrulkov¹, K. I. Donetsky¹, D. A. Melnikov¹, O. N. Klimenko¹, A. V. Slavin¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Polymer composite materials are gradually replacing metals, including in such important structures as an aircraft wing or a fuselage. One of the technological stages in the manufacture of blanks for future parts is the process of laying out the prepreg on the tooling. When laying out, the stickiness of the prepreg plays an important role. The stickiness of the prepreg to the substrate should be such that it does not separate from it during transportation and is easily separated when moving onto the tooling. An analysis of the stickiness level depending on temperature, compaction force, and the speed of separation from the substrate is given in this article.

Keywords: prepreg, tack, cohesion, adhesion, temperature, tooling

For citation: Khrulkov A.V., Donetsky K.I., Melnikov D.A., Klimenko O.N., Slavin A.V. Prepreg tack as a function of various parameters during laying out blanks of parts and samples from polymer composite materials. *Trudy VIAM*, 2025, no. 3 (145), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-33-46.

Введение

Использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) при изготовлении элементов конструкций самолетов, автомобилей, строительных конструкций и в других отраслях промышленности продолжает неуклонно расти [1–5]. При этом проводятся исследования, направленные на определение наиболее важных технологических решений, включая особенности процессов изготовления препрегов, моделирование процессов выкладки и отверждения, а также на изучение свойств и дефектов ПКМ, разработку методов их обнаружения и др. [6–14].

Одной из важных технологических характеристик препрега является липкость, т. е. способность препрега фиксироваться на поверхности оснастки или прилипать к предыдущим слоям препрега при легком надавливании или под действием уплотняющего катка.

На рис. 1 схематично изображена зависимость липкости от температуры с учетом сил когезии и адгезии.

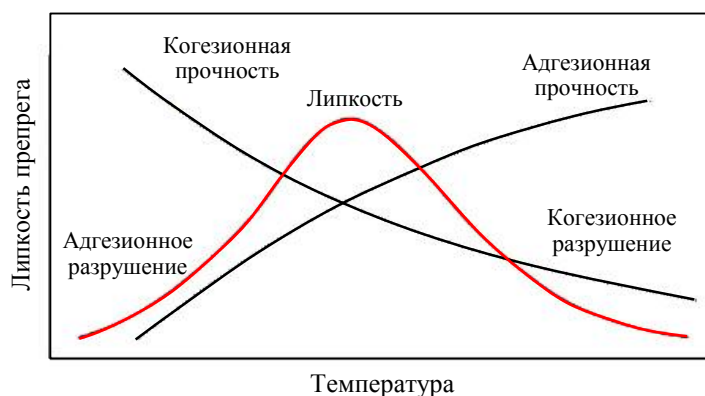


Рис. 1. Зависимость липкости от температуры с учетом сил когезии и адгезии [15]

При контроле липкости препрега особое значение имеют условия проведения испытания, температура материала, оснастки и внешней среды. Температуру можно регулировать с помощью различных источников тепла, например инфракрасных обогревателей или более энергоэффективных светодиодных матриц и импульсных ксеноновых световых обогревателей. При определении оптимальной температуры выкладки слоев препрега возникает конфликт, вызванный необходимостью образования достаточного контакта между слоями препрега (для чего требуются более высокие температуры) и достаточной когезионной прочности связующего (необходимы более низкая температура и, соответственно, более высокая вязкость). Так, высокотемпературный режим укладки препрега приведет к отличной консолидации, но соединение слоев будет непрочным и легко разрушится. Таким образом, максимальная липкость достигается при температуре, обеспечивающей оптимальный компромисс между этими двумя факторами.

В процессе выкладки могут возникнуть дефекты, вызванные недостаточной (рис. 2, а) или излишней липкостью (рис. 2, б), а также избыточной жесткостью наполнителя.

Процесс образования дефектов при выкладке слоев препрега проиллюстрирован на рис. 2. Так, если силы липкости меньше прикладываемых растягивающих сил F , то формируется «мостик» (провисание), как показано на рис. 2, а. Такие перемычки обычно образуются в зоне вогнутой формы оснастки. В случае, представленном на рис. 2, б, направление приложенной силы приводит к образованию морщин. Высокая

жесткость слоистого наполнителя вызывает отрыв материала от оснастки на выпуклых поверхностях (рис. 2, в).

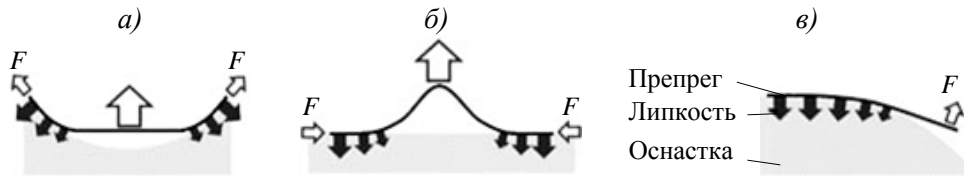


Рис. 2. Формирование дефектов при выкладке: а – «мостик»; б – складка/морщина; в – упругий отскок [16]. F – прикладываемые растягивающие силы

Таким образом, липкость является важнейшей технологической характеристикой препрега, от которой зависит качество изготавливаемого изделия.

Основные методы определения липкости

Для измерения липкости используются различные методы испытаний, наиболее распространенные представлены на рис. 3

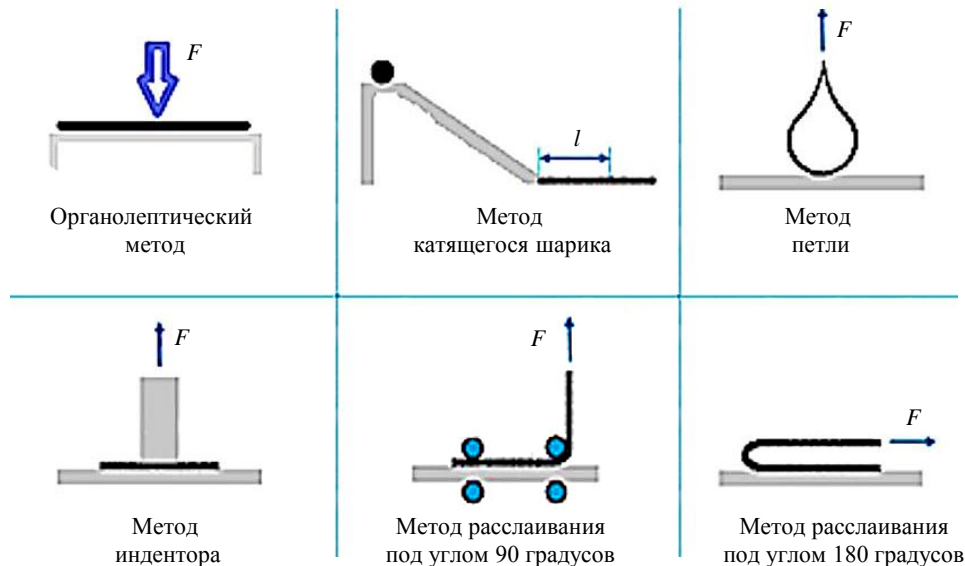


Рис. 3. Методы определения липкости препрега. F – прикладываемые растягивающие силы

Органолептический анализ липкости позволяет определить механический структурный признак, относящийся к силе F , необходимой для устранения контакта с препрегом. Данная методика не требует никакого оборудования, но липкость препрега, определяемая таким образом, является чисто субъективной и может быть охарактеризована как хорошая, плохая, низкая или высокая без численной оценки уровня.

Метод катящегося ролика (на длину l) или шарика несложен, но отличается невысокой воспроизводимостью и большим разбросом результатов испытаний, что не позволяет широко его использовать.

Методы петли и индентора (зондирования) хорошо характеризуют липкость препрегов и могут использоваться для определения усилия отрыва препрега от

подложки в зависимости от продолжительности и усилия прижатия, а также температуры препрега и подложки.

Для определения величины липкости методом расслаивания необходимо использовать два слоя препрега, которые должны быть нагружены так, чтобы связь между ними исчезла из-за нагрузки, превышающей силы липкости (когезии). Это достигается за счет того, что макромолекулярные цепочки смолистой составляющей связующего могут свободно перемещаться в процессе, называемом аутогезией, которая также известна как самосвязывание (процесс, описывающий образование связей между двумя поверхностями идентичных полимеров при повышенных температурах). Соотношение площади контакта и общей площади служит количественным показателем качества консолидации и определяется как степень полного (плотного, истинного) контакта (СПК) [15].

Липкость как функция температуры и скорости укладки/уплотнения, несмотря на достижение высокого значения СПК, снижается с уменьшением скорости взаимного отрыва слипшихся поверхностей, как только достигается режим когезионного разрушения.

На основании этого наблюдения высказано предположение, что максимальная СПК может быть недостаточным критерием для оптимизации процессов автоматизированной выкладки, поскольку липкость препрега зависит как от фазы уплотнения, влияющей на СПК, так и от последующего этапа изменения связи/раскрепления.

Сочетание моделей формирования контакта и адгезии позволяет оценить липкость между двумя слоями терморезактивного препрега, которые консолидированы произвольным образом в зависимости от температуры и скорости выкладки, давления уплотнения и фазы консолидации, а также последующей фазы без давления после нанесения материала [16–18].

Липкость, измеряемая стандартным тестом на изотермическое отслаивание

В попытке соотнести установленную СПК с экспериментальным значением в работе [19] использована стандартная процедура испытаний (рис. 4).

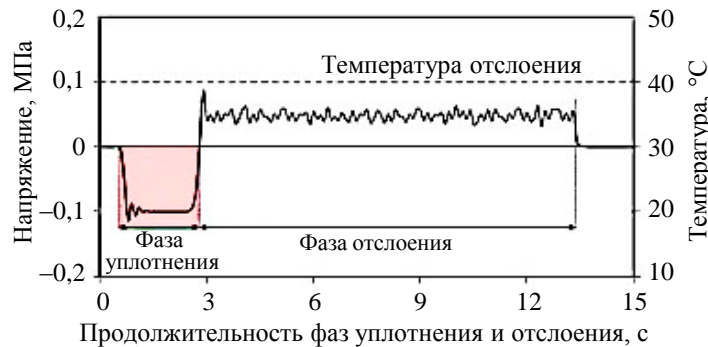


Рис. 4. Изменение осевого напряжения (идеализированное) при стандартном изотермическом испытании [19]

Продолжительность выдержки и давление на этапе уплотнения, а также температура могут быть постоянными или варьироваться.

Цикл измерения включает короткую фазу уплотнения при фиксированной температуре (20–60 °C с шагом 5 °C), за которой следует фаза отслоения при той же температуре. Этот изотермический подход считается стандартным, поскольку является наиболее распространенным способом экспериментального определения липкости препрега с помощью универсальных испытательных машин или реометров в сочетании с климатическими камерами.

Построение графика полученных экспериментальных результатов в виде функции температуры уплотнения/отслоения генерирует точки данных липкости (рис. 5), которые впоследствии аппроксимированы с помощью кривых Гаусса.

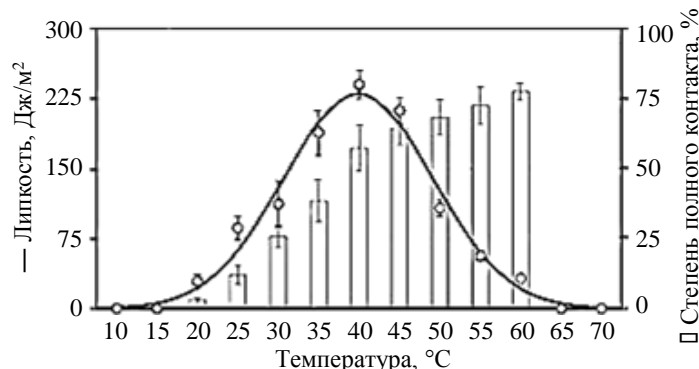


Рис. 5. Зависимость значений липкости, полученных в результате стандартной процедуры испытания, от температуры [19]

Значения СПК дополнительно нанесены на вторичную вертикальную ось (рис. 5) и демонстрируют очень схожие тенденции увеличения липкости вплоть до средних температур $\sim 40^\circ\text{C}$, где зафиксировано максимальное значение. С этого момента липкость резко уменьшается, в то время как СПК продолжает монотонно увеличиваться, приближаясь к граничному значению 100%. Экспериментально установлено прогрессивное увеличение СПК в зависимости от температуры. Снижение липкости при более высоких температурах вопреки растущей СПК объясняется тем, что при повышении температуры прочность связующего уменьшается, и если сила адгезии превышает силу когезии (при температуре $>40^\circ\text{C}$), то происходит когезионное разрушение.

Влияние давления и продолжительности уплотнения на формирование контакта между слоями препрега

В работе [19] рассмотрено, как при выкладке препрега между его слоями за счет сил уплотнения возникает контакт, площадь которого зависит от давления и продолжительности уплотнения, а также температуры.

Зависимости СПК при уплотнении слоев препрега цилиндром $\varnothing 12$ мм от давления (0,02; 0,1 и 0,2 МПа) и продолжительности уплотнения, а также от температуры (20, 30, 40, 50 и 60°C) представлены на рис. 6.

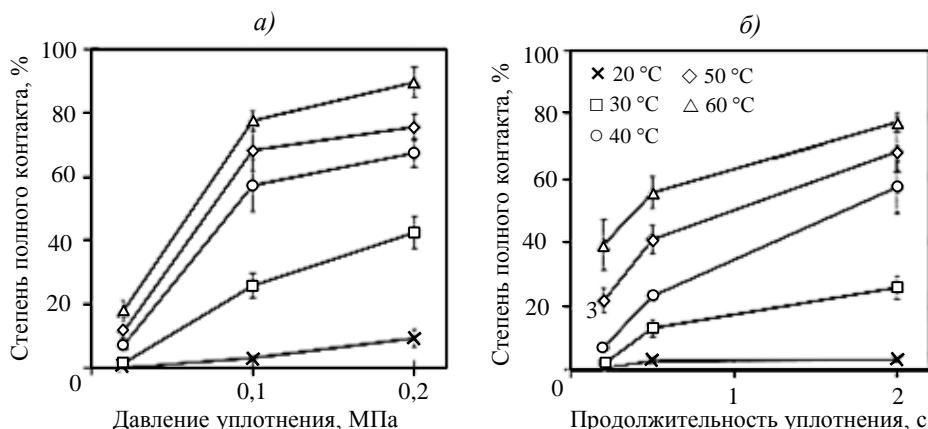


Рис. 6. Зависимости степени полного контакта от давления при продолжительности уплотнения 2 с (а) и от продолжительности уплотнения при давлении уплотнения 0,1 МПа (б) при различных температурах [19]

Из приведенных графиков видно, что СПК возрастает при увеличении давления и продолжительности уплотнения. Кроме того, особое значение для уплотнения препрега при выкладке имеет температура.

Влияние материала подложки на липкость препрега

Для определения липкости препрега к различным материалам выполнены исследования с использованием теста на прилипание зонда (метод зондирования). Измеренные данные аппроксимировали кривыми Гаусса, что позволяет рассчитать такие характеристики кривой, как максимальная липкость и липкость как функция температуры. Распределение Гаусса для температурной зависимости, а также его соответствующие экспериментальные результаты определения липкости между двумя слоями препрега представлены на рис. 7 [19]. Параметр аппроксимации a представляет собой максимальную липкость при температуре b . Параметр c определяет форму наклона кривой и, следовательно, чувствительность липкости (в мкДж/мм²) препрега к отклонению температуры.

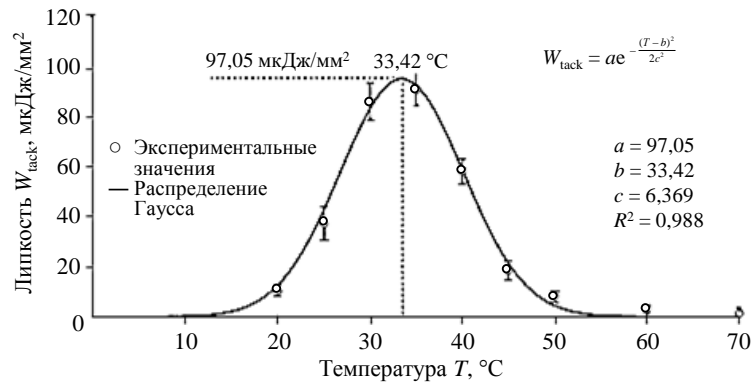


Рис. 7. Зависимость липкости от температуры [19]

На рис. 8 показаны зависимости липкости препрега к подложкам из различных материалов от температуры. Представлены экспериментальные данные и соответствующие кривые Гаусса. Как правило, липкость препрега по отношению к исследуемым твердым подложкам оказывается значительно меньше (в $\sim(2-2,5)$ раза), чем между двумя слоями препрега.

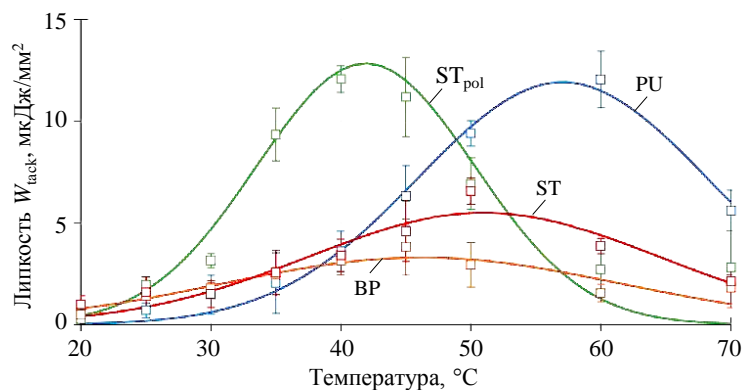


Рис. 8. Температурные зависимости липкости препрега к поверхностям из различных материалов (BP – антиадгезионная бумажная подложка, PU – полиуретан, ST – сталь, ST_{pol} – полированная сталь) [19]

Липкость препрега к полированной стали максимальная, к антиадгезионной бумаге – минимальная. Липкость к полиуретану также имеет высокую величину, а липкость к стальной поверхности занимает среднее положение.

В работах [17–20] проведены испытания по определению величины липкости в процессе изготовления препрегов или изделий из них. Исследовано влияние липкости на качество выкладки, описаны особенности липкости препрега к лентотракту и поверхностям, на которые осуществляется выкладка. В результате таких исследований можно сформулировать требования к адгезионным характеристикам подложек и оснастки.

Значительная разница в липкости препрегов по отношению к различным контактными материалам также приведена в работе [16]. Определены максимальная величина липкости при склеивании листов препрегов ($42,41 \pm 1,66$ Н) и значение липкости для препрега к стали ($5,07 \pm 0,53$ Н).

При сравнении липкости между двумя слоями препрега, а также между препрегом и другими материалами максимальное значение получено для пары «препрег–препрег». Кроме того, в работе [21] показано, что адгезионные характеристики пары «препрег–препрег» в 2,5–5,5 раза больше, чем липкость препрега к другим подложкам, включая температурные сдвиги в системе «препрег–сталь», в зависимости от температуры и поверхности. Экспериментальные значения липкости, впоследствии подтвержденные результатами испытаний при автоматизированной выкладке, показаны на рис. 9 (липкость измерена на ленте препрега шириной 75 мм).

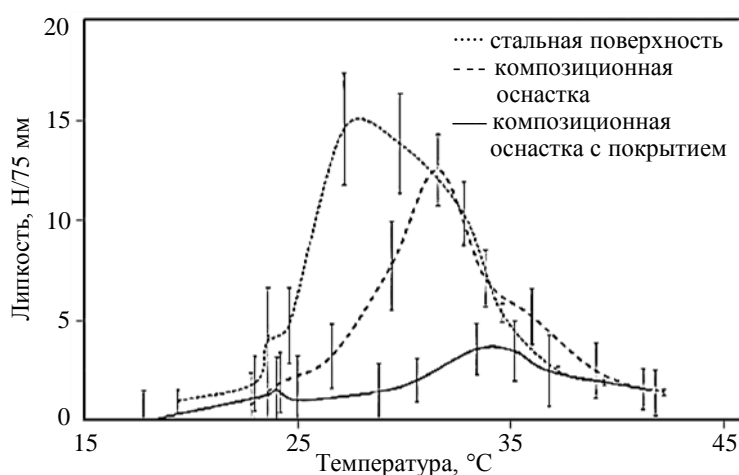


Рис. 9. Липкость препрега к различным видам оснастки [22]

Величины липкости препрега к различным материалам могут служить объяснением проблемы прилипания первого слоя к оснастке. Успешная укладка первого слоя на форму является наиболее сложной задачей при выкладке на оснастку как из нержавеющей стали, так и из композиционных материалов с антиадгезивом или без него. Препрег, проходящий через выкладочную головку при автоматизированной выкладке, контактирует с различными поверхностями, к которым может прилипнуть, такими как уплотняющий валик, направляющие элементы, бумажная подложка, и в конечном итоге взаимодействует с оснасткой или ранее уложенными слоями.

Зависимость величины липкости от метода определения

На рис. 10 показано, что величина липкости, определенная с помощью метода зондирования, значительно меньше значения, полученного методом расслаивания.

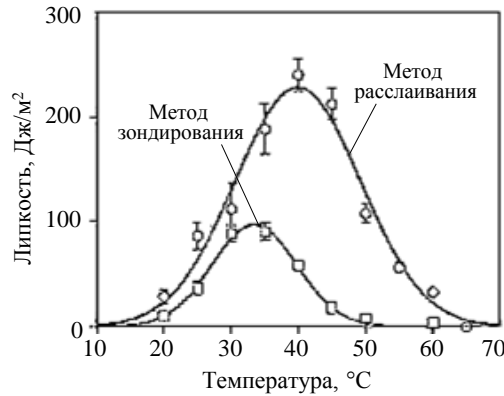


Рис. 10. Зависимость величины липкости от метода измерения [23]

Величина липкости, определенная методом расслаивания больше, так как сила сцепления пары «препрег–препрег» в ~2,5 раза больше, чем пары «препрег–оснастка». Как отмечено ранее, если оснастка покрыта антиадгезионным слоем, то сила сцепления препрега с такой поверхностью еще меньше. Поэтому при выкладке должны быть правильно подобраны усилие прикатки и температура для обеспечения фиксации первого слоя препрега на оснастке.

Результаты исследований липкости

В работах [20, 21] описаны методы определения липкости с помощью установки, специально спроектированной для исследования липкости препрегов на основе стеклоткани и углеродной ленты. Принцип действия такой установки состоит в том, что измеряется сила отрыва круглых образцов препрега от подложки (полиэтиленовой пленки или бумаги). Структурная схема установки представлена на рис. 11.

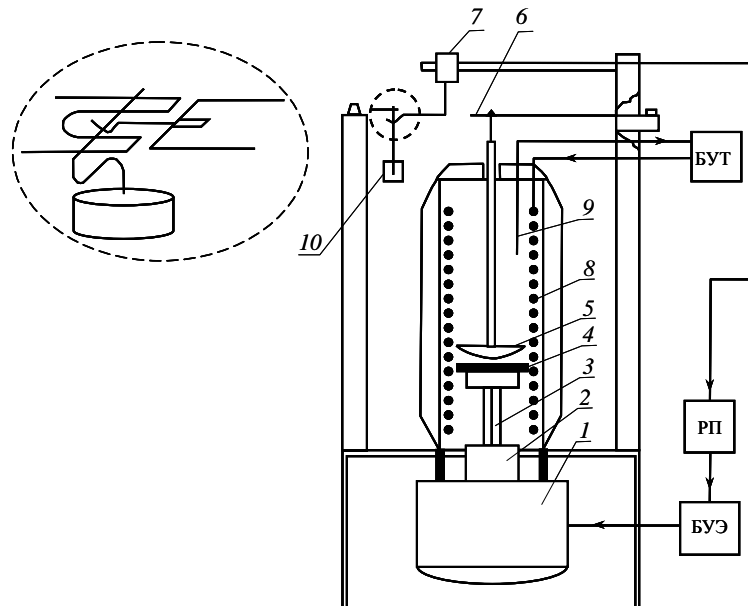


Рис. 11. Структурная схема установки ИЛП: 1 – электродвигатель; 2 – редуктор; 3 – стержень; 4 – столик с образцом; 5 – контактная поверхность; 6 – упругая стальная пластина; 7 – индукционный измеритель линейных перемещений; 8 – нагревательный элемент; 9 – терморезистор; 10 – дополнительные грузы; БУЭ – блок управления электродвигателем; РП – регистрирующий прибор; БУТ – блок управления термостатом

В работе [20] приведены результаты измерения липкости препрегов на основе связующего ЭДТ-69Н и различных наполнителей в зависимости от температуры (рис. 12 и 13). Анализируя приведенные зависимости, следует отметить, что с увеличением температуры липкость препрегов на основе связующего ЭДТ-69Н уменьшается. Авторы данной работы объясняют это многокомпонентностью структуры связующего ЭДТ-69Н. При этом характер изменения липкости при использовании различных наполнителей идентичен. В то же время показано, что из-за различия реологических свойств для каждого вида связующего характерна определенная форма кривой (рис. 14).

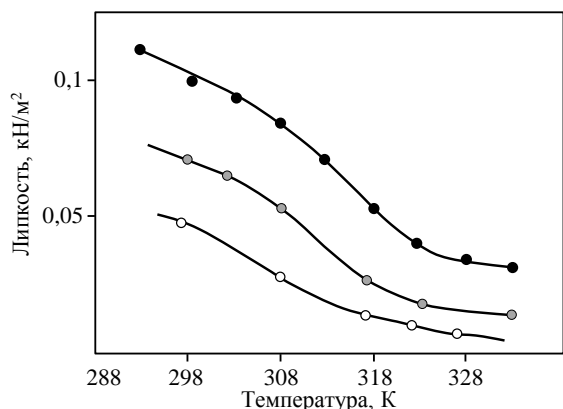


Рис. 12. Температурная зависимость липкости препрега на основе связующего ЭДТ-69Н: ● – углепластик ЛУП 0,1; ● – СВМ; ○ – стеклоткань А2

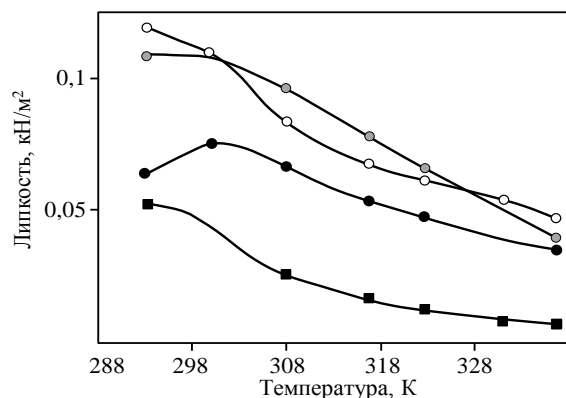


Рис. 13. Температурная зависимость липкости препрега из стеклоткани А2 на основе связующего ЭДТ-69Н: ○ – расплав связующего; ■ – раствор связующего; ● – после облучения ультрафиолетом; ● – после обработки парами ацетона

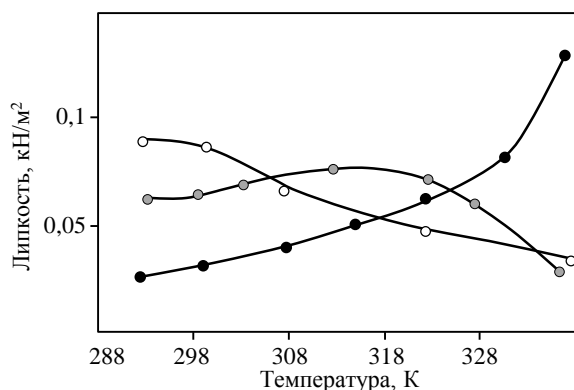


Рис. 14. Температурная зависимость липкости препрега из стеклоткани А2 на различной матричной основе: ● – ФПР-520; ○ – ВСО-200; ● – 5-211Б

В работе [21] исследовано влияние продолжительности хранения на изменение липкости препрега из стеклоткани Т-10-80 и связующего ФПР-520 (рис. 15). На основании полученных результатов выявлено, что в процессе хранения липкость препрега повышается по сравнению с исходным препрегом. Причем в начальный период хранения (через 4 дня) липкость препрега больше, чем через 60 дней. В то же время характер изменения зависимости липкости от температуры испытаний при различных сроках хранения практически одинаков. Все кривые изменения липкости имеют экстремальный характер, максимум липкости с течением времени смещается в

сторону более высоких температур. В других работах [22–26] также рассматривается зависимость липкости препрегов от различных факторов, таких как продолжительность приложения усилия индентора и температура окружающей среды при испытании.

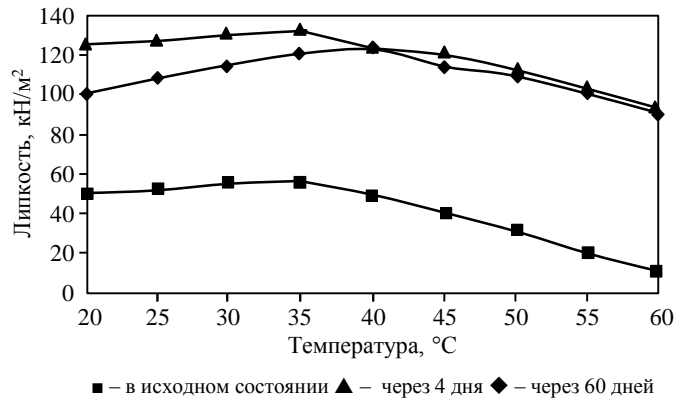


Рис. 15. Изменение липкости препрегов в процессе хранения [21]

В работе [27] описан способ определения липкости препрегов марок КМКУ-2м.120.Э0,1.45, ВКУ-25/SYT49S и ВКУ-39/ВТкУ-2-200 методом зондирования. Показано, что наибольшей липкостью (24,3 кПа) обладает препрег марки КМКУ-2м.120.Э0,1.45, наименьшей (4,1 кПа) – марки ВКУ-25/SYT49S. Кроме того, представлены результаты исследования липкости препрега КМКУ-2м.120.Э0,1.45 к полиэтиленовой пленке и антиадгезионной бумаге. Значения рассматриваемого показателя составили 18,1 и 15,8 кПа соответственно. Сделан вывод о том, что липкость может существенно влиять на технологичность при выкладке. При этом величина липкости зависит от множества факторов, таких как содержание связующего в препреге, температура и влажность воздуха в помещении при выкладке, тип и степень отверждения полимерной матрицы и др.

Заключения

Липкость препрегов – это способность слоев препрега образовывать связь с материалами (свойство прикрепляться с определенной прочностью), с которыми они контактируют в процессе изготовления заготовки детали. Липкость является функцией адгезии и когезии препрега к оснастке, разделительным пленкам, антиадгезионной бумаге или слоям препрега.

Основное значение для формирования величины липкости препрегов при температурах, близких к комнатной (20–23 °С), имеет адгезия, так как величина адгезии значительно меньше, чем когезии. При температурах более 35–40 °С (для препрегов на эпоксидном связующем) когезионная прочность становится меньше адгезионной, величина липкости уменьшается с увеличением температуры, так как разрушение связи происходит по связующему.

Величина липкости зависит от материала, с которым взаимодействует препрег. Наибольшее значение липкости характерно для препрега, наименьшее – для антиадгезионного покрытия. Уровень липкости также зависит от площади образующегося контакта и может существенно меняться при варьировании температуры, давления и продолжительности уплотнения, а также скорости испытания.

Для успешного проведения процессов выкладки или намотки препрегов необходимо обеспечить требуемую прочность сцепления с подложкой и легкое

отделение от нее, отсутствие перехода связующего на разделительные пленки, ролики выкладочных и намоточных машин, складок или «мостиков» при выкладке из-за излишней или недостаточной липкости, а также правильным выбором технологических параметров.

Понимание зависимости влияния технологических параметров и используемых вспомогательных материалов на липкость весьма важны на этапе изготовления как самого препрега, так и изделия из него.

Данная статья является заделом для проведения исследований липкости препрегов в процессах выкладки.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
2. Славин А.В., Донецкий К.И., Хрульков А.В. Перспективы применения полимерных композиционных материалов в авиационных конструкциях в 2025–2035 гг. (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 11 (117). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.
3. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
4. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // Инновации. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
5. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение терморезактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
6. Большаков В.А., Антюфеева Н.В. Оценка модели процесса отверждения клевого связующего в препреге // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
7. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
8. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Терморезактивные связующие для полимерных композиционных материалов: учеб. пособие / под ред. Е.Н. Каблова. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. С. 363.
9. Ткачук А.И., Любимова А.С., Кузнецова П.А. Перспективы развития эпоксидных смол на растительной основе (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 8 (114). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-49-64.
10. Коган Д.И., Чурсова Л.В., Панина Н.Н. и др. Перспективные полимерные материалы для конструкционных композиционных изделий с энергоэффективным режимом формования // Пластические массы. 2020. № 3–4. С. 52–54.
11. Вешкин Е.А. Технологии безавтоклавного формования низкопористых полимерных композиционных материалов и крупногабаритных конструкций из них: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 146 с.

12. Ерасов В.С., Сibaев И.Г. Схема разработки и оценки свойств конструкционных авиационных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
13. Постнов В.И., Вешкин Е.А., Макрушин К.В., Судьин Ю.И. Технологические особенности изготовления из полимерных композиционных материалов лопастей несущего винта для легкого вертолета // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
14. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
15. Budelmann D., Schmidt C., Meiners D. Adhesion-cohesion balance of prepreg tack in thermoset automated fiber placement. Part 1: Adhesion and surface wetting // *Composites Part C*. 2023. No. 12. Art. 100396.
16. Budelmann D., Schmidt C., Meiners D. Prepreg tack: A review of mechanisms, measurement, and manufacturing implication // *Polymer Composites*. 2020. No. 41. P. 3440–3458. DOI: 10.1002/pc.25642.
17. Budelmann D. Tack of epoxy resin films for aerospace-grade prepreps: Influence of resin formulation, B-staging and toughening // *Polymer Testing*. 2022. No. 114. Art. 107709.
18. Герасимов С.Б. Разработка полимерных композиционных материалов для изготовления крупногабаритных сложнопрофильных изделий методом автоматизированной выкладки: дис. ... канд. техн. наук. М., 2000. С. 24.
19. Budelmann D., Schmidt C., Steuernagel L., Meiners D. Adhesion-cohesion balance of prepreg tack in thermoset automated fiber placement. Part 2: Ply-ply cohesion through contact formation and autohesion // *Composites Part C*. 2023. No. 12. Art. 100396.
20. 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
21. Стрельников С.В., Петухов В.И., Постнов В.И., Швец Н.И. Новые решения в технологии изготовления препрегов для панелей интерьера // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2011. Т. 13. № 4 (2). С. 498–507.
22. Measuring techniques for prepreg tackiness: A COMPARATIVE STUDY SAMPE Europe Conference 2023 Madrid – Spain. URL: https://www.researchgate.net/publication/374949895_Measuring_techniques_for_prepreg_tackiness_A_comparative_study (дата обращения: 17.09.2024).
23. Crossley R.J., Schubel P.J., Warrior N.A. The experimental determination of prepreg tack and dynamic stiffness // *Composite Part A: Applied Science Manufacture*. 2012. No. 43. P. 423–434.
24. Heinecke F., Willberg C. Manufacturing-induced imperfections in composite parts manufactured via automated fiber placement // *Experimental Mechanics*. 2010. No. 50. P. 599–606.
25. Experimental analysis of prepreg tack. URL: <https://inria.hal.science/hal-01131583/> (дата обращения: 12.09.2024).
26. Tackiness characterization of thermoset prepreg materials. URL: https://spectrum.library.concordia.ca/id/eprint/987702/1/Dodongeh_MASc_S2021.pdf (дата обращения: 17.09.2024).
27. Мишкин С.И., Клименко О.Н., Куцевич К.Е. Определение липкости препрегов на основе углеродных наполнителей методом зондирования // *Труды ВИАМ*. 2022. № 3 (109). Ст. 04. URL: <http://www.viam-woks.ru> (дата обращения: 05.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-35-43.

References

1. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
2. Slavin A.V., Donetskii K.I., Khrulkov A.V. Prospects for the use of polymer composite materials in aircraft structures in 2025–2035 (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 05, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.

3. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports of the XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
4. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technological development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. *Innovatsii*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
5. Tkachuk A.I., Donetsky K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 03. Available at: <https://www.journal.viam.ru> (accessed: August 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
6. Bolshakov V.A., Antyufeeva N.V. Evaluation of the curing process model of the adhesive binder in prepreg. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
7. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
8. Mukhametov R.R., Petrova A.P. *Thermosetting binders for polymer composite materials*: textbook. Ed. E.N. Kablov. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2021, p. 363.
9. Tkachuk A.I., Lyubimova A.S., Kuznetcova P.A. Opportunities of the development of plant-based epoxy resins (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 8 (114), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 08, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-49-64.
10. Kogan D.I., Chursova L.V., Panina N.N. et al. Promising polymeric materials for structural composite products with energy-efficient molding mode. *Plasticheskie massy*, 2020, no. 3–4, pp. 52–54.
11. Veshkin E.A. *Technologies for non-autoclave molding of low-porosity polymer composite materials and large-sized structures made of them*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2016, 146 p.
12. Erasov V.S., Sibayev I.G. Scheme for the development and evaluation of properties of structural aviation composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 04, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
13. Postnov V.I., Veshkin E.A., Makrushin K.V., Sudin Yu.I. Technological features of manufacturing polymer composite materials of main rotor blades for a light helicopter. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 04, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
14. Raskutin A.E. Russian polymer composite materials of new generation, their exploitation and implementation in advanced developed constructions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
15. Budelmann D., Schmidt C., Meiners D. Adhesion-cohesion balance of prepreg tack in thermoset automated fiber placement. Part 1: Adhesion and surface wetting. *Composites Part C*, 2023, no. 12, art. 100396.
16. Budelmann D., Schmidt C., Meiners D. Prepreg tack: A review of mechanisms, measurement, and manufacturing implication. *Polymer Composites*, 2020, no. 41, pp. 3440–3458. DOI: 10.1002/pc.25642.
17. Budelmann D. Tack of epoxy resin films for aerospace-grade prepreps: Influence of resin formulation, B-staging and toughening. *Polymer Testing*, 2022, no. 114, art. 107709.
18. Gerasimov S.B. *Development of polymer composite materials for the manufacture of large-sized complex-profile products using the automated laying method*: thesis, Cand. Sc. (Techn.). Moscow, 2000, p. 24.
19. Budelmann D., Schmidt C., Steuernagel L., Meiners D. Adhesion-cohesion balance of prepreg tack in thermoset automated fiber placement. Part 2: Ply-ply cohesion through contact formation and autohesion. *Composites Part C*, 2023, no. 12, art. 100396.

20. Postnov V.I., Nikitin K.E., Petukhov V.I., Burkhan O.L., Orzaev V.G. Method and device for determining the tack of prepregs. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2009, no. 3, pp. 29–33.
21. Strelnikov S.V., Petukhov V.I., Postnov V.I., Shvets N.I. New solutions in the technology of manufacturing prepregs for interior panels. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2011, vol. 13, no. 4 (2), pp. 498–507.
22. Measuring techniques for prepreg tackiness: A COMPARATIVE STUDY SAMPE Europe Conference 2023 Madrid – Spain. Available at: https://www.researchgate.net/publication/374949895_Measuring_techniques_for_prepreg_tackiness_A_comparative_study (available at: September 17, 2024).
23. Crossley R.J., Schubel P.J., Warrior N.A. The experimental determination of prepreg tack and dynamic stiffness. *Composite Part A: Applied Science Manufacture*, 2012, no. 43, pp. 423–434.
24. Heinecke F., Willberg C. Manufacturing-induced imperfections in composite parts manufactured via automated fiber placement. *Experimental Mechanics*, 2010, no. 50, pp. 599–606.
25. *Experimental analysis of prepreg tack*. Available at: <https://inria.hal.science/hal-01131583/> (available at: September 17, 2024).
26. *Tackiness characterization of thermoset prepreg materials*. Available at: https://spectrum.library.concordia.ca/id/eprint/987702/1/Dodongeh_MASc_S2021.pdf (available at: September 17, 2024).
27. Mishkin S.I., Klimenko O.N., Kutcevich K.E. Determination of stickiness of prepregs on the basis of carbon fillers the sounding method. *Trudy VIAM*, 2018, no. 3 (109), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 05, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-35-43.

Информация об авторах

Хрульков Александр Владимирович, ведущий инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Донецкий Кирилл Игоревич, заместитель начальника лаборатории по науке, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Мельников Денис Александрович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Клименко Оксана Николаевна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Славин Андрей Вячеславович, начальник Научно-исследовательского отделения, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Alexander V. Khrulkov, Leading Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Kirill I. Donetsky, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Denis A. Melnikov, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Oksana N. Klimenko, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey V. Slavin, Head of Scientific-Research Bureau, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 01.10.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 29.10.2024.
The article was submitted 01.10.2024; approved and accepted for publication after reviewing 29.10.2024.