

Научная статья

УДК 665.939.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-84-91

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СМОЛ МАРОК ФЕНОТАМ N210, ФЕНОТАМ N210M, КМФ-С, СФЖ-3024 НА ИХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

И.Э. Салимов¹, А.С. Беспалов¹, В.Г. Бабашов¹, В.Г. Максимов¹

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

Аннотация. Исследованы физико-химические свойства смол марок Фенотам N210, Фенотам N210M, КМФ-С и СФЖ-3024. Определены влажность и сорбционная влажность (влагопоглощение) образцов отвержденных смол в соответствии с ГОСТ 17177–94. Методами оптической микроскопии в поляризованном свете и рентгеновской дифракции изучены особенности структуры данных смол. Получены зависимости краевого угла смачивания поверхности стекла от продолжительности исследования для жидких смол марок Фенотам N210M и КМФ-С методом лежащей капли.

Ключевые слова: фенолформальдегидная смола, модифицированная карбамидофенолформальдегидная смола, карбамидомеламиноформальдегидная смола, оптическая микроскопия, рентгеновская дифракция, краевой угол смачивания, влажность, сорбционная влажность

Для цитирования: Салимов И.Э., Беспалов А.С., Бабашов В.Г., Максимов В.Г. Исследование влияния химического состава смол марок Фенотам N210, Фенотам N210M, КМФ-С, СФЖ-3024 на их физико-химические свойства // Труды ВИАМ. 2024. № 2 (132). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-84-91.

Scientific article

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF FENOTAM N210, FENOTAM N210M, KMF-S, SFZH-3024 RESINS ON THEIR PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES

I.E. Salimov¹, A.S. Bespalov¹, V.G. Babashov¹, V.G. Maksimov¹

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

Abstract. In this paper, the physicochemical properties of resins of the Fenotam N210, Fenotam N210M, KMF-S, SFZh-3024 brands were studied. The samples of cured resins were tested for humidity and sorption moisture (moisture absorption) in accordance with the methods from GOST 17177–94. Optical microscopy in polarized light and X-ray diffraction have been used to determine the features of the structure of these resins. The dependences of the contact angle of the glass surface on duration of the study for liquid resins of the Fenotam N210M and KMF-S grades were obtained by the sessile drop method.

Keywords: phenol-formaldehyde resin, urea-modified phenol-formaldehyde resin, urea-melamine-formaldehyde resin, optical microscopy, X-ray diffraction, contact angle, humidity, sorption moisture

For citation: Salimov I.E., Bespalov A.S., Babashov V.G., Maksimov V.G. Investigation of the influence of the chemical composition of Fenotam N210, Fenotam N210M, KMF-S, SFZh-3024 resins on their physico-chemical properties. *Trudy VIAM*, 2024, no. 2 (132), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-84-91.

Введение

Во многих отраслях промышленности используются различные термореактивные клеи и смолы. Благодаря относительной простоте изготовления широкое распространение получили термореактивные смолы, синтез которых основан на реакции поликонденсации формальдегида. На долю данных смол приходится >50 % от объема производства всех смол и клеев.

Смолы на основе формальдегида, такие как карбамидоформальдегидные, фенолформальдегидные, меламиноформальдегидные, карбамидомеламиноформальдегидные и др., являются на сегодняшний день, за некоторым исключением, низкомаржинальным товаром, производимым в больших количествах.

Данные смолы преимущественно выпускаются в виде жидкостей и состоят из линейных или разветвленных олигомерных и полимерных молекул в водном растворе. При отверждении они превращаются в нерастворимые и неплавящиеся твердые полимеры с разветвленной трехмерной структурой.

Помимо основного применения в деревообрабатывающей промышленности, смолы на основе формальдегида применяются в качестве литейных стержней и форм, для пропитки и склеивания бумаги, получения стойких ламинатов, в качестве связующих для стеклопластиков, теплоизоляционных материалов и других композиционных материалов [1–7].

К важнейшим свойствам отвержденных фенолформальдегидных смол следует отнести низкий уровень горючести и дымообразования при горении. Благодаря этим свойствам фенолформальдегидные смолы широко используются как компонент для изготовления пожаробезопасных элементов интерьера [8].

Следует отметить широкое применение фенольных смол в качестве связующего для фрикционных материалов. Данные материалы в первую очередь используются в автомобильной, авиационной и железнодорожной промышленности для изготовления тормозных колодок и накладок для сцепления, а также востребованы в нефтедобывающей промышленности для использования в буровых установках. Фенолформальдегидные смолы являются одним из основных компонентов для изготовления абразивных материалов: отрезных и шлифовальных дисков, наждачной бумаги и др. [9, 10].

Перспективным является применение модифицированных карбамидоформальдегидных смол для получения двумерных наноллистов карбона, легированных азотом. Изменяя содержание мочевины в смоле, можно регулировать структуру пор и содержание легирующего элемента – азота. Эксперименты показывают, что полученные таким образом наноллисты карбона могут использоваться для производства суперконденсаторов и широко применяться в электрокатализе [11].

Полимерные соединения, содержащие гетероатомы с неподеленными электронными парами, π -связи и фенильные кольца, проявляют склонность к адсорбции и образуют координационные связи на поверхности металлов [12]. Полимерные соединения с большим количеством элементов, способных образовывать координационные связи, обеспечивают дополнительное преимущество и помогают эффективнее защитить металл от коррозии [13]. Кроме того, полимерные соединения экологичны и относительно безвредны для окружающей среды. Таким образом, фенолформальдегидные смолы имеют большое практическое и экологическое значение, поскольку способны прочно связываться с железным субстратом и действуют как потенциальные ингибиторы коррозии в кислой среде [14].

Благодаря способности к комплексообразованию фенолформальдегидные смолы могут эффективно адсорбировать ионы тяжелых металлов и молекулы органических красителей, что открывает возможности их использования для эффективной очистки сточных вод [15].

Несмотря на широкое применение и продолжающиеся исследования фенольных смол различных составов, особый интерес представляет изучение процессов частичной кристаллизации и образования в них упорядоченных структур при отверждении. Предметом исследования данной работы является изучение особенностей кристаллизации отечественных смол марок Фенотам Н210, Фенотам Н210М, КМФ-С и СФЖ-3024, а также определение влажности и влагопоглощения (сорбционной влажности) образцов отвержденных смол и исследование краевого угла смачивания.

Материалы и методы

Объектами исследования являются фенолформальдегидная смола Фенотам Н210 (с динамической вязкостью $46 \cdot 10^{-3}$ Па·с), модифицированная карбамидоформальдегидная смола Фенотам Н210М ($26 \cdot 10^{-3}$ Па·с), карбамидомеламинаформальдегидная смола КМФ-С ($24 \cdot 10^{-3}$ Па·с) и фенолформальдегидная смола СФЖ-3024 ($104 \cdot 10^{-3}$ Па·с).

Влажность и влагопоглощение образцов смол Фенотам Н210, Фенотам Н210М, КМФ-С и СФЖ-3024, отвержденных при температурах 90 и 150 °С, испытывали согласно ГОСТ 17177–94. Наличие дефектов, адгезионные и структурные свойства экспериментальных образцов отвержденных смол исследовали методами оптической микроскопии в поляризованном свете и рентгеновской дифракции.

Результаты оптической микроскопии получены в проходящем свете со скрещенными под углом 90 градусов поляризаторами.

Дифрактограммы регистрировали на рентгеновском дифрактометре в монохроматизированном $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучении в геометрии Брэгга–Брентано. Дифрактограммы расшифровывали с помощью структурной базы данных PDF-2. Рентгеновскую съемку проводили в диапазоне углов $2\theta = 2\text{--}100$ градусов.

Зависимости краевого угла смачивания поверхности стекла от продолжительности исследования для жидких смол марок Фенотам Н210М и КМФ-С определяли при комнатной температуре методом лежащей капли.

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

Результаты и обсуждение

Наибольшее значение влажности (3,6 %) имеют образцы смолы СФЖ-3024, наименьшее (0,6 %) – Фенотам Н210М. Образцам отвержденных смол КМФ-С и Фенотам Н210 соответствует значение влажности 1,9 %.

Влагопоглощение экспериментальных образцов отвержденных смол при температуре 23 °С и относительной влажности воздуха 98 % в течение 24 и 72 ч представлено в таблице.

Влагопоглощение экспериментальных образцов смол при температуре 23 °С и относительной влажности воздуха 98 % в течение 24 и 72 ч

Смола	Среднее значение влагопоглощения, %	
	В течение 24 ч	В течение 72 ч
СФЖ-3024	15,7	36,4
КМФ-С	8,5	21,7
Фенотам Н210М	6,5	15,4
Фенотам Н210	21,1	40,5

Наименьшим влагопоглощением обладает смола Фенотам Н210М: 6,5 и 15,4 % при экспозиции образцов в течение 24 и 72 ч соответственно. Смола КМФ-С также характеризуется довольно низкими значениями данного показателя: 8,5 и 21,7 %. Наибольшим уровнем влагопоглощения обладают смолы марок СФЖ-3024 (15,7 и 36,4 %) и Фенотам Н210 (21,1 и 40,5 %).

Таким образом, наименьшие влажность и влагопоглощение зафиксированы для образцов отвержденной смолы марки Фенотам Н210М.

Образцы смол Фенотам Н210, Фенотам Н210М, КМФ-С и СФЖ-3024 после отверждения при температуре 90 °С в течение 6,5 ч исследованы методом оптической микроскопии в поляризованном свете с целью выявления дефектов и внутренних напряжений, а также для определения адгезионных и структурных свойств. Результаты представлены на рис. 1.

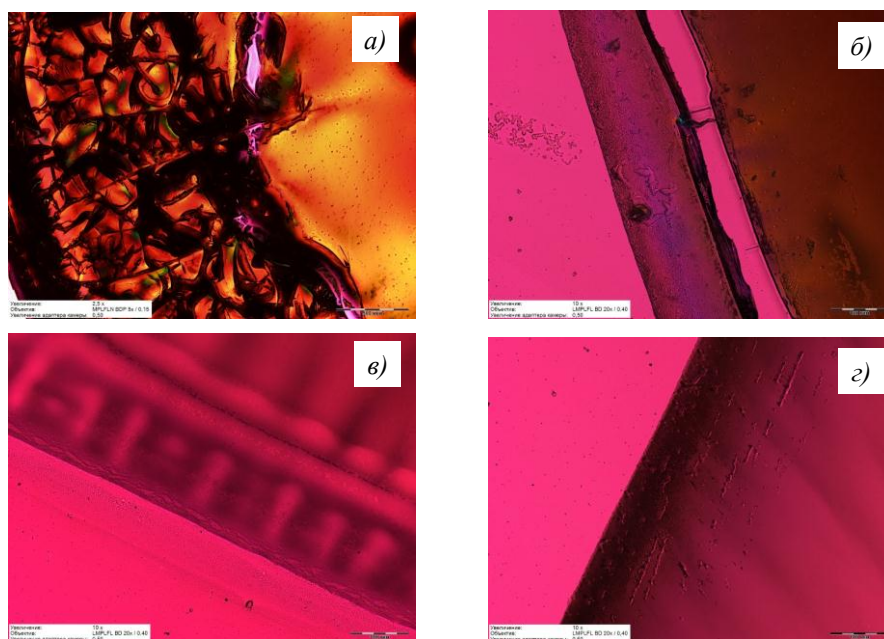


Рис. 1. Образцы смол СФЖ-3024 (а), Фенотам Н210 (б), Фенотам Н210М (в) и КМФ-С (з), отвержденные при температуре 90 °С в течение 6,5 ч

Смола СФЖ-3024 подвержена растрескиванию. Кроме того, окраска изображения подтверждает наличие в образце большого количества внутренних напряжений (рис. 1, а). Смола СФЖ-3024 обладает низкой адгезией к стеклу. На рис. 1, б можно наблюдать растрескивание смолы Фенотам Н210 на границе «смола–стекло», что свидетельствует о низких адгезии к стеклу и уровне механических свойств. Следует отметить, что в смоле Фенотам Н210 не зафиксировано внутренних напряжений, изображение не имеет разноцветной окраски. В смоле Фенотам Н210М (рис. 1, в) наблюдается однородная мелкозернистая структура. Смола КМФ-С (рис. 1, з) также обладает однородной структурой, но без мелкозернистых включений. В смолах Фенотам Н210 и КМФ-С растрескиваний не обнаружено. Смолы Фенотам Н210М и КМФ-С формируют более однородный слой на стекле и обладают лучшей адгезией. Внутренние напряжения в смолах Фенотам Н210М и КМФ-С отсутствуют.

Образцы смол Фенотам Н210, Фенотам Н210М, КМФ-С и СФЖ-3024, отвержденных при температуре 150 °С, также исследованы методом рентгеновской дифракции (рис. 2).

Анализ дифракционных спектров показал, что во всех образцах преобладает аморфная составляющая, однако у каждого образца есть особенности. Образец смолы Фенотам Н210М аморфный с относительно высоким и узким рефлексом (рис. 2, а), что может свидетельствовать о возникновении упорядоченной структуры. Образец смолы Фенотам Н210 является аморфным (рис. 2, б), на дифрактограмме присутствуют пики крайне низкой интенсивности. Можно сделать вывод, что в смоле марки Фенотам Н210 упорядоченные структуры практически не образуются. Образец смолы КМФ-С полностью аморфный (рис. 2, в). Образец смолы СФЖ-3024 аморфный с рядом рефлексов (рис. 2, г), также присутствует второе гало в районе ближних углов.

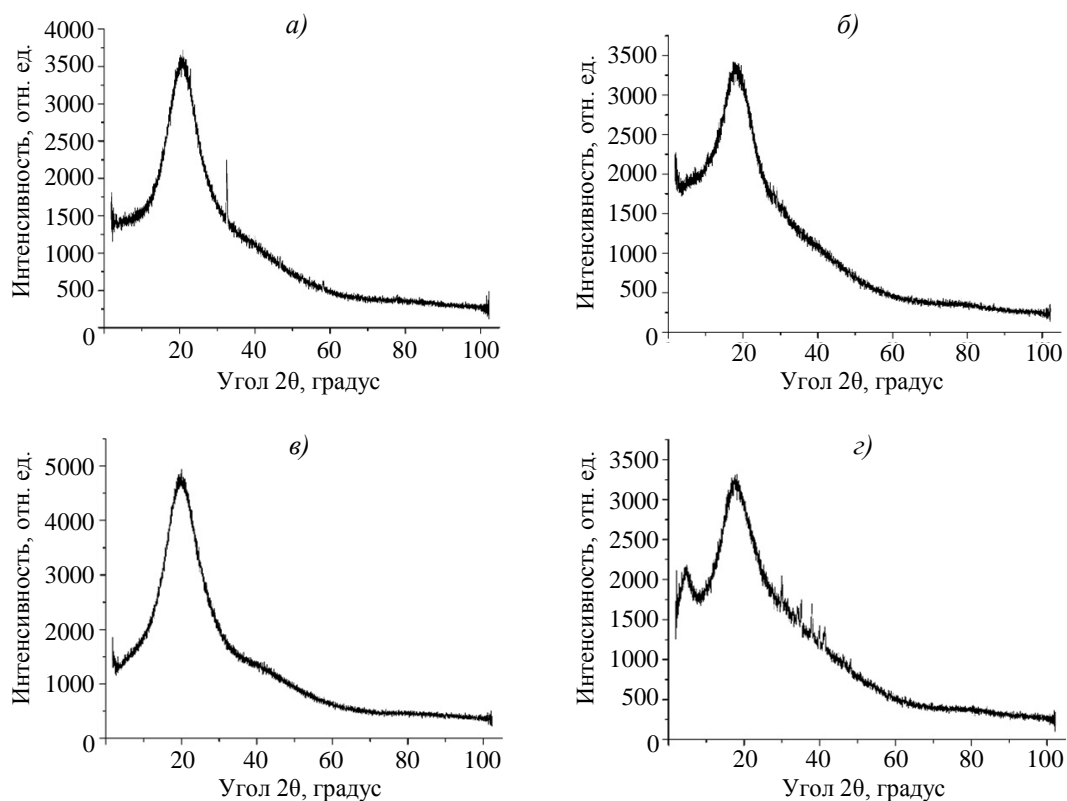


Рис. 2. Дифракционный спектр смол Фенотам Н210М (а), Фенотам Н210 (б), КМФ-С (в) и СФЖ-3024 (г), отвержденных при температуре 150 °С

Данные рентгеноструктурного анализа в совокупности с результатами оптической микроскопии подтверждают, что при отверждении смолы СФЖ-3024 происходит частичная кристаллизация, которая совместно с усадочными процессами приводит к появлению внутренних напряжений и растрескиванию смолы. В смоле Фенотам Н210М при отверждении образуются мелкие зерна кристаллической фазы, которые равномерно распределены в аморфной матрице [16], что с высокой вероятностью может привести к улучшению механических свойств. Согласно результатам оптической микроскопии, в смолах КМФ-С и Фенотам Н210 не наблюдается анизотропии, что также подтверждается наличием только аморфной фазы на дифрактограммах.

Получены зависимости краевого угла смачивания поверхности стекла жидкими смолами Фенотам Н210М и КМФ-С от продолжительности смачивания (рис. 3).

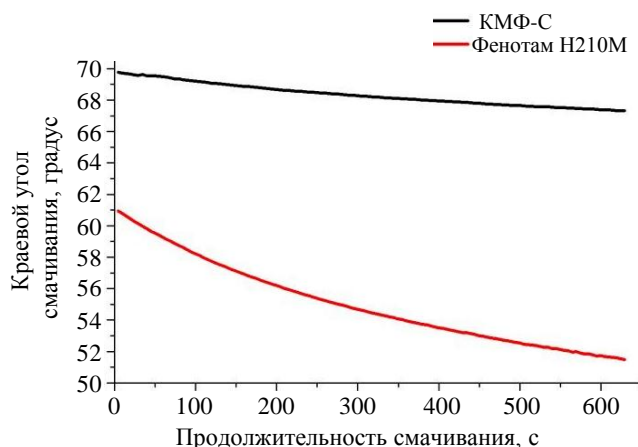


Рис. 3. Зависимости краевого угла смачивания поверхности стекла от продолжительности исследований для образцов жидких смол марок Фенотам Н210М и КМФ-С

В течение 10,5 мин значения краевого угла смачивания поверхности стекла смолой марки КМФ-С уменьшаются с 70 до 67 градусов, а смолой марки Фенотам Н210М – с 61 до 51,5 градуса. Полученные результаты свидетельствуют о лучшей адгезии смолы Фенотам Н210М к стеклу по сравнению со смолой КМФ-С. Смола Фенотам Н210М растекается по поверхности стекла лучше, чем смола КМФ-С.

Заключения

Определены влажность и влагопоглощение отвержденных смол Фенотам Н210, Фенотам Н210М, КМФ-С и СФЖ-3024. Наибольшее значение влажности (3,6 %) имеют образцы смолы СФЖ-3024, наименьшее (0,6 %) – Фенотам Н210М. Наименьшим влагопоглощением характеризуется смола Фенотам Н210М (6,5 и 15,4 % при экспозиции образцов в течение 24 ч и 72 ч соответственно), наибольшим – Фенотам Н210 (21,1 и 40,5 %).

Согласно результатам оптической микроскопии и рентгеноструктурного анализа, смола СФЖ-3024 при отверждении частично кристаллизуется, что в совокупности с усадочными процессами приводит к появлению внутренних напряжений и растрескиванию. В смоле Фенотам Н210М образуются мелкие зерна кристаллической фазы, равномерно распределенные в аморфной матрице. С большой вероятностью это будет способствовать улучшению механических свойств отвержденной смолы. В смолах КМФ-С и Фенотам Н210 анизотропии не наблюдается. Смола Фенотам Н210М обладает лучшей адгезией к стеклу, чем смолы КМФ-С, Фенотам Н210 и СФЖ-3024.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада // Авиационные материалы и технологии. 2013. № S1. С. 3–9.
3. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. № 3. С. 8–13.
4. Истомин А.В., Беспалов А.С., Бабашов В.Г. Придание повышенной огнестойкости теплозвукоизоляционному материалу на основе смеси неорганических и растительных волокон // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 4 (53). С. 74–78. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-74-78.

5. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Терморепреактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
6. Каблов Е.Н., Шульдешов Е.М., Петрова А.П., Лаптева М.А., Сорокин А.Е. Зависимость комплекса свойств звукопоглощающего материала типа ВЗМК от концентрации гидрофобизирующего состава на основе кремнийорганического герметика // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 41–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-41-49.
7. Кан А.Ч., Железина Г.Ф., Кулагина Г.С., Аюпов Т.Р. Пожаробезопасность конструкционных органопластиков, армированных арамидными тканями // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 4 (69). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.02.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-51-60.
8. Застрогина О.Б., Швец Н.И., Серкова Е.А., Вешкин Е.А. Пожаробезопасные материалы на основе фенолформальдегидных связующих // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2017. № 7. С. 22–27.
9. Knopf A., Sheib W. *Chemistry and applications of phenolic resins*. New York: Springer-Verlag, 1979. 32 p.
10. Pizzi A., Ibeh C.C. *Handbook of Thermoset Plastics*. Elsevier, 2014. 13 p. DOI: 10.1016/B978-1-4557-3107-7.00002-6.
11. Liu H., Zhai D.D., Wang M. et al. Design of urea-modified phenol-formaldehyde as well as the derived N-carbon nanosheets for supercapacitors with elevated rate capability and cycling stability // *ChemElectroChem*. 2019. P. 12. DOI: 10.1002/celec.201801855.
12. Solomon M.M., Umoren S.A., Udoso I.I., Udoh A.P. Inhibitive and adsorption behaviour of carboxymethyl cellulose on mild steel corrosion in sulphuric acid solution // *Corrosion Science*. 2010. Vol. 52. P. 1317–1325.
13. Shukla S.K., Quraishi M.A. Effect of some substituted anilines-formaldehyde polymers on mild steel corrosion in hydrochloric acid medium // *Journal Applied Polymer Science*. 2012. Vol. 12. P. 45130–45137.
14. Chugh B., Thakur S., Pani B. et al. Investigation of phenol-formaldehyde resins as corrosion impeding agent in acid solution // *Journal of Molecular Liquids*. 2021. Vol. 330. Art. 115649.
15. Si Y., Li J., Cui B. et al. Janus phenol-formaldehyde resin and periodic mesoporous organic silica nanoadsorbent for the removal of heavy metal ions and organic dyes from polluted water // *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2022. Vol. 5. P. 1180–1195.
16. Wibowo E.S., Park B.-D., Causin V. Hydrogen-Bond-Induced Crystallization in Low-Molar-Ratio Urea-Formaldehyde Resins during Synthesis // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2020. Vol. 59. P. 13095–13104.

References

1. 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». *Авиационные материалы и технологии*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N. Materials for «Buran» spaceship – innovative solutions of formation of the sixth technological mode. *Авиационные материалы и технологии*, 2013, no. S1, pp. 3–9.
3. Kablov E.N. Russia needs new generation materials. *Redkie zemli*, 2014, no. 3, pp. 8–13.
4. Istomin A.V., Bepalov A.S., Babashov V.G. Adding increased resistance to heat and sound insulation of material based on mixture of inorganic and plant fibers. *Авиационные материалы и технологии*, 2018, no. 4 (53), pp. 74–78. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-74-78.
5. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Авиационные материалы и технологии*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
6. Kablov E.N., Shuldeshov E.M., Petrova A.P., Lapteva M.A., Sorokin A.E. Dependence of complex of sound-proof VZMK type material properties on concentration of hydrophobizing composition on the basis of organosilicon sealant. *Авиационные материалы и технологии*, 2020, no. 2 (59), pp. 41–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-41-49.

7. Kan A.Ch., Zhelezina G.F., Kulagina G.S., Ayupov T.R. Fire safety of structural organic plastics reinforced with aramid fabrics. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 17, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-51-60.
8. Zastrogina O.B., Shvets N.I., Serkova E.A., Veshkin E.A. Fireproof materials based on phenol-formaldehyde binders. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2017, no. 7, pp. 22–27.
9. Knopf A., Sheib W. *Chemistry and applications of phenolic resins*. New York: Springer-Verlag, 1979, 32 p.
10. Pizzi A., Ibeh C.C. *Handbook of Thermoset Plastics*. Elsevier, 2014, 13 p. DOI: 10.1016/B978-1-4557-3107-7.00002-6.
11. Liu H., Zhai D.D., Wang M. et al. Design of urea-modified phenol-formaldehyde as well as the derived N-carbon nanosheets for supercapacitors with elevated rate capability and cycling stability. *ChemElectroChem*, 2019, p. 12. DOI: 10.1002/celec.201801855.
12. Solomon M.M., Umoren S.A., Udoso I.I., Udoh A.P. Inhibitive and adsorption behaviour of carboxymethyl cellulose on mild steel corrosion in sulphuric acid solution. *Corrosion Science*, 2010, vol. 52, pp. 1317–1325.
13. Shukla S.K., Quraishi M.A. Effect of some substituted anilines-formaldehyde polymers on mild steel corrosion in hydrochloric acid medium. *Journal Applied Polymer Science*, 2012, vol. 12, pp. 45130–45137.
14. Chugh B., Thakur S., Pani B. et al. Investigation of phenol-formaldehyde resins as corrosion impeding agent in acid solution. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, vol. 330, art. 115649.
15. Si Y., Li J., Cui B. et al. Janus phenol-formaldehyde resin and periodic mesoporous organic silica nano-adsorbent for the removal of heavy metal ions and organic dyes from polluted water. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2022, vol. 5, pp. 1180–1195.
16. Wibowo E.S., Park B.-D., Causin V. Hydrogen-Bond-Induced Crystallization in Low-Molar-Ratio Urea-Formaldehyde Resins during Synthesis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, vol. 59, pp. 13095–13104.

Информация об авторах

Салимов Илья Эркинович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Беспалов Александр Сергеевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бабашов Владимир Георгиевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Максимов Вячеслав Геннадьевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ilya E. Salimov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksander S. Bepalov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vladimir G. Babashov, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vyacheslav G. Maksimov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 14.07.2023; получена после доработки 07.12.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 07.12.2023.
The article was submitted 14.07.2023; received in revised form 07.12.2023; approved and accepted for publication after reviewing 07.12.2023.