
Научная статья

УДК 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-39-47

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АНТИАДГЕЗИОННОГО СОСТАВА НА СВОБОДНУЮ ПОВЕРХНОСТНУЮ ЭНЕРГИЮ УГЛЕПЛАСТИКОВ

Р.С. Савицкий¹, Ю.И. Судьин¹

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

Аннотация. В настоящее время доля полимерных композиционных материалов (ПКМ) в авиационной промышленности растет год от года, в связи с этим возрастает интерес к композитным формообразующим оснасткам. Данный интерес может быть объяснен тем, что вследствие сродства материалов формуемая деталь и оснастка имеют схожие коэффициенты линейного теплового расширения, посредством чего устраняются проблемы коробления и возникновения остаточных напряжений. Рассмотрены некоторые факторы влияния на эксплуатационные свойства оснасток для изготовления ПКМ, предложена методика контроля технологических свойств оснасток, продемонстрировано влияние антиадгезионных жидкостей на свободную поверхностную энергию ПКМ.

Ключевые слова: краевой угол смачивания, формование ПКМ, свободная поверхностная энергия (СПЭ), метод ОВРК, антиадгезионная жидкость

Для цитирования: Савицкий Р.С., Судьин Ю.И. Оценка влияния антиадгезионного состава на свободную поверхностную энергию углепластиков // Труды ВИАМ. 2023. № 3 (121). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-39-47.

Scientific article

EVALUATION OF THE EFFECT OF ANTIADHESION COMPOSITION ON THE FREE SURFACE ENERGY OF CARBON FIBER-REINFORCED PLASTICS

R.S. Savitskiy¹, Yu.I. Sudin¹

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

Abstract. At present, the share of polymer composite materials (PCM) in the aviation industry is increasing year by year, which is why there is a growing interest in composite molding tooling. This interest can be explained by the fact that due to affinity of materials, a formed part and rigging have similar coefficients of thermal expansion, by means of which problems of warping and occurrence of residual stresses are eliminated. In article some factors of influence on service properties of tooling for PCM manufacturing are considered, the technique of control of tooling technological properties is offered, influence of antiadhesion liquids on free surface energy of PCM is shown.

Keywords: boundary wetting angle, PCM molding, free surface energy (FSE), OWRK method, anti-adhesion fluid

For citation: Savitskiy R.S., Sudin Yu.I. Evaluation of the effect of antiadhesion composition on the free surface energy of carbon fiber-reinforced plastics. *Trudy VIAM*, 2023, no. 3 (121), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-39-47.

Введение

Изделия из полимерных композиционных материалов (ПКМ) используются повсеместно, но наибольшая доля их применения приходится на авиационно-космическую отрасль в связи с присущими им выдающимися свойствами: низкой плотностью, высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью и т. д. Использование ПКМ позволяет увеличить экономическую эффективность при эксплуатации летательных аппаратов [1–4].

Существует множество способов изготовления деталей из ПКМ, таких как контактное и инфузионное формование, намотка и прессование, а также формование из препрегов [5–7]. Однако при любом из них применяется формообразующее приспособление (технологическая оснастка, пресс-форма и т. д.). В настоящее время для изготовления изделий из ПКМ используются оснастки, выполненные из различных металлических сплавов или из композиционных материалов [8–10]. Оснастки из алюминиевых сплавов достаточно хорошо подвергаются механической обработке, однако они обладают высоким коэффициентом линейного теплового расширения (КЛТР), что накладывает существенные ограничения на применение данного материала, особенно при использовании высококачественных композиционных материалов авиационного назначения. В процессе формования изделия из ПКМ технологический пакет нагревают до температур 180–240 °С, при этом за счет высокого КЛТР материала оснастки происходит изменение ее геометрической формы, что в свою очередь приводит к изменению геометрической формы формуемого изделия из ПКМ по отношению к изначально заданной форме; проявлению такого эффекта, как коробление изделия (изменение геометрической формы изделия после снятия его с технологической оснастки); созданию остаточных напряжений, отрицательно влияющих на механические характеристики ПКМ. С учетом жестких требований к допускам и деформациям изделий авиационной техники наиболее приемлемым материалом для оснастки являются сами ПКМ, поскольку имеют свойства, близкие к свойствам формуемой детали, а также обладают меньшей плотностью и стоимостью по сравнению с оснастками из металла. Кроме того, к оснастке предъявляется ряд эксплуатационных требований, от которых зависит срок ее применения, в частности высокая твердость поверхности и герметичность для формования качественных деталей на ней [11]. Однако остается проблема обеспечения защиты от прилипания детали к оснастке в процессе формования ПКМ. Осуществляется это преимущественно путем применения разделительных (антиадгезионных) составов [12, 13] в виде суспензий, спреев, паст и порошков с различной природой основного компонента. Разделители наносят на поверхность форм намазыванием или распылением. Данные составы должны обеспечивать приемлемый уровень смачиваемости поверхности оснастки для того, чтобы, например, при выкладке полуфабриката ПКМ (препрега) он имел достаточную способность прилипнуть к поверхности, но недостаточную для того, чтобы связующее, содержащееся в нем, в процессе формования образовало адгезионное соединение с субстратом. Помимо того, разделительный состав должен обеспечивать бездефектный и легкий съем детали с оснастки, а также минимизировать или исключать переход антиадгезионного покрытия на формуемое изделие. Однако формирование адгезионного соединения зависит также и от самого субстрата, т. е. от оснастки. Как известно, поверхность реальных твердых тел не бывает идеально гладкой, в связи с чем имеет смысл предварительно обрабатывать поверхность оснастки специальными порозаполняющими составами (либо грунтами), обеспечивающими усреднение шероховатости и высокое качество сцепления разделительного слоя с поверхностью оснастки. Необходимым (хотя и не всегда достаточным) условием высокой адгезии является хорошее смачивание, т. е. образование хорошо сформированной – без дефектов и пор – поверхности контакта между субстратом и адгезивом. Как следствие, существует масса переменных, способных влиять на качество изделия из ПКМ, а также

на состояние формообразующего приспособления, которые необходимо учитывать при серийном изготовлении деталей из ПКМ. Одним из таких способов является определение краевого угла смачивания (КУС).

Краевой угол смачивания представляет собой основной параметр, благодаря которому можно говорить о смачиваемости или несмачиваемости поверхности используемой жидкостью, его величина определяет межмолекулярное взаимодействие частиц твердого тела с частицами жидкости. Величина КУС определяется соотношением сил межмолекулярного взаимодействия внутри жидкой фазы и между молекулами жидкости и твердого тела на поверхности раздела. Силы когезии способствуют тому, чтобы капля воды оставалась сферой после контакта с поверхностью. Силы адгезии способствуют увеличению площади контакта «твердое тело–жидкость». Установление краевого угла – процесс кинетический, в течение которого угол смачивания меняется, достигая своего равновесного значения. Однако на практике значение равновесного угла достигается не всегда, и тогда используется краевой угол, измеренный при данном времени контакта. Значение КУС на практике может использоваться как один из показателей оценки эффективности разделительного состава.

Помимо упомянутого ранее КУС, имеет место и свободная поверхностная энергия (СПЭ) [14–17] – термодинамическая характеристика, определяющая способность материала к смачиванию, дающая оценку его гидрофобным либо гидрофильным свойствам; чем выше поверхностная энергия субстрата, тем лучше он смачивается адгезивом. Эта величина зависит от особенностей формирования поверхности, ее предистории и отражает избыток энергии в поверхностном слое субстрата, отнесенный к единице поверхности.

Материалы и методы

Основным методом, посредством которого определяется КУС определенной жидкости на субстрате, является метод лежащей капли, который и был применен в данной работе. Измерение КУС проводили с использованием автоматизированного оптического анализатора ОСА-15ЕС на исходных и обработанных антиадгезионным составом образцах углепластика на основе углеродного жгутового наполнителя и расплавленного эпоксидного связующего с габаритными размерами $(80\pm 3)\times(80\pm 3)\times(4,0\pm 0,1)$ мм. Расчет СПЭ производили в среде программного продукта DataPhysicsSCA 20,21 по методу ОВРК (Оуэнса–Вендта–Рабея–Каельбле). В данной работе использовали тестовые жидкости: 1 – дистиллированную воду (ГОСТ Р 58144–2018); 2 – глицерин (ч.д.а.) (ГОСТ 6259–75). В качестве разделительной системы применяли грунт Frekote FMS и антиадгезионную смазку Frekote 770-NC; каждый из компонентов наносили на форму в строгом соответствии с рекомендациями изготовителя. Микрофотографии (рис. 1) поверхности обработанных образцов углепластика на основе углеродного жгутового наполнителя и расплавленного эпоксидного связующего получены с помощью инвертируемого микроскопа Olympus GX-41.

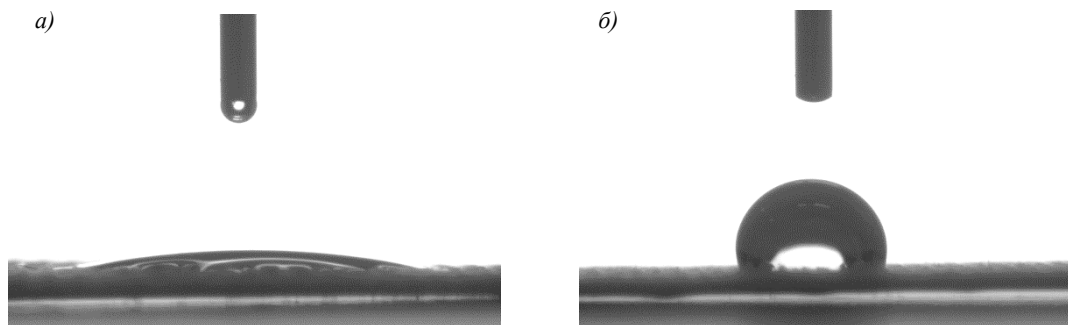


Рис. 1. Капля воды на гидрофильной (а) и гидрофобной (б) поверхностях

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Метод ОВРК основывается на представлении о том, что СПЭ является суммой полярной и дисперсионной составляющих. Под дисперсионной компонентой понимается энергия, отнесенная к лондоновскому взаимодействию, а под полярной составляющей – все остальные взаимодействия, включая кислотно-основное (донорно-акцепторное), водородное, дебаевское и кеззомовское. Свободная поверхностная энергия является скалярной физической величиной и выражает работу, необходимую для образования новой поверхности, в свою очередь поверхностное натяжение – величина векторная, однако в отношении жидкости понятия поверхностного натяжения и поверхностной энергии в количественном смысле равноценны [18]. В табл. 1 продемонстрированы значения поверхностного натяжения (σ_L) для используемых тестовых жидкостей при температуре 20 °С и его составляющих – полярной (σ_L^p) и дисперсионной (σ_L^d) частей, значения которых взяты из базы данных программного обеспечения.

Таблица 1

Значения поверхностного натяжения тестовых жидкостей и его составляющих при 20 °С для метода Оуэнса–Вендта–Рабеля–Каельбле

Тестовая жидкость	σ_L	σ_L^p	σ_L^d	Примечание
	мН/м			
1	72,8	46,8	26	По Gebhardt
2	64	30	34	По Van Oss et al.

Исходя из рекомендаций изготовителя антиадгезионных составов, производилась обработка поверхности образца углепластика на основе углеродного жгутового наполнителя и расплавленного эпоксидного связующего сначала грунтовкой марки Frekote FMS с последовательным нанесением трех ее слоев с учетом временных промежутков (порядка 15–20 мин), необходимых для сушки состава. Впоследствии на высушенный грунт наносили антиадгезив марки Frekote 770-NC в количестве трех слоев с высушиванием между нанесениями в течение от 5 до 10 мин до полного испарения растворителя.

В соответствии с рекомендациями производителя разделительные составы наносят различными способами. Так, разделительную смазку Frekote 770-NC рекомендуется наносить с помощью хлопчатобумажной ткани, смоченной и отжатой, не оставляя разводов, в три взаимно перпендикулярных слоя. Некоторые производители разделительных систем рекомендуют наносить покрытие с применением пульверизатора, малярных кистей, а также безворсовой тканью как при комнатной температуре оснастки, так и на разогретую поверхность. Все предложенные способы эффективны, но при детальном рассмотрении становится видна разница в качестве вновь образованного поверхностного антиадгезионного слоя, что почти не заметно при первом съеме, однако может оказывать значительное влияние при последующем многократном использовании оснастки (рис. 2).

Значения КУС для исходного образца углепластика на основе углеродного жгутового наполнителя и расплавленного эпоксидного связующего и для образца углепластика, обработанного антиадгезивным составом, представлены в табл. 2.

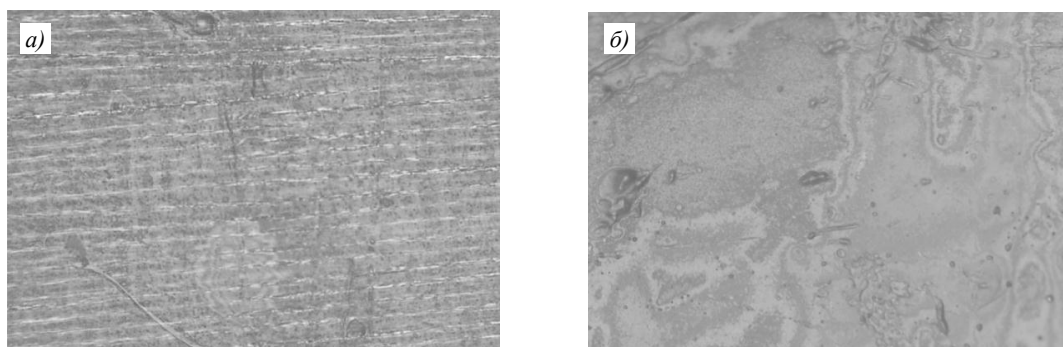


Рис. 2. Микрофотографии ($\times 50$) поверхности образца углепластика, обработанного антиадгезивом Frekote 770-NC кистью (а) и хлопчатобумажной тканью (б)

Таблица 2

Результаты измерения краевого угла смачивания (КУС) тестовых жидкостей на поверхности образцов углепластика (исходного и обработанного антиадгезионным составом)

Тестовая жидкость	Значения КУС*, градус, на поверхности	
	исходной	обработанной
1	$\frac{73,5-87,9}{80,9}$	$\frac{105,4-110,5}{108,19}$
2	$\frac{68,5-75,71}{71,9}$	$\frac{98,4-102,5}{101,07}$

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

При рассмотрении полученных результатов очевидно, что смачиваемость поверхности после нанесения антиадгезива ухудшается, переходя из состояния частичного смачивания в случае исходной поверхности (КУС составляет <90 градусов) к состоянию несмачивания для обработанной поверхности (КУС составляет ≥ 90 градусов). При этом устанавливается термодинамическая невыгодность самопроизвольного растекания как первой, так и второй тестовых жидкостей. Усредненные значения КУС для тестовых жидкостей 1 и 2 применены для вычисления СПЭ методом ОВРК (табл. 3).

Таблица 3

Результаты расчета свободной поверхностной энергии углепластика в исходном состоянии и после обработки поверхности антиадгезивом (коэффициент корреляции 1)

Поверхность	σ_s	σ_s^p	σ_s^d
	мН/м		
В исходном состоянии	29,1	7,1	22,0
После обработки антиадгезивом	12,4	1,40	11,0

При сравнении значений СПЭ для исходного и обработанного образцов видно, что СПЭ обработанного образца уменьшилась в $\sim 2,35$ раза. По этой разнице можно оценивать эффективность разделительного состава для конкретного материала, однако следует учитывать, что ресурс покрытия, очевидно, не бесконечен, и следует принимать во внимание не только эффект антиадгезива на СПЭ, но и максимально возможное количество технологических операций съема детали с оснастки после нанесения покрытия. Для дальнейшего практического применения полученных данных необходимо оценивать ресурс антиадгезионного покрытия и отслеживать его по нарастанию СПЭ до значений, соответствующих исходному материалу, попутно обращая внимание на показатели шероховатости

поверхности и ее внешний вид в целях контроля качества формуемого изделия. Наглядно процесс контроля поверхности формообразующей оснастки можно изобразить на накопительной гистограмме (рис. 3), в которую включаются значения полярной и дисперсионной составляющих СПЭ после определенного количества съемов формуемой детали, что фиксируется по направлению оси Ox , где за 0 принимается значение СПЭ и ее составляющих для исходного материала, а цифрой I отмечается СПЭ образца непосредственно после обработки антиадгезивом. Далее СПЭ обозначается как 1, 2, ..., n после соответствующего съема.

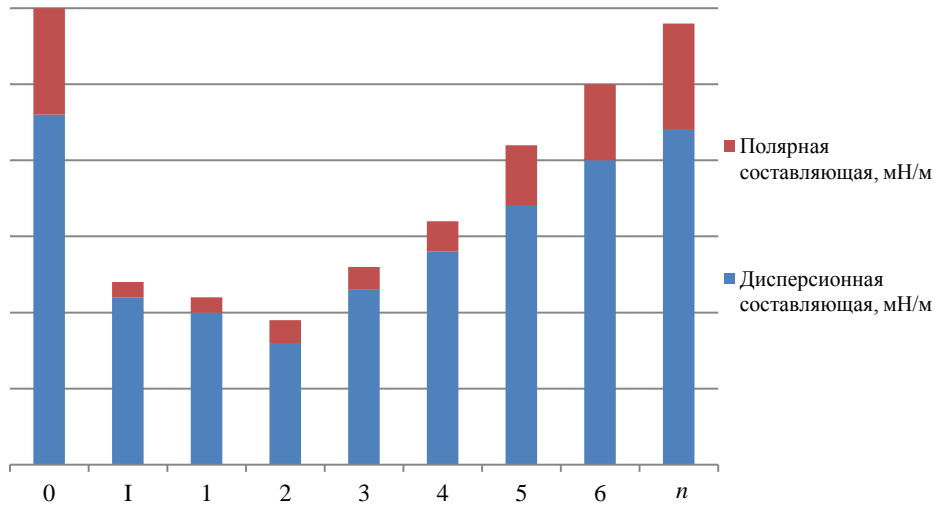


Рис. 3. Свободная поверхностная энергия (мН/м) для некоторого образца после n -го количества съемов, представленная в виде накопительной гистограммы в целях оценки качества антиадгезионного покрытия

При достижении значений СПЭ уровня исходного образца ресурс антиадгезионного слоя можно считать исчерпанным, после чего необходимо полностью удалить его с поверхности оснастки и нанести покрытие заново, либо же с помощью корректирующего слоя нивелировать износ антиадгезива. Частота нанесения корректирующего покрытия зависит от типа полимеров, образующихся в результате формования ПКМ, конфигурации самой формы и степени ее износа. Как отмечено ранее, параллельно контролю СПЭ необходимо контролировать шероховатость формообразующей оснастки и ее внешний вид, для того чтобы избежать нежелательных дефектов на поверхности формуемого изделия. Ввиду того, что метод лежащей капли может не в полной мере отразить влияние на внешний вид получаемого изделия, так как затрагивает небольшую область образца при измерении, необходим комплексный подход к оценке поверхностного слоя антиадгезива на ПКМ. Использовать данный метод для исследования эффективности разделительного покрытия целесообразно до полномасштабных работ на ответственных оснастках с применением небольших образцов из аналогичного оснасткам материала. После соответствующих исследований можно делать выводы о ресурсе покрытия на данном ПКМ, его внешнем виде и антиадгезионных свойствах, а также планировать обновление покрытия.

Заключения

Анализ полученных результатов при проведении исследования по влиянию антиадгезионного состава на СПЭ углепластика демонстрирует значительное уменьшение этого показателя после нанесения покрытия на ПКМ. Следует отметить, что полярная

составляющая СПЭ также существенно сокращается в сравнении с исходным образцом углепластика, что может свидетельствовать об уменьшении влияния на СПЭ сильных взаимодействий и водородных связей. Данную составляющую особенно важно учитывать, так как именно она отражает активность поверхности при адгезионном контакте, поэтому по уменьшению ее значения можно судить об эффективности разделительного покрытия для конкретного материала. Оценивать следует не только эффективность разделяющего слоя непосредственно после его нанесения на оснастку, но и в процессе выполнения операций съема деталей в целях своевременного обновления и корректировки покрытия, что также можно оценивать через СПЭ, а точнее – через ее возрастание по отношению к исходным данным после нанесения покрытия. Поэтому интересными можно назвать исследования, направленные на установление взаимосвязи между видом наносимого антиадгезионного покрытия, способом нанесения и влиянием покрытия на СПЭ как в целом, так и по составляющим, с учетом ее изменения в процессе проведения технологических операций съема детали с оснастки. Подобные работы позволили бы сделать вывод о наиболее эффективных, износостойких и экономически выгодных разделительных составах.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов // *Российские нанотехнологии*. 2013. Т. 8. № 3–4. С. 24–42.
3. Гуняев Г.М., Каблов Е.Н., Алексахин В.М. Модифицирование конструкционных углепластиков углеродными наночастицами // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. № 1. С. 5–11.
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. Постнова М.В., Постнов В.И. Опыт развития безавтоклавных методов формования ПКМ // *Труды ВИАМ*. 2014. № 4. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.04.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-4-6-6.
6. Вешкин Е.А. Особенности безавтоклавного формования низкопористых ПКМ // *Труды ВИАМ*. 2016. № 2 (38). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.04.2022). DOI: 10.1857/2307-6046-2016-0-2-7-7.
7. Колпачков Е.Д., Петрова А.П., Курносоев А.О., Соколов И.И. Методы формования изделий авиационного назначения из ПКМ (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 11 (83). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.04.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-22-36.
8. Лопатин А.Н., Зверков И.Д. Изготовление формообразующей оснастки аддитивными методами для композитных деталей // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (55). С. 53–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-53-59.
9. Малюгин А.С., Смирнов М.М. Разработка крупногабаритной неметаллической оснастки для формования деталей на основе полиуретанов и гибридных пластиков // *Труды МАИ*. 2010. № 38. С. 22–24.
10. Ткачук А.И., Терехов И.В., Гуревич Я.М., Кудрявцева А.Н. Применение бисмалеимидного связующего марки ВСТ-57 для получения теплостойких размеростабильных оснасток из полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 32–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-32-40.
11. Оснастка для формования изделий из полимерных композиционных материалов и способ ее изготовления: пат. 2630798 Рос. Федерация. № 2016134245; заявл. 22.08.16; опубл. 13.09.17.

12. Руппель В. Новейшие разработки в сфере антиадгезионных составов и покрытий для мастер-моделей и оснастки в производстве композитных изделий // Композитный мир. 2016. № 5 (68). С. 32–35.
13. Постнов В.И., Петухов В.И., Макрушин К.В., Юдин А.А. Исследование антиадгезионных покрытий при формовании панелей интерьера с гелькоутным слоем // Авиационные материалы и технологии. 2009. № 3 (12). С. 23–25.
14. Баранников А.А., Сатдинов Р.А., Вешкин Е.А., Куршев Е.В. Влияние плазмы атмосферного давления на прочность клеевого соединения на основе углепластика // Труды ВИАМ. 2021. № 12 (106). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.04.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-47-54.
15. Баранников А.А., Постнов В.И., Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А. Применение плазмы атмосферного давления как способ подготовки поверхности полимерных композиционных материалов под склеивание // Сб. докл. V Всерос. науч.-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения». М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. С. 177–195.
16. Бабаян А.Л. Поверхностная энергия полимеров (эластомерных композиций): сравнительный анализ значений поверхностной энергии с параметрами дефектности полимеров // Научный журнал КубГАУ. 2017. № 131. С. 300–309.
17. Лангер М., Отто Д. Методы исследования поверхностных характеристик полимеров после плазменной обработки. Сравнительный анализ // Аналитика. 2018. № 2. С. 68–74. DOI: 10.22184/2227-572X.2018.39.2.68.74.
18. Миссол В. Поверхностная энергия раздела фаз в металлах. М.: Металлургия, 1978. 176 с.

References

1. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
2. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Yurkov G.Yu. Prospects for the use of carbon-containing nanoparticles in binders for polymer composite materials. *Rossiyskiye nanotekhnologii*, 2013, vol. 8, no. 3–4, pp. 24–42.
3. Gunyaev G.M., Kablov E.N., Aleksashin V.M. Modification of structural carbon fiber plastics with carbon nanoparticles. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2010, vol. LIV, no. 1, pp. 5–11.
4. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
5. Postnova M.V., Postnov V.I. Development experience out-of-autoclave methods of formation PCM *Trudy VIAM*, 2014, no. 4, paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 23, 2022). DOI 10.18577/2307-6046-2014-0-4-6-6.
6. Veshkin E.A. Features of out-of-autoclave forming of poor-porous PCM. *Trudy VIAM*, 2016, no. 2 (38), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 25, 2022). DOI: 10.1857/2307-6046-2016-0-2-7-7.
7. Kolpachkov E.D., Petrova A.P., Kurnosov A.O., Sokolov I.I. Methods of molding aviation products from PCM (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 11 (83), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 25, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-22-36.
8. Lopatin A.N., Zverkov I.D. Shaping molding tools production for composite parts by means of additive technologies. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55). pp. 53–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-53-59.
9. Malyugin A.S., Smirnov M.M. Development of large-sized non-metallic tooling for molding parts based on polyurethanes and hybrid plastics. *Trudy MAI*, 2010, no. 38, pp. 22–24.
10. Tkachuk A.I., Terekhov I.V., Gurevich Ya.M., Kudryavtseva A.N. Application of bismaleimide VST-57 binder for obtaining heat-resistant dimensionally stable molds from polymer composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 32–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-32-40.

11. *Equipment for molding products from polymer composite materials and method of its manufacture*: pat. 2630798 Rus. Federation, no. 2016134245; filed 22.08.16; publ. 13.09.17.
12. Ruppel V. Latest developments in the field of anti-adhesive compounds and coatings for master models and tooling in the production of composite products. *Kompozitnyy mir*, 2016, no. 5 (68), pp. 32–35.
13. Postnov V.I., Petukhov V.I., Makrushin K.V., Yudin A.A. Investigation of anti-adhesive coatings during the molding of interior panels with a gelcoat layer. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2009, no. 3 (12), pp. 23–25.
14. Barannikov A.A., Satdinov R.A., Veshkin E.A., Kurshev E.V. The effect of atmospheric pressure plasma on the strength of an adhesive bond based on CFPR. *Trudy VIAM*, 2021, no. 12 (106), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 25, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-47-54.
15. Barannikov A.A., Postnov V.I., Veshkin E.A., Satdinov R.A. The use of atmospheric pressure plasma as a method of preparing the surface of polymer composite materials for gluing. *Reports of V All-Rus. sci.-tech. conf. "Polymer composite materials and production technologies of a new generation"*. Moscow: NRC "Kurchatov Institute" – VIAM, 2021, pp. 177–195.
16. Babayan A.L. Surface energy of polymers (elastomer compositions): comparative analysis of surface energy values with polymer defectiveness parameters. *Nauchnyy zhurnal KubGAU*, 2017, no. 131, pp. 300–309.
17. Langer M., Otto D. Methods for studying the surface characteristics of polymers after plasma treatment. Comparative analysis. *Analitika*, 2018, no. 2, pp. 68–74. DOI: 10.22184/2227-572X.2018.39.2.68.74.
18. Missol V. *Surface energy of phase separation in metals*. Moscow: Metallurgiya, 1978. 176 p.

Информация об авторах

Савицкий Руслан Сергеевич, инженер-технолог 3 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Судьин Юрий Иванович, инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ruslan S. Savitskiy, Third Category Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Yury I. Sudin, Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 11.08.2022; получена после доработки 13.10.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.10.2022.
The article was submitted 11.08.2022; received in revised form 13.10.2022; approved and accepted for publication after reviewing 13.10.2022.