

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-85-93

## СРАВНЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ АНТИАДГЕЗИВОВ НА СВОБОДНУЮ ПОВЕРХНОСТНУЮ ЭНЕРГИЮ ПОЛИМЕРНЫХ ОСНАСТОК

Р.С. Савицкий<sup>1</sup>, Ю.И. Судьин<sup>1</sup>, Р.К. Салахова<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Оптимальность выбора антиадгезива под конкретную формообразующую поверхность при формировании изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) определяется многими факторами: отсутствием выкрашивания покрытия с поверхности оснастки и переноса разделителя на формуемую заготовку, легкостью съема и бездефектностью самого изделия из ПКМ. Предложен дополнительный фактор оценки оптимальности выбора антиадгезива для полимерных оснасток: определение свободной поверхностной энергии (СПЭ), которая дает характеристику смачиваемости поверхности оснастки. В рамках работы исследованы СПЭ пяти различных антиадгезионных составов.

**Ключевые слова:** свободная поверхностная энергия (СПЭ), антиадгезив, разделитель, краевой угол смачивания, метод ОВРК, полимерная оснастка

**Для цитирования:** Савицкий Р.С., Судьин Ю.И., Салахова Р.К. Сравнение влияния различных антиадгезивов на свободную поверхностную энергию полимерных оснасток // Труды ВИАМ. 2023. № 5 (123). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-85-93.

Scientific article

## COMPARISON OF THE EFFECT OF DIFFERENT RELEASE AGENTS ON THE FREE SURFACE ENERGY OF POLYMER TOOLING

R.S. Savitsky<sup>1</sup>, Yu.I. Sudin<sup>1</sup>, R.K. Salakhova<sup>1</sup>

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

**Abstract.** Optimality of choice of an antiadhesive for a specific molding surface when molding products from polymer composite materials (PCM) is determined by many factors: absence of scratching of coating from the surface of tooling and of transfer of release agent to molded blank, ease of removal and defectlessness of the product from PCM. Offers an additional factor for evaluating the optimality of selecting an antiadhesive for polymer tooling: determination of free surface energy (FSE), which gives a characteristic of tooling surface wettability. In the framework of this work the FSEs of five different antiadhesion compositions were investigated.

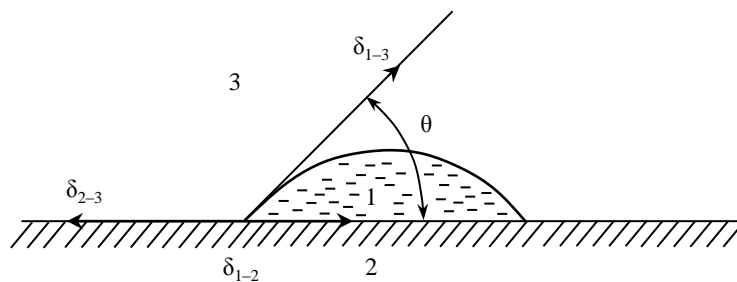
**Keywords:** free surface energy (SFE), antiadhesive, release agent, contact angle, OVRK method, polymer tooling

**For citation:** Savitsky R.S., Sudin Yu.I., Salakhova R.K. Comparison of the effect of different release agents on the free surface energy of polymer tooling. *Trudy VIAM*, 2023, no. 5 (123), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-85-93.

## Введение

Тенденция перехода от металлических вспомогательных приспособлений и оснасток к полимерным при производстве деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ) из-за постоянно увеличивающегося количества ПКМ в авиационной отрасли в целом [1–5] нарастает на протяжении уже более 30 лет. Для данной ситуации характерны обоснованные преимущества полимерных материалов, среди которых особенно значимы следующие: сродство формуемого материала и материала оснастки, что обеспечивает достаточно близкие значения коэффициента линейного теплового расширения, благодаря чему геометрическая форма изделия изменяется не столь сильно и нивелируется его коробление; полимерная оснастка обладает значительно меньшей массой и стоимостью по сравнению с оснасткой, выполненной из металлических материалов. Схожесть полимерных и металлических оснасток состоит в том, что для успешного снятия заготовки из ПКМ (бездефектность поверхности формуемой заготовки, легкость съема) необходимо обеспечить ее легкое отделение от формообразующей поверхности. Независимо от технологии формования оснастки из ПКМ [6–10] она не будет обладать значительными антиадгезионными свойствами по отношению к полимерным связующим, что делает невозможными как получение качественного изделия, так и его полное снятие. Для придания вспомогательным приспособлениям и оснасткам антиадгезионных свойств используются различные вещества и составы, в общем виде называемые разделителями или антиадгезивами [11]. Номенклатура разделительных составов достаточно широка и представлена следующими основными классами антиадгезивов: спиртовые, восковые, полупостоянные разделители и антиадгезивы на основе водных эмульсий. Общим требованием ко всем разделительным составам является необходимость обеспечения достаточного прилипания связующих к формообразующей поверхности – например, в случае использования препрегов, но при этом инертность к связующим на стадии их отверждения, т. е. недопущение образования адгезионного соединения между связующим и оснасткой. Немаловажным требованием является также возможность обновляемости покрытия, заключающееся в легкости корректировки слоя антиадгезива и беспрепятственности удаления его с оснастки из ПКМ при условии недопущения повреждения ее поверхности агрессивными смывками [12]. Антиадгезив должен обеспечивать легкость и бездефектность съема заготовки с оснастки, а также минимизировать или исключать переход антиадгезионного покрытия на формуемое изделие.

Эффективность разделительного состава можно оценить с помощью определения краевого угла смачивания (КУС) жидкостей, применяемых для тестов, и расчета свободной поверхностной энергии (СПЭ), а именно – по разнице значений параметров КУС и СПЭ для исходного и обработанного антиадгезивом материала. Рассмотрим равновесное состояние капли жидкости на поверхности подложки (см. рисунок).



Схематичное изображение капли жидкости на поверхности твердого тела в равновесных условиях

На границе трех фаз (твердое тело–газ–жидкость) растяжение капли по поверхности твердого тела вызвано стремлением к уменьшению поверхностной энергии субстрата, из-за чего точка трехфазного контакта смещается. Растеканию капли соответствует высокая энергия поверхностей, равная поверхностному натяжению твердого тела на границе с воздухом (вектор  $\delta_{2-3}$ ). Межфазная энергия на границе твердого тела с жидкостью (вектор  $\delta_{1-2}$ ) стремится сжать каплю, благодаря чему поверхностная энергия уменьшается из-за снижения площади поверхности. Когезионные силы внутри самой капли также препятствуют растеканию, их действие направлено от границы трех фаз по касательной к сферической поверхности капли (вектор  $\delta_{1-3}$ ). Угол  $\theta$ , образованный касательной к межфазным поверхностям, ограничивающим смачивающую жидкость, с вершиной на границе раздела твердой, жидкой и газообразной фаз, называется краевым углом смачивания [8]. В зависимости от значений КУС обозначают следующие состояния поверхности: плохое смачивание, при котором КУС тестовой жидкости тупой; частичное смачивание, при котором КУС острый; полное смачивание, характеризующееся невозможностью определения КУС, так как жидкость растекается в тонкую пленку. Необходимо отметить, что возможно отслеживать реакцию образца на нанесение покрытий различных типов, замеряя КУС до и после нанесения покрытия. Однако следует учесть, что замеры КУС можно проводить не только с помощью стандартных тестовых жидкостей (например, водой, глицерином, гексаном и др.), но и адгезивами и антиадгезивами, что позволит определить отношение используемого адгезива к исследуемому покрытию. Свободную поверхностную энергию твердого тела рассчитывают на основании КУС для различных жидкостей с известным поверхностным натяжением и их компонентами на поверхности исследуемого субстрата. Свободная поверхностная энергия твердого тела – это термодинамическая характеристика, являющаяся мерой работы, затрачиваемой на образование единицы поверхности, которая характеризует способность материала субстрата к смачиванию адгезивом. При увеличении поверхностной энергии подложки можно добиться улучшения условий смачивания, что будет приводить к возрастанию количества адгезионных связей [13].

Ранее в предыдущих работах по исследованию свойств разделительных составов рассмотрено влияние антиадгезионной системы, состоящей из грунтовки и полупостоянного антиадгезионного состава, на СПЭ углепластиков. Методом лежащей капли при помощи прибора для измерения КУС получены его значения для воды и глицерина на углепластике в исходном и обработанном антиадгезионным составом состояниях. На основании результатов расчетов СПЭ углепластиков, проведенных методом Оуэнса–Вендта–Рабеля–Каелбле (ОВРК) с помощью программного продукта, прилаемого к используемому оборудованию, можно наблюдать существенное уменьшение СПЭ для обработанного антиадгезионной системой образца – более чем в 2,35 раза. Причем полярная компонента СПЭ, отражающая активность поверхности при адгезионном контакте, уменьшилась чуть более чем в 5 раз. Поэтому представляет научный и практический интерес исследование свойств различных марок антиадгезионных составов с дальнейшими выводами о применимости данных жидкостей при формовании изделий из ПКМ.

### Материалы и методы

Метод лежащей капли, с помощью которого определяли КУС тестовых жидкостей на поверхности исследуемых пластиков, относится к группе статических методов определения – капля жидкости находится в неподвижном состоянии на твердой поверхности полимерной оснастки. Реализуется метод лежащей капли посредством использования автоматизированного оптического анализатора в соответствии

с СТО 1-595-7-593–2019. Поверхностные свойства и энергетические характеристики антиадгезионных жидкостей исследовали с помощью процессорного тензиометра. Поверхностное натяжение разделительных составов определяли методом пластины Вильгельми. Стандартная пластина Вильгельми представляет собой платинированную пластину известного размера, полностью смачиваемую жидкостью за счет высокой поверхностной энергии платины. Расчет поверхностного натяжения осуществляли при погружении пластины в исследуемую жидкость по нагрузке на весовую систему прибора с измерением длины смачиваемой поверхности. Условия проведения измерений методом SFT Plate: скорость обнаружения поверхности 10 мм/мин; глубина погружения 2 мм; максимальное время измерения 60 с; стандартное отклонение – не более 0,1 мН/м. Габаритные размеры образцов из угле- и стеклопластиков, используемых для определения КУС с помощью анализатора краевого угла смачивания, равны  $(80\pm 3)\times(80\pm 3)\times(4,0\pm 0,1)$  мм (Д×Ш×В). Расчет СПЭ выполнен с помощью метода ОВРК. В случае использования анализатора краевого угла смачивания и процессорного тензиометра константы поверхностного натяжения используемых тестовых жидкостей выбирали исходя из значений, приведенных в базах данных программного обеспечения соответствующего оборудования. В работе использованы следующие тестовые жидкости: 1 – дистиллированная вода (ГОСТ Р 58144–2018) и 2 – глицерин ч.д.а. (ГОСТ 6259–75), а также антиадгезионные жидкости: I – смазка на основе растворителей, представляющая собой прозрачную жидкость, время высыхания слоев которой составляет от 5 до 10 мин; II – полупостоянный разделитель с улучшенным эффектом скольжения, подходящий для деталей со сложной геометрической формой, с временем отверждения каждого слоя ~10 мин (после нанесения последнего слоя необходима выдержка 40–60 мин для полного отверждения покрытия); III – прозрачная жидкость, представляющая собой продукт согидролиза метилтрихлорсилана и диметилдихлорсилана в толуоле и отверждаемая при температуре >200 °С на необходимой поверхности; IV и V – отверждаемые влагой воздуха составы на основе кремнийорганических веществ в органических растворителях, которые применяются для обработки пресс-форм, причем для – при нанесении состава V форма должна быть разогрета (в данном случае более чем на 100 °С), затем следует просушивание слоев в течение 15 мин, после нанесения финального слоя необходима выдержка 30–40 мин.

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

### Результаты и обсуждение

В строгом соответствии с рекомендациями изготовителей антиадгезионных составов обрабатывали поверхности образцов полимерных оснасток на основе углеродного и стеклянного наполнителей. С помощью прибора для измерения краевого угла смачивания методом лежащей капли исследовали КУС тестовых жидкостей 1 и 2 на исходных полимерных стекло- и углепластиковых оснастках и на образцах оснасток с различными разделительными системами на их поверхности (табл. 1 и 2).

Таблица 1

**Результаты измерения краевого угла смачивания тестовых жидкостей на исходных образцах полимерных оснасток**

Образцы полимерной оснастки	Краевой угол смачивания*, градус, для жидкости	
	вода	глицерин
Углепластик	<u>79,30–87,53</u>	<u>79,86–89,08</u>
	86,61	83,88
Стеклопластик	<u>77,21–84,15</u>	<u>74,43–81,34</u>
	79,86	76,20

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

Таблица 2

**Результаты измерения краевого угла смачивания тестовых жидкостей  
на образцах полимерных оснасток с различными разделительными системами**

Разделительная система	Краевой угол смачивания*, градус, для жидкости	
	вода	глицерин
Оснастка на основе стеклонаполнителя		
I	109,06–113,55	103,22–106,86
	111,14	104,97
II	104,53–109,18	95,63–99,40
	106,75	97,34
III	113,16–118,97	102,28–108,99
	115,03	104,89
IV	115,86–121,09	100,63–110,23
	119,87	103,41
V	105,23–107,70	100,21–104,32
	106,28	102,04
Оснастка на основе угленаполнителя		
I	106,58–109,35	97,17–101,49
	107,91	99,63
II	106,28–110,41	96,38–99,03
	107,89	97,86
III	110,25–115,24	106,20–109,98
	112,58	107,93
IV	115,79–121,42	104,74–106,27
	118,40	105,45
V	115,64–119,08	104,24–109,30
	117,17	106,04

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

Результаты определения КУС демонстрируют существенное увеличение его значений в ряду «исходные → обработанные антиадгезивом образцы», что свидетельствует о переходе образцов стекло- и углепластиков из состояния частичного смачивания в состояние несмачивания используемыми тестовыми жидкостями. Для того чтобы привести количественную оценку наблюдаемого перехода, следует рассчитать СПЭ для образцов из полимерных оснасток.

Согласно методу ОВРК, поверхностную энергию можно представить суммой ее полярной и дисперсионной составляющих. Полярная компонента представляет собой множество взаимодействий – например, донорно-акцепторных, водородных, кезомовских, дебаевских и др., а дисперсионная составляющая – это энергия, относящаяся к лондоновским взаимодействиям [14, 15]. Для определения СПЭ методом ОВРК необходимо обладать информацией как о значении КУС для тестовой жидкости на поверхности исследуемого материала, так и о поверхностном натяжении используемых тестовых жидкостей. В табл. 3 продемонстрированы значения поверхностного натяжения ( $\sigma_L$ ) для используемых тестовых жидкостей при температуре 20 °С и его составляющих – полярной ( $\sigma_L^p$ ) и дисперсионной ( $\sigma_L^d$ ) частей, значения которых взяты из базы данных программного обеспечения к используемому прибору – для жидкостей 1 и 2.

Таблица 3

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

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

В табл. 4 продемонстрированы результаты расчета СПЭ методом ОВРК для образцов угле- и стеклопластиков до и после обработки поверхностей последних с применением различных антиадгезионных жидкостей.

Таблица 4

**Результаты расчета свободной поверхностной энергии (СПЭ) и ее составляющих методом ОВРК**

Разделительная система	СПЭ, мН/м	Дисперсионная часть, мН/м	Полярная часть, мН/м
Оснастка на основе стеклонаполнителя			
Исходная поверхность	25,18	9,39	15,79
I	9,94	8,39	1,55
II	17,34	16,80	0,54
III	15,87	15,86	0,01
IV	34,51	32,10	2,41
V	10,42	7,35	3,07
Оснастка на основе угленаполнителя			
Исходная поверхность	20,43	6,76	13,67
I	14,71	13,93	0,78
II	18,34	18,07	0,27
III	8,07	5,77	2,30
IV	22,45	21,96	0,49
V	17,37	17,33	0,04

Результаты расчета СПЭ стекло- и углепластиков, приведенные в табл. 4, свидетельствуют о заметном уменьшении СПЭ исследуемых образцов полимерных оснасток с нанесенным антиадгезионным покрытием в сравнении с исходными образцами пластиков. Для образцов с антиадгезионными покрытиями I–III, V значения СПЭ уменьшились приблизительно в 2,53; 1,45; 1,59; 2,42 и 1,39; 1,11; 2,53; 1,18 раза соответственно для образцов на основе стекло- и угленаполнителя. Для антиадгезионной жидкости IV наблюдается обратная ситуация: ее значения СПЭ больше, чем у исходных образцов полимерных оснасток в 1,37 раза для стеклонаполнителя и в 1,1 раза для угленаполнителя. Необходимо также обратить внимание на существенное уменьшение полярной компоненты СПЭ исследуемых образцов после нанесения антиадгезионного покрытия. Полярная составляющая СПЭ отражает активность поверхности при формировании адгезионного контакта, поэтому при исследовании антиадгезивов необходимо оценивать эффективность составов не только по общему уменьшению значений СПЭ, но и по ее полярной составляющей.

Результаты определения поверхностного натяжения и его составляющих для антиадгезионных жидкостей, используемых в данной работе, приведены в табл. 5.

Таблица 5

**Результаты определения поверхностного натяжения и его составляющих для антиадгезионных составов**

Разделительная система	Поверхностное натяжение, мН/м	Дисперсионная часть, мН/м	Полярная часть, мН/м
I	20,5	20,5	0
II	23,1	23,1	
III	19,6	19,6	
IV	23,0	23,0	
V	22,9	22,9	

Полярная и дисперсионная составляющие поверхностного натяжения антиадгезионных жидкостей определены с помощью программы, прилагаемой к процессорному тензиометру, методом Liquid polarity. Расчет основан на модели, согласно которой КУС является результатом взаимодействия полярной и дисперсной частей жидкости и твердого тела соответственно. Вводятся данные о контактном угле жидкости с чисто дисперсным твердым телом с известным значением СПЭ и данные о поверхностном натяжении жидкости. В качестве дисперсного твердого материала использован политетрафторэтиленовый (ПТФЭ) провод диаметром 0,54 мм. Свободная поверхностная энергия чистого ПТФЭ составляет 18 мДж/м<sup>2</sup> (значение взято из базы данных программы прибора). Динамические КУС каждой из антиадгезионных жидкостей к поверхности ПТФЭ провода равны нулю, поэтому жидкости типично дисперсионные, что и отражено в данных табл. 5.

### Заключения

Основными результатами исследования можно считать установление наиболее оптимальных антиадгезионных составов из тех, что исследовались в данной работе. Все приведенные антиадгезионные составы могут использоваться при формовании изделий из ПКМ, однако можно выделить следующие марки разделительных систем: I, V – для стеклопластиковых полимерных оснасток, а для углепластиковых – антиадгезионная смазка III. При использовании разделительных составов для формования изделий из ПКМ необходимо уделять должное внимание полному отверждению используемой жидкости на формообразующей поверхности. «Переход» антиадгезива на формуемую заготовку из ПКМ является следствием его плохого отверждения, поэтому применение антиадгезионной смазки III может быть затруднено для оснасток, эксплуатируемых при температурах <200 °С. У составов I и V такой проблемы не наблюдается, поскольку температуры полного отверждения составов не превышают эксплуатационные температуры для большинства полимерных оснасток. Определенные в работе значения поверхностного натяжения антиадгезионных составов можно будет применить в исследованиях смачиваемости данных жидкостей на разнообразных субстратах.

Следует отметить, во-первых, необходимость дальнейшего исследования антиадгезионных составов, но уже непосредственно сравнивая эксплуатационные свойства различных антиадгезионных покрытий с их энергетическими характеристиками, во-вторых, необходимость проведения работ по пробоподготовке пластиков различной природы к определению КУС как самого материала, так и покрытий на его поверхности. Интерес вызывает сравнение статического и динамического методов измерения КУС, в связи с чем при отлаженной пробоподготовке образцов из ПКМ на процессорном тензиометре необходимо сравнивать значения КУС, измеренные на одинаковых материалах с помощью анализатора краевого угла смачивания и процессорного тензиометра.

### Список источников

1. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. № 1. С. 36–39.
2. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520–530.
3. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 7–17.
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. Каблов Е.Н., Гращенко Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С., Севастьянов В.Г. Высокотемпературные конструкционные композиционные материалы на основе стекла и керамики для перспективных изделий авиационной техники // *Стекло и керамика*. 2012. № 4. С. 7–11.
6. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение термореактивных 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: 16.11.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
7. 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.
8. Мосиук В.Н., Томчани О.В. Оценка свойств стеклопластиков на основе эпоксибисмалеимидного связующего, полученных по различным неавтоклавным технологиям формования // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (55). С. 47–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-47-52.
9. 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: 16.11.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-22-36.
10. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // *Полимерные материалы и технологии*. 2016. Т. 2. № 2. С. 37–42.
11. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П., Пономаренко С.А. Антиадгезионные покрытия и их свойства // *Труды ВИАМ*. 2018. № 12 (72). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.11.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-88-96.
12. Семенова Л.В., Новикова Т.А., Нефедов Н.И. Изучение смывающей способности смывок для удаления систем лакокрасочных покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 1 (46). С. 32–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-32-37.
13. Фролов В.И., Семенов А.П., Гришина И.Н., Кучеров В.Г. Краевой угол смачивания и методы его определения. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2021. 53 с.
14. Зинина И.Н., Пиманов М.В. Влияние поверхностной энергии металлических образцов на прочность клеевых соединений // *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2011. № 2 (21). С. 127–130.
15. Яковец Н.В., Крутько Н.П., Опанасенко О.Н. Определение свободной поверхностной энергии порошкообразных смолисто-асфальтеновых веществ методом Оуэнса–Вендта–Рабеля–Каелбле // *Свиридовские чтения*. 2012. № 8. С. 253–260.

#### References

1. Kablov E.N. Composites: today and tomorrow. *Metally Evrazii*, 2015, no. 1, pp. 36–39.
2. Kablov E.N. Materials and chemical technologies for aviation equipment. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, vol. 82, no. 6, pp. 520–530.
3. 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.
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. Kablov E.N., Grashchenkov D.V., Isaeva N.V., Solntsev S.S., Sevastyanov V.G. High-Temperature Structural Composite Materials Based on Glass and Ceramics for Advanced Aircraft Products. *Steklo i keramika*, 2012, no. 4, pp. 7–11.
6. Tkachuk A.I., Donetskyy 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://journal.viam.ru> (accessed: November 16, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.

7. 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.
8. Mosiyuk V.N., Tomchani O.V. Evaluation of properties of glass-fibre-reinforced plastics based on epoxybisma-leimide resin, produced by different non-autoclave molding techniques. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 47–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-47-52.
9. 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: November 16, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-22-36.
10. Kablov E.N., Chursova L.V., Babin A.N., Mukhametov R.R., Panina N.N. Developments of FSUE "VIAM" in the field of melt binders for polymer composite materials. *Polimernye materialy i tekhnologii*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 37–42.
11. Mukhametov R.R., Petrova A.P., Ponomarenko S.A. Anti-adhesive coatings and their properties. *Trudy VIAM*, 2018, no. 12 (72), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 16, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-88-96.
12. Semenova L.V., Novikova T.A., Nefedov N.I. Study of removing ability of removers for paint systems removal. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 1 (46), pp. 32–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-32-37.
13. Frolov V.I., Semenov A.P., Grishina I.N., Kucherov V.G. *Wetting angle and methods for its determination*. Moscow: Publishing Center of the Russian State University of Oil and Gas (NRU) im. I.M. Gubkina, 2021, 53 p.
14. Zinina I.N., Pimanov M.V. Influence of the surface energy of metal samples on the strength of adhesive joints. *Izvestiya MSTU "MAMI"*, 2011, no. 2 (21), pp. 127–130.
15. Yakovets N.V., Krutko N.P., Opanasenko O.N. Determination of the free surface energy of powdered resinous-asphalten substances by the Owens–Wendt–Rabel–Kaelble method. *Sviridovskie chteniya*, 2012, no. 8, pp. 253–260.

#### Информация об авторах

**Савицкий Руслан Сергеевич**, и. о. начальника сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Судьин Юрий Иванович**, инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Салахова Розалия Кабировна**, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

**Ruslan S. Savitsky**, Acting Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Yury I. Sudin**, Engineer-Technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Rosalia K. Salakhova**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 19.01.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 30.01.2023.

The article was submitted 19.01.2023; approved and accepted for publication after reviewing 30.01.2023.