

УДК 678.026

Р.Р. Мухаметов¹, А.П. Петрова¹, С.А. Пономаренко¹

АНТИАДГЕЗИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ И ИХ СВОЙСТВА

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-88-96

Приведены свойства антиадгезионных покрытий на основе кремнийорганических соединений. Показано влияние строения кремнийорганических соединений, катализаторов отверждения и их содержания на основные свойства антиадгезионных покрытий. Приведены режимы отверждения покрытий и показана эффективность применения антиадгезионного покрытия на основе метилсилоксанового олигомера К-21 с температурой отверждения 120°C в течение 2 ч при изготовлении полимерных композиционных материалов способом автоклавного формования.

Ключевые слова: антиадгезионные свойства, гидрофобность, антиадгезионные покрытия, кремнийорганические соединения, адгезионная прочность.

R.R. Mukhametov¹, A.P. Petrova¹, S.A. Ponomarenko¹

ANTI-ADHESIVE COATINGS AND THEIR PROPERTIES

The article describes properties of anti-adhesive coatings based on organosilicon compounds. Influence of a structure of organosilicon compounds, curing catalysts and their content on basic properties of anti-adhesive coatings is shown. The curing conditions of coatings are given. The efficiency of use of anti-adhesive coating based on methylsiloxane oligomer K-21 when cured at 120°C for 2 hours for production of polymer composites by autoclave molding method.

Keywords: anti-adhesive properties, hydrophobicity, anti-adhesive coatings, organosilicon compounds, adhesive strength.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Гидрофобизация материалов широко применяется для придания им водоотталкивающих свойств. Она заключается в обработке поверхности различными химическими соединениями, придающими ей свойства несмачиваемости водой. Использование такого приема позволило решить ряд практических задач:

- улучшить видимость через смотровые окна воздушного и водного транспорта в условиях дождя и при забрызгивании морской водой;
- обеспечить защиту оптических стекол от разрушающего воздействия влаги;
- значительно увеличить поверхностное электрическое сопротивление изоляционных материалов во влажных условиях;
- повысить коррозионную устойчивость металлов и атмосферостойкость строительных материалов и конструкций;
- улучшить свойства текстильных материалов и кожаных изделий.

В авиационной промышленности такие составы необходимы для обработки оснастки, используемой при формовании полимерных композиционных материалов (ПКМ), с целью уменьшить адгезию к ней связующих, входящих в состав ПКМ.

В качестве гидрофобизаторов наибольшее распространение получили покрытия на основе кремнийорганических мономеров и олигомеров и фторолигомеров [1–5]. В настоящее время с учетом доступности и стоимости материалов наиболее широко используют гидрофобизаторы на основе кремнийорганических соединений. Гидрофобизаторы на основе фторолигомеров менее доступны и более дорогостоящие.

Наибольшее распространение на предприятиях авиационной отрасли получила антиадгезионная кремнийорганическая смазка К-21 (ТУ6-02-909–79), которая на поверхности оснастки при температуре 200–230°C образует тонкое твердое полимерное покрытие, позволяющее без возобновления получать до пяти запрессовок на основе эпоксидных связующих. Необходимость проведения высокотемпературной обработки покрытий для их отверждения является одним из недостатков смазки К-21 и ограничивает ее применение. Поэтому представляется перспективным проведение исследований по подбору катализаторов холодного отверждения покрытий на основе метилсилоксанового олигомера К-21.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.1. «Связующие для полимерных и композиционных материалов конструкционного и специального назначения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [6–8].

Материалы и методы

Для проведения исследований применялись следующие материалы:

- антиадгезионная кремнийорганическая смазка К-21 (ТУ6-02-909–79);
- гидрофобизирующая жидкость 136-157М;
- полиметилфенилсилоксан (ГК-10), содержащий высокореакционные гидридные Si–H-группы.

Структурные формулы указанных соединений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Полимерные основы антиадгезионных составов

| Марка состава | Химическая природа | Структурная формула |
|---------------|----------------------------|--|
| К-21 | Олигометилгидроксисилоксан | $[-O-[Si(CH_3)_2-O-]_m[Si(CH_3)(OH)-O-]_n-$ |
| 136-157М | Полиметилгидридсилоксан | $[-SiH(CH_3)-O-]_n$ |
| ГК-10 | Полиметилфенилсилоксан | $[Si(C_6H_5)(CH_3)-O-]_k[Si(C_6H_5)O_{1,5}]_m-[SiH(CH_3)-O-]_n-$ |

Растворы антиадгезионной смазки К-21 для испытаний с концентрацией 5; 10 и 20% (по массе) приготовлены в лаборатории путем растворения навесок кремнийорганического полимера и катализатора в гексане, а растворы с концентрацией 8 и 15% (по массе) с добавками катализатора получены от коммерческих поставщиков.

Эффективность антиадгезионных покрытий оценивали по адгезионной прочности на границе раздела «покрытие–полимер» в условиях, моделирующих реальные условия эксплуатации материалов. Подготовку материалов для испытаний проводили следующим образом: на металлическую плоскую пластину размером 60×20 мм и толщиной 2 мм из алюминиевого сплава Д16-АТ или нержавеющей стали Х18Н9Т наносили покрытие окунанием в раствор антиадгезионного состава. Предварительную очистку поверхности металла проводили непосредственно перед нанесением покрытия путем протирки ацетоном до и после зашкуривания. Обработанные пластины выдерживали на воздухе в течение 15–20 мин для удаления растворителя, после чего проводили отверждение антиадгезионного покрытия. Образец с отвержденным покрытием склеивали

внахлест с другим образцом (без покрытия) полиуретановым клеем ПУ-2 при температуре $105 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 4 ч. Испытания склеенных образцов проводили на сдвиг через 24 ч после снятия груза на универсальной разрывной машине. Для подтверждения полноты отверждения образцов сопоставляли адгезионную прочность исходных материалов и материалов после экстракции гексаном в течение 10 ч в приборе Сокслета.

Оценку химических превращений, происходящих при отверждении олигомера К-21, проводили путем получения и обработки ИК-спектров пленки олигомера в присутствии катализатора 230-15. Покрытие наносили на кристалл из KBr путем осаждения из 8%-ного раствора олигомера К-21 в гексане непосредственно после введения отвердителя (2% (по массе) катализатора 230-15 по отношению к массе полимерной основы). Спектры снимали на ИК-спектрометре IR-435 фирмы Shimadzu (Япония) в диапазоне частот $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ [9–11].

Результаты и обсуждение

Гидрофобные покрытия на основе кремнийорганических соединений приобретают необходимые эксплуатационные свойства только после отверждения. Помимо формирования связей покрытия с материалом, отверждение также сопровождается процессами конденсации и сшивки кремнийорганических олигомеров по гидроксильным или гидридным группам.

Влияние химической природы матрицы и режима отверждения антиадгезионных покрытий на адгезионную прочность клеевых соединений исследовано на примере образцов, нанесенных из 5%-ных растворов в гексане, и показано в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость прочности клеевого соединения материала Д16-АТ на клее ПУ-2 от химической природы полимерной основы и режима отверждения антиадгезионного покрытия

| Основа антиадгезионного покрытия | Температура, °С, отверждения покрытия при выдержке в течение 2 ч | $\tau_{\text{сдв}}$, МПа |
|----------------------------------|--|---------------------------|
| К-21 | 180 | 0,88 (0,77–0,94) |
| | 200 | 1,03 (0,40–1,40) |
| | 230 | 1,26 (1,17–1,44) |
| 136-157М | 180 | 0,96 (0,85–1,09) |
| | 200 | 2,25 (1,93–2,57) |
| | 230 | 5,18 (4,86–5,47) |
| ГК-10* | 200 | 1,80 (1,4–2,1) |

* Использовался 8%-ный раствор.

Из приведенных данных видно, что исследуемые составы покрытий позволяют получать низкие значения адгезионной прочности при предложенных режимах отверждения. При использовании покрытия на основе жидкости 136-157М и продолжительности его отверждения 2 ч низкая адгезионная прочность (хорошие антиадгезионные свойства) достигается только при температуре 180°C . После отверждения при рассматриваемых условиях покрытие на основе продукта ГК-10 по антиадгезионным характеристикам также уступает покрытию К-21.

С целью отверждения покрытий из растворов использованных кремнийорганических соединений при умеренных температурах (не более 120°C) опробованы катализаторы (табл. 3), которые вводились в антиадгезионный состав в количестве 2% (по массе) от массы полимерной основы [12–15].

Таблица 3

**Катализаторы, применявшиеся для холодного отверждения
антиадгезионных покрытий**

| Марка катализатора | Химическое название | Структурная формула |
|--------------------|---|---|
| К-18 | Диэтилдикаприлат олова+тетраэтоксисилан | $(C_2H_5)_2Sn(OCOC_7H_{15})_2+Si(OC_2H_5)_4$ |
| 230-15 | Диэтилдикаприлат олова | $(C_2H_5)_2Sn(OCOC_7H_{15})_2$ |
| АДЭ-3 | Диэтиламинотриэтоксисилан | $(C_2H_5)_2N-CH_2-Si(OC_2H_5)_3$ |
| АГМ-9 | Гамма-аминопропилтриэтоксисилан | $H_2N-(CH_2)_3-Si(OC_2H_5)_3$ |
| А-39 | Смесь АДЭ-3 и АГМ-9 в соотношении 1:1 (мас. ч.) | $(C_2H_5)_2N-CH_2-Si(OC_2H_5)_3+$ $+H_2N-(CH_2)_3-Si(OC_2H_5)_3$ |

В табл. 4 показана зависимость адгезионной прочности клеевого соединения от химической природы полимерной основы адгезионного состава и катализатора. Отверждение покрытия из раствора продукта К-21 и жидкости 136-157М проводили при комнатной температуре в течение 24 ч. В случае использования продукта ГК-10 применялся катализатор А-39. Из приведенных данных видно, что лучшими антиадгезионными свойствами обладают покрытия из продукта К-21, отвержденные в присутствии катализаторов 230-15 и АГМ-9.

Таблица 4

Зависимость адгезионной прочности клеевого соединения Д16–ПУ-2–Д16 от химической природы полимерной основы и катализатора, наносимых из раствора в гексане (концентрация основы 5% (по массе) с добавкой 2% (по массе) катализатора)

| Основа антиадгезионного покрытия | Марка катализатора | $\tau_{сдв}$, МПа |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|
| К-21 | К-18 | 0,70 (0,58–0,91) |
| | 230-15 | 0,29 (0,15–0,50) |
| | АДЭ-3 | 0,79 (0,78–0,80) |
| | АГМ-9 | 0,69 (0,53–0,95) |
| | А-39 | 0,64 (0,21–1,00) |
| 136-157М | К-18 | 0,87 (0,62–1,13) |
| | 230-15 | 0,45 (0,23–0,67) |
| | АДЭ-3 | 0,37 (0,06–0,68) |
| | АГМ-9 | 0,58 (0,20–0,79) |
| | А-39 | 0,70 (0,50–1,12) |
| ГК-10* | А-39 | 1,79 (1,37–2,13) |

* Отверждение проводилось при 80°C в течение 30 мин.

На основании полученных результатов и доступности сырьевой базы выбран антиадгезионный состав на основе продукта К-21, отверждаемый в присутствии катализатора 230-15 (или АГМ-9). Представляло интерес установить оптимальное содержание катализатора. На рис. 1 показана зависимость адгезионной прочности клеевого соединения от химической природы и содержания катализатора для отверждения антиадгезионного покрытия при использовании 5%-ного раствора К-21 в гексане. Режим отверждения покрытия – при 20°C в течение 24 ч. Видно, что содержание кислородсодержащего катализатора 230-15 практически не оказывает влияния на антиадгезионные свойства покрытия во всем исследованном диапазоне. При увеличении содержания аминсодержащего отвердителя АГМ-9 с 1 до 2% (по массе) наблюдается существенное снижение адгезионной прочности – с 2,75 до 1,20 МПа. Дальнейшее

повышение содержания АГМ-9 до 5% (по массе) практически не оказывает влияния на адгезионную прочность клеевого соединения. Полученные данные подтверждают обоснованность выбора добавления катализаторов холодного отверждения в количестве 2% (по массе) от массы полимерной основы [16–20].

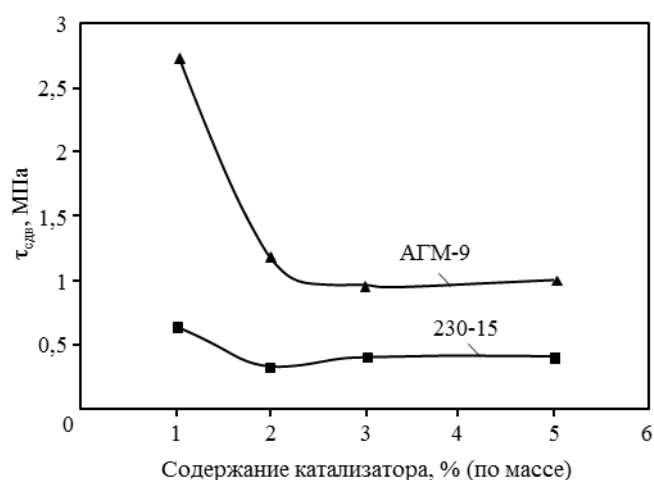


Рис. 1. Зависимость адгезионной прочности клеевого соединения от химической природы и содержания катализатора для отверждения покрытия на основе олигомера К-21

Для ускорения процесса отверждения покрытий на основе олигомера К-21 с добавкой 2% (по массе) катализатора 230-15 и оценки возможности его проведения при умеренных температурах опробовали следующие режимы отверждения:

| Температура отверждения, °С | Продолжительность выдержки |
|-----------------------------|----------------------------|
| 80 | } 30 мин; 1 и 2 ч |
| 100 | |
| 110 | |

Отвержденные покрытия по всем исследованным режимам отверждения показали высокие антиадгезионные свойства – $\tau_{сдв}=0,13-0,28$ МПа.

При разработке антиадгезионных составов с температурой отверждения не выше 120°С представляло интерес ИК-спектроскопическое исследование процессов, происходящих в пленках олигомера К-21 в присутствии катализатора 230-15 [21–25].

Спектры снимали как сразу после нанесения покрытия, так и после прогрева образца при температуре 80°С в течение 15; 30; 45 и 60 мин. Анализ результатов ИК-спектроскопического исследования показал, что в процессе отверждения покрытия на основе олигомера К-21 в присутствии катализатора 230-15 происходит уменьшение оптической плотности полосы поглощения при длине волны $\lambda=1073$ см⁻¹ (рис. 2, прямая 1) при одновременном увеличении оптической плотности полосы поглощения при $\lambda=1033$ см⁻¹ (рис. 2, прямая 2), отнесенных к оптической плотности полосы поглощения при $\lambda=1257$ см⁻¹ (внутренний стандарт). Наблюдаемые изменения на кривых ИК-спектров связаны с формированием поверхностной полимерной кремнийорганической пленки в процессе отверждения антиадгезионного покрытия. Однако ввиду низкой концентрации олигомера К-21 в обрабатываемом составе и, следовательно, малой толщины формируемого покрытия полученные данные не позволяют представить полную картину происходящих изменений в пленке олигомера К-21 в присутствии отвердителя.

В промышленности олигомер К-21 используется без катализатора в виде 5–10%-ных растворов в бензине или нефрасе в качестве смазки. Для выбора оптимальных состава и концентрации смазки К-21 использованы антиадгезионные покрытия из растворов с концентрацией в диапазоне от 5 до 20% (по массе) с содержанием 2% (по массе) катализатора 230-15 и определена адгезионная прочность клеевого соединения (рис. 3). Сопоставление данных для образцов с концентрациями 5; 10 и 20% (по массе) показывает, что увеличение концентрации полимерной основы антиадгезионного покрытия приводит к уменьшению его адгезионной прочности и улучшению антиадгезионных характеристик, что объясняется увеличением толщины слоя отвержденного покрытия. Следует отметить, что добиться большей толщины слоя покрытия и его требуемой эффективности можно также за счет ухудшения технологичности его нанесения – в частности, путем его многократного нанесения с периодической сушкой.

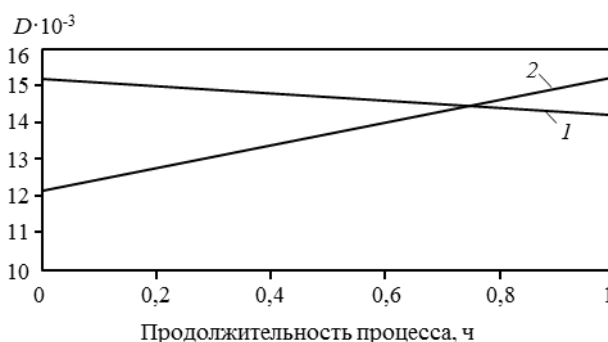


Рис. 2. Изменение относительной оптической плотности (D) полос поглощения при длине волны 1073 (1) и 1033 см^{-1} (2), отнесенной к оптической плотности внутреннего стандарта

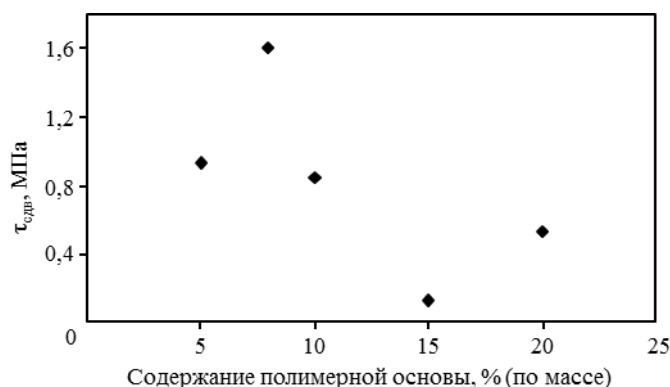


Рис. 3. Адгезионная прочность клеевых соединений с различной концентрацией смазки К-21 в антиадгезионном составе с добавлением 2% (по массе) катализатора 230-15

С другой стороны, использование коммерчески доступных образцов показывает значительное отклонение полученных данных по адгезионной прочности отвержденных слоев по сравнению с аналогичной характеристикой для лабораторных образцов, что, по-видимому, связано с отличиями их химического состава (растворители, присадки и т. п.). Полученные данные показывают, что коммерчески доступный образец с 15% (по массе) смазки К-21 и добавкой 2% (по массе) катализатора (от массы полимерной основы) позволяет обеспечить минимальные адгезионные характеристики отвержденного слоя и является оптимальным.

Одним из технических требований, предъявляемых к разрабатываемым покрытиям, является отсутствие переноса антиадгезионной смазки на формуемый материал.

Для устранения переноса смазки необходимо добиться полного отверждения покрытия и формирования сетки химических связей с подложкой, что можно оценить путем сравнительного изучения исходных и экстрагированных образцов отвержденного покрытия. Экстракцию образцов с покрытием проводили в приборе Сокслета гексаном в течение 10 ч. Из данных, представленных на рис. 4, видно, что уровень антиадгезионных свойств покрытий, полученных из 8- и 15%-ных растворов смазки К-21, для обоих образцов до экстракции заметно выше, чем после ее проведения, и большую пригодность показывает образец с 15%-ной концентрацией антиадгезионной смазки.

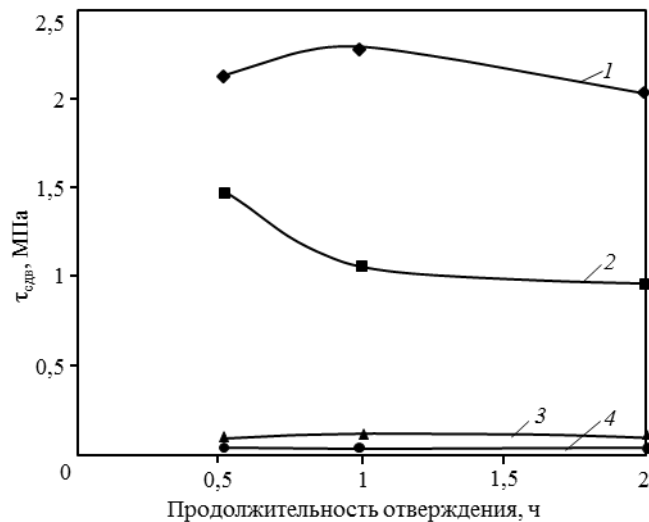


Рис. 4. Влияние экстракции образцов из сплава Д16-АТ с антиадгезионным покрытием на основе смазки К-21 и продолжительности отверждения покрытия на прочность клеевых соединений. Покрытия получены из 8- (1, 2) и 15%-ного (3, 4) растворов смазки К-21 – до (2, 4) и после экстракции (1, 3) при температуре отверждения 80°C

Увеличение адгезионной прочности обоих образцов покрытий после проведения экстракции, по-видимому, свидетельствует об их неполном отверждении при данных условиях, поэтому для улучшения антиадгезионных характеристик рекомендуется проводить их отверждение при максимально возможных «мягких» условиях холодного отверждения – при 120°C в течение 2 ч.

Таким образом, на основании проведенных исследований выбран состав для нанесения антиадгезионных покрытий, включающий 15% (по массе) основы – смазки К-21 с добавкой 2% (по массе) катализатора 230-15 или АГМ-9 (по отношению к массе полимерной основы). Отверждение покрытия осуществляется при 120°C в течение 2 ч.

Заключение

Разработаны антиадгезионные составы на основе кремнийорганического олигомера К-21 с добавками катализаторов, отверждающиеся при температуре 120°C в течение 2 ч*. Разработанные составы обеспечивают высокие антиадгезионные свойства при склеивании материалов полиуретановым клеем ПУ-2 – прочность при сдвиге клеевых соединений алюминиевого сплава Д16-АТ с обработкой поверхности антиадгезионным составом не превышает 0,1 МПа (по сравнению с 3 МПа для клеевого соединения, полученного в аналогичных условиях без обработки поверхности).

* Экспериментальная часть работы выполнена Р.В. Артамоновой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соболевский М.В., Музовская О.А., Попелева Г.С. Свойства и области применения кремнийорганических продуктов. М.: Химия, 1975. 296 с.
2. Нефедов Н.И., Хасков М.А., Петрова А.П., Бузник В.М. Исследование термических свойств фторпарафинов и гидрофобных покрытий на их основе // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №2 (50). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.10.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-11-11.
3. Жданов А.А. Гидрофобизаторы кремнийорганические: энциклопедия полимеров М.: Советская энциклопедия, 1972. Т. 1. С. 625–632.
4. Воронков М.Г., Ласская Е.А., Пашенко А.А. О природе связи водоотталкивающих кремнийорганических покрытий с поверхностью гидрофобизированных материалов // Журнал прикладной химии. 1965. Т. 38. Вып. 7. С. 1483–1487.
5. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1985. 398 с.
6. 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.
7. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // Защита и безопасность. 2014. №4. С. 28–29.
8. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
9. Панина Н.Н., Ким М.А., Гуревич Я.М., Григорьев М.М., Чурсова Л.В., Бабин А.Н. Связующие для безавтоклавного формования изделий из полимерных композиционных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2013. №10. С. 18–27.
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. Донецкий К.И., Хрульков А.В. Принципы «зеленой химии» в перспективных технологиях изготовления изделий из ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S2. С. 24–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-24-28.
12. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е., Рубцова Е.В., Петрова А.П. Исследование эпоксидно-полисульфоновых полимерных систем на основе высокопрочных клеев авиационного назначения // Клеи. Герметики. Технологии. 2017. №3. С. 7–12.
13. Воробьев А. Полиэфирные смолы // Компоненты и технологии. 2003. №32. С. 182–185.
14. Dholakiya B. Unsaturated Polyester Resin for Specialty Applications // Polyester. Intechopen access publisher. 2012. P. 167–202. DOI: 10.5772/48479.
15. Gooch J.W. Vinyl Ester Resin // Encyclopedic Dictionary of Polymers. Springer, Science+Business Media, LLC, 2011. P. 794.
16. Бабин А.Н., Гусева М.А. Использование реологического метода для исследования особенностей растворимости компонентов в полимерном связующем // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №6 (42). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.10.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-5-5.
17. Китаева Н.С., Муханова Е.Е., Деев И.С. Высокотеплостойкие гидрофобные покрытия для теплозащитного материала на основе кварцевого волокна // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №6. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.10.2018).
18. Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М., Музафаров А.М. и др. Создание покрытий для придания супергидрофобных свойств поверхности силиконовых резин // Российские нанотехнологии. 2008. Т. 3. №9–10. С. 100–105.
19. Галямов М.О., Никитин Л.Н., Николаев А.Ю. и др. Формирование ультрагидрофобных поверхностей осаждением покрытий из сверхкритической двуокиси углерода // Коллоидный журнал. 2007. Т. 69. №4. С. 448–462.

20. Беспалов А.С., Бузник В.М., Гращенков Д.В. и др. Гидрофобизация пористых керамических материалов с применением диоксида углерода // Неорганические материалы. 2016. Т. 52. №4. С. 431–437.
21. Бузник В.М., Каблов Е.Н., Кошурина А.А. Материалы для сложных технических устройств арктического применения // Научно-технические проблемы освоения Арктики. М.: Наука, 2015. С. 275–285.
22. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
23. Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания. Свойства и применение // Успехи химии. 2008. Т. 77. №7. С. 619–638.
24. Емельяненко А.М., Бойнович Л.Б. Применение динамической пороговой обработки видеозаписей для определения поверхностного натяжения жидкостей и углов смачивания // Приборы и техника эксперимента. 2002. №1. С. 52–57.
25. Постнова М.В., Постнов В.И. Опыт развития безавтоклавных методов формования ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №4. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.10.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-4-6-6.