
Научная статья

УДК 678.8:532.135

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-3-11

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВИЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОНТРОЛЯ И РЕЖИМОВ ОТВЕРЖДЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПОЛИМЕРНЫХ СВЯЗУЮЩИХ

М.А. Гусева¹

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

Аннотация. С точки зрения реологии состав полимерного связующего на этапе разработки основывается на выборе вязкости при различных температурах и продолжительности термического воздействия. Для определения вязкости полимерного связующего в основном используют реологические методы испытаний, которые реализуются с применением реологического оборудования различных марок и с разной конфигурацией измерительных систем. Показаны практическое использование реологического оборудования различных марок при контрольном анализе, возможности ротационной и осцилляционной реометрии для определения режимов отверждения связующего в препрегах.

Ключевые слова: реология, производственный контроль, отверждение, разработка, связующие, полимерные композиционные материалы

Для цитирования: Гусева М.А. Практическое использование реологического метода для определения условий производственного контроля и режимов отверждения при разработке полимерных связующих // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-3-11.

Scientific article

PRACTICAL USE OF THE RHEOLOGICAL METHOD IN DETERMINING THE CONDITIONS OF PRODUCTION CONTROL AND CURING MODES IN THE DEVELOPMENT OF POLYMER BINDERS

М.А. Guseva¹

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 the development stage, the composition of a polymer binder from the rheological point of view is based on the choice of viscosity at different temperatures and the duration of exposure to temperature. The main methods to determine the viscosity value of a polymer binder are rheological testing methods, implemented using rheological equipment of various brands, and measuring systems of different configurations. The study shows practical use of rheological equipment of various brands in control analysis, possibilities of rotational and oscillatory rheometry for determining binder curing modes in prepregs.

Keyword: rheology, production control, curing, development, binding, polymeric composite materials

For citation: Guseva M.A. Practical use of the rheological method in determining the conditions of production control and curing modes in the development of polymer binders. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-3-11.

Введение

На этапе разработки полимерного связующего важным фактором является реологическое поведение, к которому предъявляют определенные требования. В частности, оценивают значения динамической и комплексной вязкости, которые можно использовать при моделировании поведения полимерных композиционных материалов (ПКМ) при рабочих режимах на этапе разработки. Большое количество свойств полимерных материалов в готовых изделиях зависит от условий переработки – внешний вид, механические и эксплуатационные характеристики и др. С реологической точки зрения оптимизация состава полимерного связующего основывается на выборе значения вязкости при различных температурах и продолжительности термического воздействия для определенной технологии переработки, которая накладывает ограничения на реологические параметры, определяя технологичность материала. Такие испытания позволяют выбрать оптимальные параметры изготовления ПКМ [1–5].

Основным методом определения вязкости полимерного связующего является ротационная вискозиметрия. Данный метод реализуется главным образом на вискозиметрах Брукфильда различных марок и с разной конфигурацией измерительных систем, наиболее распространенных в лабораториях, где занимаются разработкой полимерных связующих, либо на аналогичных приборах других марок. В ротационных приборах измерительный шпиндель приводится в движение двигателем через пружину, степень деформации пружины (угол поворота) измеряется датчиком и выводится на дисплей. При определении вязкости гидравлическое сопротивление испытываемой жидкости пропорционально скорости вращения шпинделя и зависит от его диаметра. Диапазон измерения вязкости достигается за счет многоскоростной трансмиссии и взаимозаменяемых шпинделей.

В отличие от стандартных ротационных вискозиметров, реометры имеют более сложную конструкцию и позволяют решать более широкий круг задач. Их устройство позволяет работать не только с полимерными жидкостями с низкой вязкостью, но и с материалами с высокой твердостью, а также изменять условия испытаний в широком диапазоне, варьируя скорость сдвига, температуру, режим эксперимента (ротационный или осцилляционный), конфигурацию измерительных систем.

По сравнению с ротационным режимом осцилляционный применяется реже, однако позволяет расширить возможности реологических испытаний, оценить не только время гелеобразования, деформационные процессы, но и диапазоны температур размягчения и плавления твердых полимерных соединений при входном анализе исходных компонентов. В данном режиме измерительная система совершает не вращательные вокруг своей оси, а колебательные движения с заданной частотой и амплитудой. Измерения в этом режиме дают информацию о реологических характеристиках образца благодаря возможности выделить упругую (модуль накоплений) и вязкую (модуль потерь) составляющие.

Для анализа влияния реологических характеристик полимера на режим его переработки проводят исследования в сканирующем (динамическом) режиме. В изотермическом режиме определяют жизнеспособность, время отверждения или разрушения образца при высоких температурах. Время гелеобразования позволяет оценить срок годности связующего, длительность сохранения технологических и физико-механических характеристик [6–10].

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

Материалы и методы

В качестве экспериментальных образцов использовали эпоксидное связующее, разработанное в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ для препреговой технологии получения. Реологические испытания образцов проводили на ротационном вискозиметре с условным обозначением Пр1 по ГОСТ 25276–82 «Полимеры. Метод определения вязкости ротационным вискозиметром при определенной скорости сдвига» и на реометре с условным обозначением Пр2 по ГОСТ Р 57950–2017 «Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении».

Результаты и обсуждение

На этапе разработки, когда определен основной компонентный состав полимерного связующего, проводятся статистические эксперименты для внесения итоговых результатов в разрабатываемую научно-техническую документацию. Оцениваются в том числе значения вязкости при различных температурах испытаний для выбора условий проведения выходного контроля на производстве. Испытания осуществляются либо в широком диапазоне сдвиговых характеристик, либо с применением различных измерительных конфигураций используемого реологического оборудования.

В данной работе подобные испытания проводили на ротационном вискозиметре Пр1 с конфигурацией «конус/плита» и реометре Пр2 с конфигурацией «плита/плита». Основными отличиями этих двух приборов являются не только конфигурации измерительных систем, но и способ поддержания температуры испытаний в течение заданного времени. Кроме того, вискозиметр Пр1 предназначен для работы с высоковязкими полимерными связующими, и даже при начальных настройках минимальное значение скорости сдвига составляет 50–60 с⁻¹. В отличие от вискозиметра, реометр Пр2 снабжен плотными дверцами и автоматической системой для однородного прогрева образца по всему объему, а технические возможности позволяют реометру работать в широком диапазоне скоростей сдвига (от 0,01 до 1000 с⁻¹) [1, 11–14].

Предварительные эксперименты проводили на вискозиметре Пр1 для установления рабочего диапазона скоростей сдвига и выбора измерительного шпинделя из имеющихся в комплекте к прибору. Для определения условий выходного анализа исследуемого эпоксидного связующего осуществляли изотермическую выдержку пробы в контрольной точке 110 °С в течение 15 мин со скоростью вращения шпинделя 5 мин⁻¹. Данную температуру выбрали экспериментальным путем, опираясь на внешний вид отвержденных образцов и результаты испытаний термического анализа неотвержденного связующего. При сравнении полученных значений вязкости неньютоновских жидкостей необходимо использовать одно и то же сочетание скорости вращения и вида шпинделя при всех измерениях, даже если точность одного из них при этом заметно снижается, хотя рекомендуемое значение крутящего момента должно находиться в пределах от 10 до 90 %. Результаты проведенных испытаний приведены в таблице. На основании этих данных выбрана контрольная точка в диапазоне значений вязкости от 2 до 5 Па·с при скорости сдвига 80 с⁻¹.

Результаты определения вязкости образца экспериментального эпоксидного связующего на вискозиметре Пр1 при различной скорости сдвига

Скорость сдвига, с ⁻¹	Вязкость, Па·с	Крутящий момент, %
52	4,0–4,2	5–7
82	2,9–3,1	11–12
108	2,7–3,3	23–24

Затем проводили сравнительные динамические испытания на реометре Пр2 для определения более точных значений технологических параметров для внесения в научно-техническую документацию. На рис. 1 представлены реологические кривые образца эпоксидного связующего, полученного в сканирующем режиме испытаний в диапазоне температур 50–150 °С с постоянной скоростью нагрева 2 °С/мин и со скоростями сдвига 80 и 0,2 с⁻¹. Установлено, что значение скорости сдвига значительно влияет на поведение связующего, особенно при температурах 100–120 °С, а значения вязкости в контрольной точке отличаются в 2 раза.

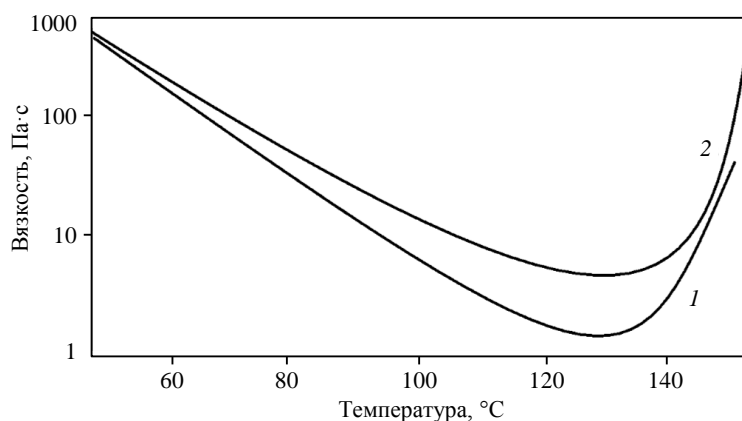


Рис. 1. Реологические зависимости в динамическом режиме испытаний образца эпоксидного связующего при скорости сдвига 80 (1) и 0,2 с⁻¹ (2)

Аналогичное влияние деформации на разницу значений вязкости наблюдали при изотермической выдержке при температуре ниже контрольной (рис. 2). При малом значении скорости сдвига 0,2 с⁻¹, в отличие от высокого уровня 80 с⁻¹, полимерному связующему как многокомпонентной системе достаточно времени для достижения равновесного состояния. С технологической точки зрения можно предположить, что сдвиг ассоциируется с физическим воздействием на связующее при выбранном методе переработки, а значит, можно оценить влияние деформации и приложенной нагрузки на условия, при которых происходит превращение полимерной композиции в конечный материал [13–15].

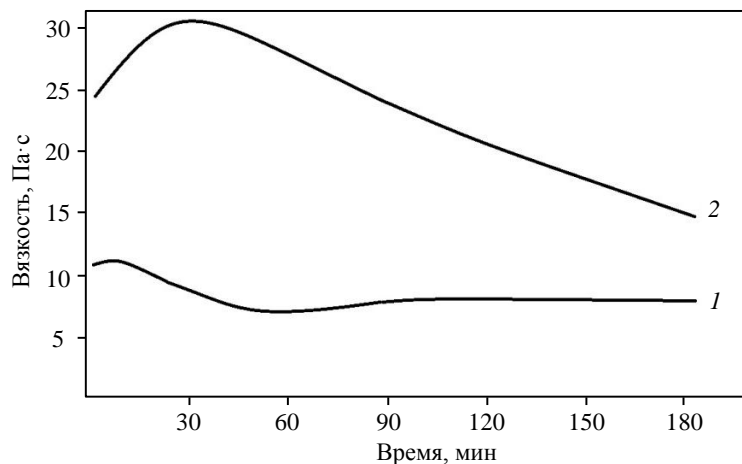


Рис. 2. Реологические зависимости в изотермическом режиме испытаний образца эпоксидного связующего при температуре 80 °С и скорости сдвига 80 (1) и 0,2 с⁻¹ (2)

На основе полученных данных предположили, что в процессе разработки экспериментального состава реологические испытания можно проводить на реологическом оборудовании различных марок, при этом общим параметром будет значение скорости сдвига как константы реологического поведения полимера. Такой подход позволит нивелировать влияние деформации, действующей на образец при испытаниях, и использования различных конфигураций измерительных систем.

Следующий шаг исследований полимерной композиции – выбор режима отверждения. Поскольку в основном переработка полимеров в ПКМ происходит при термическом воздействии, реологические зависимости вязкости от температуры позволяют понять поведение разрабатываемой композиции в таких условиях. На рис. 3 схематично показан вид реологических кривых с чередующимися этапами динамического и изотермического нагрева (при температурах T_1 и T_2). Такой подход позволяет оценить поведение связующего в процессе отверждения, подобрать температуры и длительность ступенчатого нагрева для достижения максимальной конверсии [12, 13].

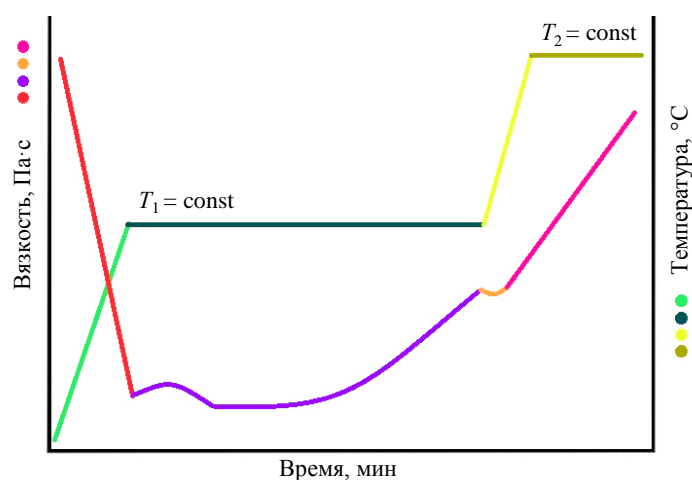


Рис. 3. Схематическое изображение реологических кривых при выборе условий режима отверждения

При получении препрега на начальной стадии технологического процесса полимерное связующее может подвергаться воздействию температуры в диапазоне от 40 до 100 °С. Поэтому для проведения дальнейших исследований осуществляли термообработку экспериментальных составов по режиму: 2 ч при 40 °С, 30 мин при 70 °С, 10 мин при 100 °С. Как показали результаты определения вязкости, подобная пробоподготовка не оказала влияния на свойства полимерного связующего. На основании результатов дифференциальной сканирующей калориметрии и рекомендаций разработчика исследуемого эпоксидного связующего проведены испытания при пяти режимах отверждения. На рис. 4 представлены зависимости комплексной вязкости и тангенса угла механических потерь от времени для каждого из выбранных режимов 1–5.

Упругая составляющая G' (модуль накоплений) характеризует энергию деформации и отражает поведение исследуемой системы как твердого тела. Вязкая составляющая G'' (модуль потерь) определяет диссипацию энергии, т. е. сопротивление деформированию, характеризуя поведение системы как жидкости. Отношение этих модулей – тангенс угла механических потерь $\tan\delta$. В настоящее время определение температурных зависимостей этих параметров стало наиболее практичным методом исследования поведения полимерных систем в процессе отверждения. Как показано в работах [7, 13, 14], кривая температурной зависимости тангенса угла механических потерь позволяет фиксировать

физические и релаксационные процессы, характеризующиеся появлением максимумов на реологических кривых. Температурный интервал, при котором наблюдаются характерные пики, соответствует переходам полимеров в различные фазовые состояния и хорошо коррелирует с данными, полученными другими термомеханическими методами.

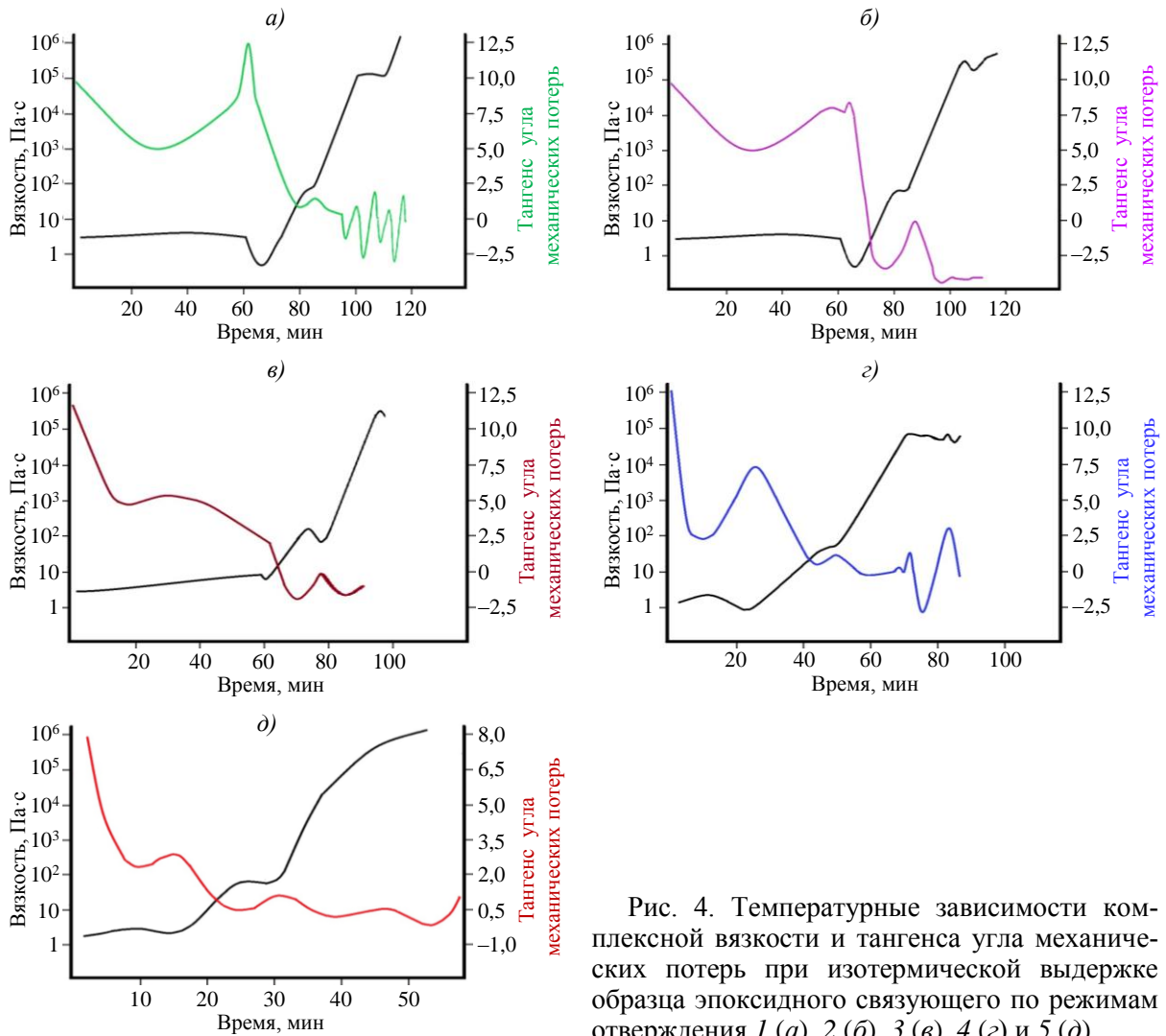


Рис. 4. Температурные зависимости комплексной вязкости и тангенса угла механических потерь при изотермической выдержке образца эпоксидного связующего по режимам отверждения 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г) и 5 (д)

Для режимов отверждения 1–3 (рис. 4, а–в) значение комплексной вязкости в течение 40–60 мин от начала испытаний находится в диапазоне 2–8 Па·с. При этом если для режимов 1 и 2 кривые тангенса угла механических потерь имеют схожий вид, указывающий на происходящие процессы с выделением тепла через 50 мин от начала выдержки (значение вязкости остается в диапазоне 4–6 Па·с), то по режиму 3 изменение внутренней структуры связующего начинается уже через 30 мин (вязкость начинает возрастать с 3 до 10 Па·с).

Для режима 4 (рис. 4, г) на первой стадии отверждения тангенс угла механических потерь на зависимости от времени имеет более выраженный максимум, который соответствует времени 30 мин от начала испытаний. Значение вязкости в диапазоне времени 30–60 мин увеличивается в 5–7 раз, что указывает на протекание реакции

отверждения. Можно предположить, что при этой температуре происходят процессы перестройки внутренней структуры связующего, аналогичные процессам при режиме 3, только с большей скоростью.

Для режима 5 (рис. 4, д) в первые 10 мин вязкость находится на уровне 2–5 Па·с, однако уже через 15 мин от начала испытаний показатель увеличивается, а через 23–25 мин – резко возрастает, что свидетельствует о протекании процесса отверждения связующего с высокой скоростью. Через 50 мин кривая вязкости практически выравнивается – связующее отверждено. Пики на кривой тангенса угла механических потерь указывают, в какой момент происходят процесс сшивки, сопровождающийся максимальными тепловыми эффектами и, вероятно, завершение перестройки макромолекул полимерной композиции внутри системы.

Кроме того, при сравнении временных зависимостей для режимов отверждения 4 и 5 (рис. 5) видно, что профили кривых вязкости практически совпадают, а кривые тангенса угла механических потерь имеют одновременные максимумы, но с различной интенсивностью, т. е. в этот момент происходят аналогичные процессы, но с разными тепловыми выделениями и, соответственно, с разными скоростями.

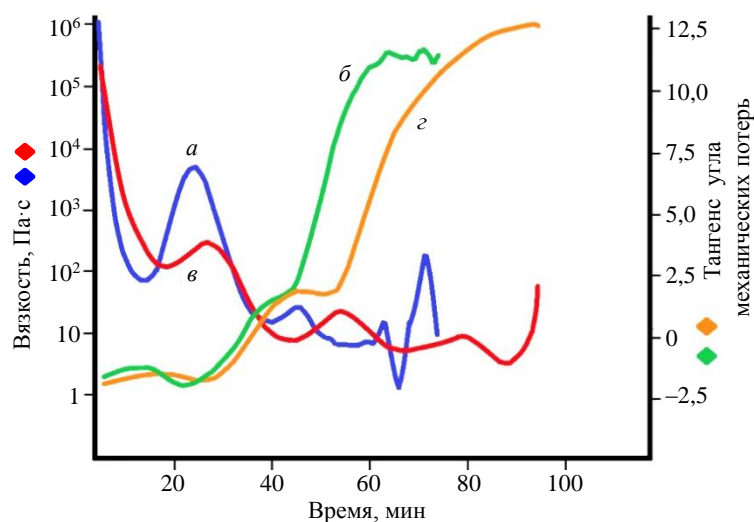


Рис. 5. Температурные зависимости комплексной вязкости и тангенса угла механических потерь при изотермической выдержке образца эпоксидного связующего по режимам отверждения 4 (а, б) и 5 (в, г)

Заключения

Представленная последовательность проведения реологических испытаний описывает порядок определения условий выходного контроля разрабатываемого связующего. Сравнительный анализ реологических кривых при изотермической выдержке при температурах технологического процесса позволяет оценить поведение разрабатываемого связующего при термообработке и провести корректировку технологических режимов отверждения.

На основании результатов проведенных экспериментов технологам даны практические рекомендации по выбору режима получения препрегов на основе разрабатываемого эпоксидного связующего.

Список источников

1. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов: учеб. пособие / под ред. Е.Н. Каблова. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. 528 с.

2. Северс Э.Т. Реология полимеров. М.: Химия, 1966. 200 с.
3. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии. М.: КолосС, 2003. 312 с.
4. Гусева М.А., Петрова А.П. Возможности реологии при исследовании связующих для ПКМ // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2021. № 7. С. 38–45.
5. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
6. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 28.03.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
7. Гусева М.А., Прокопова Л.А., Хасков М.А. Определение температур плавления твердых полимеров реологическим методом // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 7. С. 38–43.
8. Ткачук А.И., Кузнецова П.А., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю. Некоторые технологические особенности изготовления полимерных композиционных материалов безавтоклавным формованием препрегов // Труды ВИАМ. 2024. № 12 (142). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-44-55.
9. Галыгин В.Е., Баронин Г.С., Таров В.П., Завражин Д.О. Современные технологии получения и переработки полимерных и композиционных материалов: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2012. 180 с.
10. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Мельников А.А., Павленко С.А., Гусева М.А., Пыхтин А.А., Ларионов С.А. Исследование влияния теплового режима FDM-печати на структурирование и коробление образцов полиэтилена // Труды ВИАМ. 2021. № 7 (101). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-48-58.
11. Морозова В.С., Иванов М.С., Шестаков А.М., Павлюкович Н.Г. Влияние текучести расплава полиэфирэфиркетона на характеристики углепластика на его основе // Труды ВИАМ. 2024. № 1 (131). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-44-51.
12. Кузнецова П.А., Ткачук А.И., Любимова А.С., Эльдяева Г.Б. Характеристики расплавленного эпоксидного связующего ВСЭ-62 для изготовления высоконагруженных деталей конструкционного значения инъекционными методами // Труды ВИАМ. 2023. № 5 (123). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-43-53.
13. Гусева М.А., Ибрагимов З.Д. Выбор отверждающей системы при разработке эпоксидных композиций с энергоэффективным режимом отверждения // Труды ВИАМ. 2024. № 3 (133). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-52-62.
14. Гусева М.А. Применение методов реологии в разработке полимерных связующих и производственном контроле // Сб. мат. XXXI Симпозиума по реологии. М.: ИНХС РАН, 2024. С. 87.
15. Гусева М.А. Реологический подход при разработке полимерных связующих для ПКМ // Сб. тр. VIII Всерос. науч.-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения». М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2024. С. 173.

References

1. Mukhametov R.R., Petrova A.P. *Thermosetting binders for polymer composite materials: textbook. Manual*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2021, 528 p.
2. Severs E.T. *Rheology of polymers*. Moscow: Khimiya, 1966, 200 p.
3. Schramm G. *Fundamentals of practical rheology and rheometry*. Moscow: KolosS, 2003, 312 p.

4. Guseva M.A., Petrova A.P. Possibilities of rheology in the study of binders for PCM. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2021, no. 7, pp. 38–45.
5. Kablov E.N., Antipov V.V. The Role of New Generation Materials in Ensuring the Technological Sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
6. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 28, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
7. Guseva M.A., Prokopova L.A., Khaskov M.A. Determination of melting temperatures of solid polymers by the rheological method. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2021, vol. 87, no. 7, pp. 38–43.
8. Tkachyk A.I., Kyznecova P.A., Donetskiy K.I., Karavaev R.Yu. Some technological features of manufacturing polymer composite materials by non-autoclave molding of prepregs. *Trudy VIAM*, 2024, no. 12 (142), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 28, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-44-55.
9. Galygin V.E., Baronin G.S., Tarov V.P., Zavrazhin D.O. *Modern technologies for the production and processing of polymer and composite materials: textbook*. Tambov: Publ. House of TSTU, 2012, 180 p.
10. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Melnikov A.A., Pavlenko S.A., Guseva M.A., Pykhtin A.A., Larionov S.A. Investigation of the influence of the thermal regime of FDM printing on the structuring and warping of polyethylene samples. *Trudy VIAM*, 2021, no. 7 (101), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 28, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-48-58.
11. Morozova V.S., Ivanov M.S., Shestakov A.M., Pavlukovich N.G. The influence of the melt flow of polyetheretherketone on the characteristics of carbon fiber plastic based on it. *Trudy VIAM*, 2024, no. 1 (131), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 28, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-44-51.
12. Kuznetcova P.A., Tkachuk A.I., Lyubimova A.S., Eldjaeva G.B. Characteristics of the molten epoxy resin system VSE-62, processed by the injection methods, for the manufacture of highly loaded structural polymer composite materials. *Trudy VIAM*, 2023, no. 5 (123), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 28, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-43-53.
13. Guseva M.A., Ibragimov Z.D. Selection of curing system when developing epoxy compositions with energy-efficient curing mode. *Trudy VIAM*, 2024, no. 3 (133), paper no. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 28, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-52-62.
14. Guseva M.A. Application of Rheological Methods in the Development of Polymer Binders and Industrial Control. *Reports of the XXXI Symposium on Rheology*. Moscow: TIPS RAS, 2024, p. 87.
15. Guseva M.A. Rheological Approach to the Development of Polymer Binders for Polymeric Composites. *Reports of the VIII All-Rus. Sci. and Tech. Conf. «Polymer Composite Materials and New Generation Production Technologies»*. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2024, p. 173.

Информация об авторах

Гусева Марина Александровна, старший научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Marina A. Guseva, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 22.04.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 29.04.2025.
The article was submitted 22.04.2025; approved and accepted for publication after reviewing 29.04.2025.