

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 620.22:620.17

Реологические аспекты термопрессования изделий из консолидированных пластин на основе терморезактивных связующих*

Г.М. Габдрахманова, О.Л. Хамидуллин, К.А. Андрианова, Л.М. Амирова

КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ

Rheological aspects in thermo-pressing the products made of consolidated plates based on the thermosetting binders

G.M. Gabdrakhmanova, O.L. Khamidullin, K.A. Andrianova, L.M. Amirova

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev

Термопрессование из консолидированных пластин относится к перспективным технологическим процессам изготовления изделий из полимерных композиционных материалов. Горячее прессование позволяет автоматизировать получение композитных изделий небольшого размера, что особенно актуально для крупносерийного производства. Рассмотрена технология горячего прессования консолидированных пластин на основе углеродной ткани и порошковых связующих. Оптимизация технологических режимов термопрессования проведена на основании обеспечения вязкости связующего в интервале 75...350 Па·с. Приведены возможные пути регулирования вязкости порошковых терморезактивных связующих, наполненных дисперсным наполнителем и модифицированных термопластом. Регулирование вязкости ненаполненных терморезактивных порошковых связующих выполнено на основе реокинетических исследований на примере эпоксидно-бензоксазиновых композиций. Предложены составы порошковых связующих для получения композиционных материалов с гомогенным и функционально-градиентным составом матрицы по сечению изделия. Проанализированы основные проблемы прессования консолидированных пластин с градиентом состава связующего, предложены пути их решения.

EDN: EZUSWQ, <https://elibrary/ezuswq>

Ключевые слова: консолидированные пластины, терморезактивные порошковые связующие, термопрессование пластин, функционально-градиентный углепластик, реологические свойства

Thermo-pressing the consolidated plates appears to be one of the promising technological processes in manufacture of products from the polymer composite materials. Hot pressing

* Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-23-00133, <https://rscf.ru/project/23-23-00133/>.

makes it possible to automate production of the small-sized composite products, which is especially important in the large-scale production. The paper considers the hot pressing technology of the consolidated plates based on the carbon fabric and powder binders. The thermo-pressing technological modes are optimized based on ensuring the binder viscosity in the range of 75...350 Pa·s. The paper provides possible approaches to regulating viscosity of the thermosetting powder binders filled with a dispersed filler and modified with the thermoplastic. Viscosity of the unfilled thermosetting powder binders is regulated using the rheokinetic studies on the example of the epoxy-benzoxazine compositions. The paper proposes the powder binder compositions to obtain composite materials with the matrix homogeneous and functionally gradient composition over the product cross-section. It analyzes main problems in pressing the consolidated plates with the binder composition gradient and proposes approaches to their solution.

EDN: EZUSWQ, <https://elibrary/ezuswq>

Keywords: consolidated plates, thermosetting powder binders, plate thermo-pressing, functionally gradient carbon fiber, rheological properties

Производство изделий из полимерных композиционных материалов требует развития автоматизации технологического процесса [1]. Роботизированная укладка препрегов на криволинейные поверхности, особенно небольшого размера, является задачей сложной и не позволяет достичь требуемого качества изделия [2]. Штамповку изделий небольшого размера из плоских консолидированных пластин (КП) на основе препрегов — термопластичных и терморезактивных полимеров — легко автоматизировать, что обеспечивает получение высококачественных деталей сложной геометрической формы [3].

Значительное количество публикаций посвящено разработке, оптимизации и моделированию режимов формования КП на основе термопластичных полимеров [4–9]. Это связано с тем, что для них неприменима большая часть технологий изготовления изделий из полимерных композиционных материалов (таких как RTM и инфузия).

Термопрессование КП из терморезактивных полимеров позволяет автоматизировать массовое производство, сократить время и повысить гибкость производственного процесса, однако публикаций по этой теме крайне мало. Так, в работах [10–12] предложен процесс формования листов из отвержденного углепластика, где КП из углепластика зажата между фиксирующими металлическими листами во время штамповки. С помощью четырех параметров формуемости углепластика (способности к изгибу, глубокой вытяжке, растяжению, растягиванию и отбортовке) показан ее диапазон.

В публикациях [13, 14] установлено, что прессование отвержденных листов углепластика со-

провождается небольшой пластической деформацией, требует высоких температур и может проводиться для ограниченного круга полимерных матриц с невысокой плотностью сетки.

Прессование слоистых полимерных композиционных материалов на основе препрегов с точки зрения трех основных технологических параметров — температуры, давления и времени — рассмотрено в статье [15]. Отмечена важность вязкости связующего в препреге для обеспечения качества изделия.

Экспериментально исследована возможность быстрого формования многослойных UD-препрегов с помощью прессования под высоким давлением [16]. Обнаружено, что формование под высоким давлением в сочетании с повышенной температурой приводит к образованию складок, вызванных сжатием, течением и истончением радиуса закруглений в изделии. Во время прессования при комнатной температуре утонение радиусов практически исчезло. Вместо них появились морщины в местах изгиба.

Для получения препрегов можно использовать терморезактивные связующие на основе твердых смол, востребованность которых возрастает в последние годы [17]. Среди терморезактивных полимеров есть такие перспективные в плане эксплуатационных свойств, как бензоксазины, цианэфиры и их композиции с твердыми эпоксидными смолами. Однако даже при повышенной температуре они имеют высокую вязкость, что затрудняет их применение с использованием традиционных технологий переработки терморезактивных смол.

На основе перечисленных высокотемпературных связующих ранее были получены КП [18–20], которые при комнатной температуре

имеют схожие характеристики с КП на основе термопластов. Они твердые, нелипкие, могут храниться при комнатной температуре, так как твердое состояние связующего, аналогично замораживанию, снижает его реакционную способность.

Рассмотрим вопросы оптимизации режимов термопрессования КП на основе разработанных терморезактивных порошковых связующих. При термопрессовании композитов важную роль играет межслойное трение, так как относительное скольжение между слоями наполнителя может создавать локальные сжимающие напряжения в направлении основных нитей, что приводит к образованию складок, искривлению нитей и другим дефектам.

Анализ данных, приведенных в различных работах по моделированию [21, 22], испытаниям [23, 24], оценке влияния межслоевого трения на образование дефектов на этапе консолидации препрегов [25–27], их формования [28] и драпируемости [29, 30], а также результатов собственных исследований [7, 8] показал, что основным параметром, позволяющим регулировать качество изделия в процессе термопрессования, является вязкость связующего, зависящая от его состава и температуры [31]. Для обеспечения трения со смазкой вязкость связующего должна составлять 75...500 Па·с [32–34]. Превышение этих величин увеличивает сопротивление смещению, при более низких значениях возникает смешенное трение из-за контакта слоев ткани между собой и оснасткой.

Регулировать вязкость терморезактивных связующих можно разными способами.

Цель работы — оптимизация реологических свойств терморезактивных связующих в процессе термопрессования введением дисперсного наполнителя, модифицированием термопластичным полимером и созданием градиента состава связующего.

Следует отметить, что характеристики тканей (тип переплетения и драпируемость) также оказывают влияние на качество изделия при прессовании, но в данной работе был сделан акцент на роль связующего. Далее на примере нескольких разработанных составов показана зависимость процесса термопрессования КП от вязкости связующих.

Материалы и методы исследования. Для получения графитонаполненного связующего применяли твердую эпоксидную смолу D.E.R.671

(Olin), тетрагидрофталевый ангидрид и графит ГЛ-1.

Бензоксазин-фталонитрильные связующие изготавливали, используя твердое фталонитрильное связующее ФНИ350 (ООО «ИТЕКМА», г. Москва). В качестве бензоксазина выбрали бензоксазиновое соединение (ВА-а) на основе бисфенола А и анилина. Модификатором для повышения ударной вязкости композитов выступал высокотемпературный термопластичный полимер полиэфирсульфон (ПЭС) Ultrason E 2020P SR (BASF).

Эпоксидно-бензоксазиновые порошковые связующие получали на основе твердой эпоксидной смолы D.E.R.671 и бензоксазинового соединения (ВА-а).

Реологические свойства расплавов связующих изучали с помощью ротационного реометра RheoStress 6000 (Haake, Германия). В качестве измерительной системы применяли систему плоскость — плоскость с диаметром 25 мм и рабочим зазором между плоскостями, равным 1 мм. Измерения проводили в режиме осцилляции с амплитудой относительной угловой деформации, составлявшей 0,1. Вязкость изучали в режиме охлаждения при скорости 3К/мин в диапазоне температуры 150...60 °С.

Коэффициент трения по материалу оснастки (алюминий) определяли по методике подробно описанной в работе [8].

Анализ полученных результатов. Графитонаполненные связующие. Одним из возможных способов регулирования свойств порошкового связующего, включая вязкость, является введение дисперсных наполнителей, что практически нельзя применять для жидких связующих, так как при пропитке преформы инфузионными методами происходит фильтрация наполнителей.

На рис. 1 приведены кривые вязкости графитонаполненного порошкового связующего на основе эпоксидной смолы D.E.R.671, тетрагидрофталевого ангидрида (ТГФА) и графита ГЛ-1, состав которого был ранее разработан и оптимизирован для получения токопроводящего углепластика [20]. Как видно из рис. 1, минимальная вязкость связующего при нагревании в процессе термопрессования находится в интервале 75...250 Па·с, что вполне удовлетворяет требованиям к обеспечению трения со смазкой. Кроме того, электропроводящий наполнитель — графит — придает неотверж-

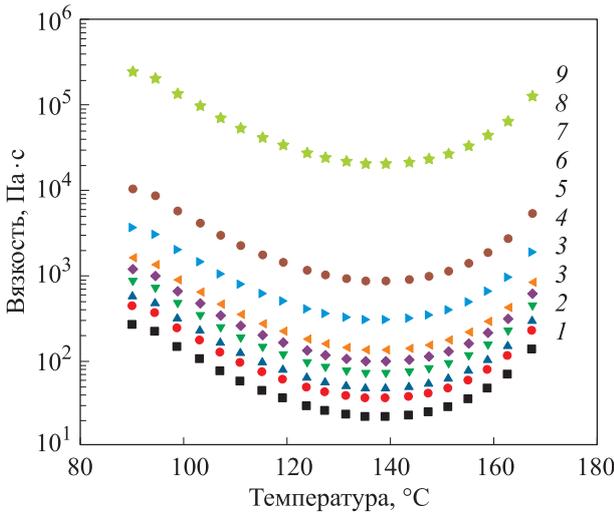


Рис. 1. Зависимости вязкости от температуры связующих на основе D.E.R.671–ТГФА–ГЛП с содержанием графита 0 (1), 5 (2), 9 (3), 16 (4), 23 (5), 28 (6), 36 (7), 42 (8) и 49 об. % (9)

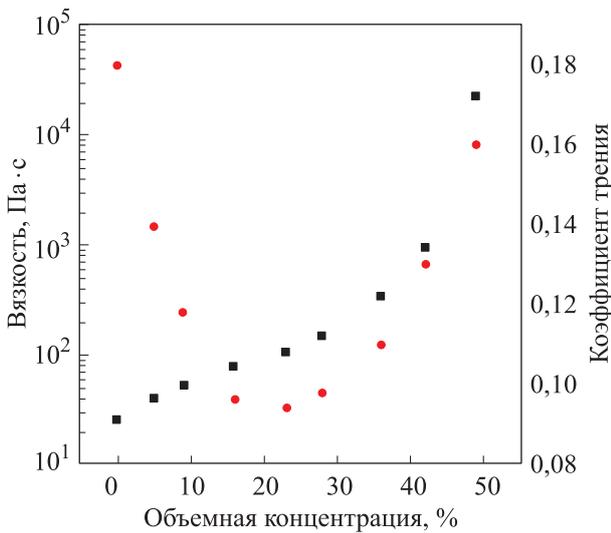


Рис. 2. Зависимости вязкости (■) и коэффициента трения (●) по оснастке от объемной концентрации графита при температуре 130 °С

денному связующему дополнительные смазывающие свойства, особенно при трении по оснастке.

Так как термопрессование необходимо проводить при температуре, максимально приближенной к температуре отверждения, для оценки влияния графитового наполнителя на вязкость и коэффициент трения выбрана температура 130 °С.

Зависимости вязкости связующего и коэффициента трения КП по оснастке из алюминиевого сплава Д16Т от содержания графита при температуре 130 °С приведены на рис. 2. Видно, что наименьшие значения коэффициента тре-

ния по оснастке достигаются в области с содержанием графита 15...30 об. %, т. е. когда вязкость связующего при температуре 130 °С составляет 80...170 Па·с, что вполне согласуется с литературными данными.

Консолидированные пластины на основе графитонаполненного связующего отформовывали при следующих режимах: температура КП — 110...120 °С; температура формообразующей оснастки — 200...220 °С; давление прессования — 3 бара; время выдержки в оснастке — 15...30 мин. Внешний вид тестового изделия типа двойного купола из углепластика, полученного путем термопрессования пластин на основе графитонаполненного порошкового связующего с оптимизированным составом, показан на рис. 3. Видно, что изделие не имеет видимых дефектов, складок и искривлений.

Таким образом, порошковые связующие с наполнителями позволяют не только придавать матрице необходимые функциональные свойства (электропроводность, пониженный коэффициент термического расширения и др.), но и регулировать вязкость связующего для улучшения процесса термопрессования.

В последние годы для придания композиту комплекса необходимых свойств начали использовать плавное изменение состава матрицы и армирующего материала от поверхности к объему. Такие материалы, получившие название «функционально-градиентные», позволяют сочетать в композите высокую ударную прочность с необходимой жесткостью [35, 36].



а



б

Рис. 3. Внешний вид (а) и увеличенный фрагмент (б) тестового изделия типа двойного купола из углепластика на основе графитонаполненного связующего

Порошковые связующие идеально подходят для получения КП с градиентом состава связующего. При этом можно плавно изменять содержание и тип дисперсного наполнителя или модификатора, сочетать несколько порошковых олигомеров (бензоксазинов, фталонитрилов, эпоксидов и др.) и изменять их соотношение по толщине изделия.

Графитонаполненное порошковое связующее с разным содержанием графита использовали для получения функционально-градиентного углепластика, в котором содержание такого наполнителя уменьшалось от поверхности к центру (рис. 4). Нумерация слоев препрега выполнена от центра к поверхности.

При термопрессовании таких градиентных КП необходимо учитывать послойное изменение вязкости связующего, в частности ее увеличение от внутренних слоев к поверхностным. Однако в момент взаимодействия горячей оснастки с менее нагретой КП в последней неизбежно возникает градиент температуры: внешние слои КП оказываются более нагретыми, чем внутренние. Такой технологический температурный градиент в гомогенной системе может вызвать неравномерное смещение слоев пластика, образование морщин и смятия, а в градиентном материале просто компенсирует различие вязкости слоев композиционного материала (см. рис. 4).

Штриховой линией на рис. 4 показан температурный градиент, возникающий по толщине

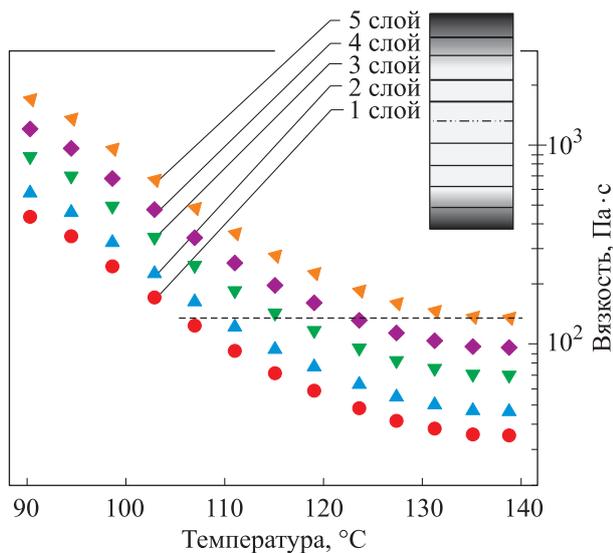


Рис. 4. Зависимости вязкости от температуры связующих в слоях градиентного углепластика при различном содержании графита в слоях: слой 1 — 5 %; слой 2 — 9 %; слой 3 — 16 %; слой 4 — 23 %; слой 5 — 28 %

КП в момент прессования, и вязкость связующих в слоях препрега. Видно, что вязкости связующих для разных составов в слоях препрега, находящихся в различных температурных условиях (100...140 °С) практически равны.

Таким образом, градиент состава связующего позволяет не только регулировать необходимые эксплуатационные свойства, но и компенсировать отрицательное влияние температурного градиента, который неизбежно возникает при термопрессовании.

Термореактивные связующие, модифицированные термопластами. Рассмотрим еще один способ регулирования вязкости олигомерного связующего при повышенной температуре. Для увеличения ударной прочности термореактивных полимеров и композитов на их основе часто используют модификацию термопластами, термоэластопластами и каучуками. Кроме того, введение ПЭС в порошковые бензоксазин-фталонитрильные связующие позволило регулировать вязкость.

Зависимости вязкости от температуры бензоксазин-фталонитрильных связующих с различным содержанием термопласта приведены на рис. 5. Видно, что если в связующем содержится 8 мас. % ПЭС, то при температуре 120 °С его вязкость можно повысить до 80...100 Па·с. Это позволяет оптимизировать режимы термопрессования углепластиков на основе бензоксазин-фталонитрильных связующих.

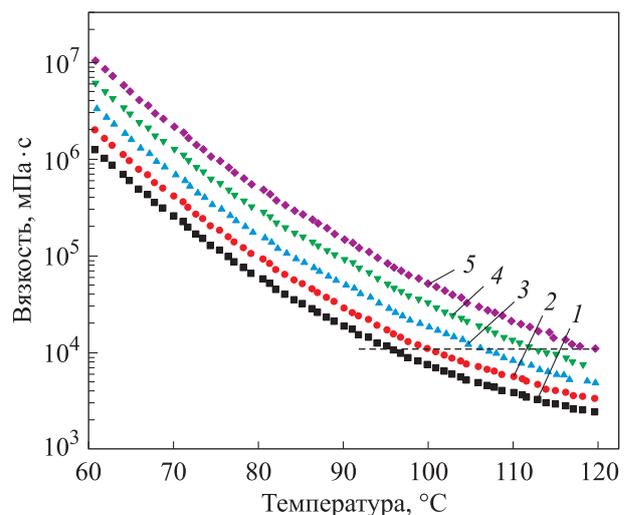


Рис. 5. Зависимости вязкости от температуры бензоксазин-фталонитрильных связующих с содержанием ПЭС 1 (1), 2 (2), 4 (3), 6 (4) и 8 мас. % (5)

Градиентное распределение термопластичного полимера позволяет сочетать высокую ударную вязкость с сохранением или даже повышением жесткостных характеристик материала [37]. При термопрессовании КП из сухих препрегов на основе порошковых связующих с градиентом распределения термопластичного модификатора также возникают различия реологических свойств связующего в слоях композиционного материала.

Анализ приведенных на рис. 5 температурных зависимостей вязкости нескольких составов бензоксазин-фталонитрильных композиций показывает, что при увеличении содержания Ultrason E 2020P SR минимальные значения вязкости составов увеличиваются, температурные области начала гелеобразования составов достаточно близки друг другу. В качестве оптимального режима прессования для этой системы можно выбрать температуру пресса 120 °С, при которой вязкость внешних слоев составляет 100 Па·с, а для внутренних — около 30 Па·с. Однако с учетом перепада температур, составляющего примерно 25 °С на толщину КП 1,3 мм, вязкость внутренних слоев также будет достигать 100 Па·с.

Аналогично первому примеру с градиентом состава графитонаполненных связующих в данном случае градиентное увеличение термопласта и, соответственно, вязкости при переходе от внутренних слоев к поверхности изделия будет скомпенсировано температурным градиентом (см. рис. 5, штриховая линия).

Регулирование вязкости ненаполненных термореактивных порошковых связующих. Для ненаполненных порошковых термореактивных связующих вязкость при повышении температуры может снижаться до 1...10 Па·с, что является слишком низким значением для обеспечения условий трения со смазкой в процессе прессования.

В работе [38] сначала проводили горячее прессование преформы, чтобы устранить межслоевые пустоты, далее предварительно частично отверждали, а затем подвергали горячему прессованию в трехмерных формах и постотверждению. Предварительное отверждение, применяемое на начальном этапе формования, позволяет повысить вязкость связующего, а следовательно, отрегулировать межслоевое трение, трение по оснастке и получить в итоге изделие высокого качества.

Для оценки возможности предотвращения порошковых связующих на основе эпоксидно-бензоксазиновых [18] и цианэфирных [19] композиций в процессе получения КП проведены реокинетические исследования связующих на ранних стадиях в изотермических и неизотермических условиях с учетом анализа литературы [39–42] и рекомендаций комитета по кинетике ИСТАС [43].

В литературе предложены несколько моделей для корреляции реологии с кинетикой отверждения [44–46]. Модель Аррениуса наиболее широко используют для термореактивных полимеров. Неизотермическую модель Аррениуса, имеющую четыре параметра, можно записать как

$$\ln(\eta^*(t, T)) = \ln(\eta_0^*(T)) + \int_0^t k(T) dt, \quad (1)$$

где η^* — зависящая от времени отверждения t комплексная вязкость при абсолютной температуре T ; η_0^* — вязкость в нулевой момент времени; k — постоянная скорости полимеризации (кажущийся кинетический фактор).

Эта модель состоит из двух слагаемых, влияющих на вязкость системы. Первое слагаемое, часто называемое уравнением Андраде [47], уменьшает комплексную вязкость из-за повышения температуры, второе — увеличивает ее вследствие отверждения и сшивания цепей. Эти термины можно определить как функции, зависящие от температуры, следующим образом:

$$\ln(\eta_0^*(T)) = \ln \eta_\infty + \frac{\Delta E_\eta}{RT};$$

$$k(T) = k_\infty \exp \frac{\Delta E_k}{RT},$$

где η_∞ — эталонная комплексная вязкость при бесконечной температуре; ΔE_η — энергия активации вязкого потока; R — универсальная газовая постоянная; k_∞ — кинетическая константа, аналогичная η_∞ ; ΔE_k — энергия активации кинетики отверждения смолы [48].

Параметры k_∞ и ΔE_k определяли из изотермических зависимостей вязкости при четырех значениях температуры путем построения графиков в координатах уравнения Аррениуса $\ln \eta - 1000/(RT_{из.в})$, где $T_{из.в}$ — температура изотермической выдержки согласно методике [49]. Параметры η_∞ и ΔE_η находили в динамическом режиме путем построения графика в координатах уравнения Аррениуса $\ln \eta - 1000/(RT_{исп})$, где $T_{исп}$ — фак-

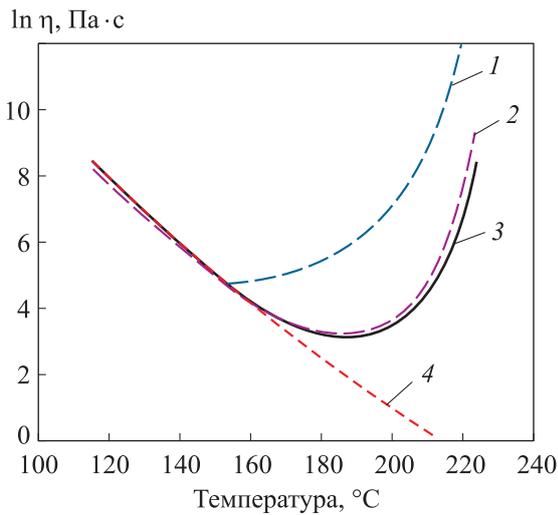


Рис. 6. Зависимости вязкости связующего BA-a+D.E.R.671 от температуры в рамках реокинетической модели (1): 1, 4 и 2 — результаты моделирования кинетической, температурной компонент и их суммы; 3 — экспериментальные данные

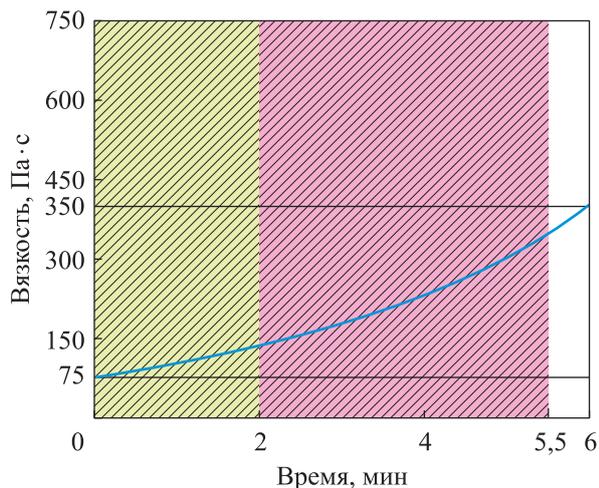


Рис. 7. Зависимости вязкости частично отвержденного связующего BA-a+D.E.R.671 от времени в рамках реокинетической модели (1) при термоформовании с температурой 160 °C: — зона подготовки; — зона формования

тическая температура испытания при скорости нагрева 3 К/мин.

В качестве примера описание экспериментальных данных эпоксидно-бензоксазиновой композиции в рамках модели (1) приведено на рис. 6. Видно, что модель позволяет прогнозировать значения вязкости в зависимости от времени и температуры.

Чтобы оптимизировать процесс термоформования КП на основе ненаполненных термо-

реактивных связующих с применением реокинетической модели, подбирали температурно-временной режим частичного отверждения связующего. Оптимальная вязкость связующего 50...350 Па·с при температуре 160 °C в соответствии с реокинетической моделью достигается при его 20%-ной конверсии.

Экспериментальные зависимости вязкости связующего с 20%-ной конверсией при режимах термоформования приведены на рис. 7. Видно, что достигнутая степень отверждения связующего создает оптимальные реологические условия термоформования, обеспечивая значения вязкости в диапазоне 75...350 Па·с в течение 5,5 мин. Данного времени достаточно для завершения процесса термоформования при минимальных значениях коэффициента трения.

В процессе предотверждения связующего в КП может возникать температурный градиент, что приводит к градиенту степени конверсии в слоях со снижением от поверхности к внутренним слоям, причем вязкость связующего в поверхностных слоях будет выше, чем во внутренних.

Однако возникающий во время прессования температурный градиент можно скомпенсировать различием вязкости связующего в слоях, т. е. в момент прессования реологические характеристики связующего всех слоев композиционного материала будут практически одинаковыми, что позволяет получить качественное изделие.

Выводы

1. Рассмотрены способы регулирования вязкости терморепактивных порошковых связующих для получения КП с целью дальнейшего термопрессования. На примере некоторых разработанных ранее составов порошковых связующих (графитонаполненных, модифицированных термопластом) показана возможность оптимизации реологических характеристик. Для регулирования реологических характеристик ненаполненных порошковых терморепактивных связующих на основе бензоксазинов использовано предотверждение, параметры процесса которого рассчитаны с помощью модели Аррениуса.

2. Установлено, что вследствие создания градиентного распределения состава матрицы по толщине КП значения вязкости связующего

в слоях препрега различаются. Однако температурный градиент, возникающий в процессе горячего прессования, компенсирует различие

вязкости, что способствует повышению качества прессования.

Литература

- [1] Lunetto V., Galati M., Settineri L. et al. Sustainability in the manufacturing of composite materials: a literature review and directions for future research. *J. Manuf. Process.*, 2023, vol. 85, pp. 858–874, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.12.020>
- [2] Yadav N., Schledjewski R. Review of in-process defect monitoring for automated tape laying. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2023, art. 107654, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107654>
- [3] Sherwood J.A., Fetfatsidis K.A., Gorczyca J.L. et al. Fabric thermostamping in polymer matrix composites. In: *Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs)*. Woodhead Publ., 2012, pp. 139–181, doi: <https://doi.org/10.1533/9780857096258.2.139>
- [4] Brooks R.A., Wang H., Ding Z. et al. A review on stamp forming of continuous fibre-reinforced thermoplastics. *Int. J. Lightweight Mater. Manuf.*, 2022, vol. 5, no. 3, pp. 411–430, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2022.05.001>
- [5] Chen H., Li S., Wang J. et al. A focused review on the thermo-stamping process and simulation progresses of continuous fibre reinforced thermoplastic composites. *Compos. B. Eng.*, 2021, vol. 224, art. 109196, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109196>
- [6] Gong Y., Song Z., Ning H. et al. A comprehensive review of characterization and simulation methods for thermo-stamping of 2D woven fabric reinforced thermoplastics. *Compos. B. Eng.*, 2020, vol. 203, art. 108462, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108462>
- [7] Соловьев Р.И., Балькаев Д.А., Амирова Л.М. Термоформование изделий из консолидированных листовых заготовок на основе армированного стеклотканью полипропилена. *Известия вузов. Авиационная техника*, 2024, № 1, с. 164–171, EDN: KORRDN
- [8] Соловьев Р.И., Амирова Л.М. и др. Определение формообразующего поведения термопластичных композиционных материалов для моделирования термоформования. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2023, т. 89, № 7, с. 61–70, doi: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-7-61-70>
- [9] Амиров Р.Р., Антипин И.С., Балькаев Д.А. и др. Углепластик на основе полифениленсульфидного связующего и способ его получения (варианты). Патент РФ 2816084. Заявл. 15.09.2023, опубл. 26.03.2024.
- [10] Yanagimoto J., Ikeuchi K. Sheet forming process of carbon fiber reinforced plastics for lightweight parts. *CIRP Annals*, 2012, vol. 61, no. 1, pp. 247–250, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.129>
- [11] Uriya Y., Yanagimoto J. Suitable structure of thermosetting CFRP sheet for cold/warm forming. *Int. J. Mater. Form.*, 2016, vol. 9, pp. 243–252, doi: <https://doi.org/10.1007/s12289-015-1227-x>
- [12] Uriya Y., Yanagimoto J. Erichsen cupping test on thermosetting CFRP sheets. *Int. J. Mater. Form.*, 2017, vol. 10, pp. 527–534, doi: <https://doi.org/10.1007/s12289-016-1298-3>
- [13] Nishino A., Oya T. Multiscale analysis of the formability of CFRP sheets subjected to warm forming with a temperature-dependent epoxy model. *Int. J. Mater. Form.*, 2019, vol. 12, pp. 793–800, doi: <https://doi.org/10.1007/s12289-018-1449-9>
- [14] Oya T., Nishino A. Formability mechanism of CFRP sheets using multiscale model based on microscopic characteristics of thermosetting resin. *Multiscale and Multidiscip. Model. Exp. and Des.*, 2021, vol. 4, no. 2, pp. 65–76, doi: <https://doi.org/10.1007/s41939-020-00082-2>
- [15] Мельников Д.А., Хасков М.А., Гусева М.А. и др. К вопросу о разработке режимов прессования слоистых ПКМ на основе препрегов. *Труды ВИАМ*, 2018, № 2, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-2-9-9>
- [16] Hallander P., Sjölander J., Petersson M. et al. Fast forming of multistacked UD prepreg using a high pressure process. *Polym. Compos.*, 2019, vol. 40, no. 9, pp. 3550–3561, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.25217>

- [17] Janzen J.P., May D. Solid epoxy prepregs with patterned resin distribution: Influence of pattern and process parameters on part quality in vacuum bag only processing. *Polym. Compos.*, 2023, vol. 44, no. 11, pp. 8153–8167, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.27696>
- [18] Амирова Л.М., Антипин И.С., Балькаев Д.А. и др. Способ получения армированного углекомпозиата на основе порошкового связующего, содержащего твердую эпоксидную смолу и бифункциональный бензоксазин (варианты). Патент РФ 2813113. Заявл. 07.06.2023, опубл. 06.02.2024.
- [19] Хамидуллин О.Л., Мадиярова Г.М., Амирова Л.М. и др. Порошковое связующее на основе циановой композиции и способ получения армированного углекомпозиата на его основе (варианты). Патент РФ 2813882. Заявл. 23.08.2023, опубл. 19.02.2024.
- [20] Хамидуллин О.Л., Мадиярова Г.М., Амирова Л.М. и др. Токпроводящее порошковое связующее на основе эпоксидной композиции и способ получения препрега и армированного углекомпозиата на его основе (варианты). Патент РФ 2820925. Заявл. 07.08.2023, опубл. 11.06.2024.
- [21] Rashidi A., Montazerian H., Milani A.S. Slip-bias extension test: a characterization tool for understanding and modeling the effect of clamping conditions in forming of woven fabrics. *Compos. Struct.*, 2021, vol. 260, art. 113529, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113529>
- [22] Qi J., Li L., Wang Y. et al. A mechanics analysis of carbon fiber plain-woven thermoset prepreg during forming process considering temperature effect. *Polymers*, 2022, vol. 14, no. 13, art. 2618, doi: <https://doi.org/10.3390/polym14132618>
- [23] Khan M.A., Pasco C., Reynolds N. et al. On the validity of bias-extension test method for the characterisation of in-plane shear properties of rapid-cure prepregs. *Compos. Struct.*, 2020, vol. 246, art. 112399, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112399>
- [24] Le A., Nimbalkar S., Zobeiry N. et al. An efficient multi-scale approach for viscoelastic analysis of woven composites under bending. *Compos. Struct.*, 2022, vol. 292, art. 115698, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115698>
- [25] Ten Thije R.H.W. et al. A lubrication approach to friction in thermoplastic composites forming processes. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2011, vol. 42, no. 8, pp. 950–960, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.03.023>
- [26] Erland S., Dodwell T.J., Butler R. Characterisation of inter-ply shear in uncured carbon fibre prepreg. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2015, vol. 77, pp. 210–218, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.07.008>
- [27] Rashidi A. et al. Experimental characterization of the inter-ply shear behavior of dry and prepreg woven fabrics: significance of mixed lubrication mode during thermoset composites processing. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2020, vol. 129, art. 105725, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105725>
- [28] Osterberger J., Maier F., Hinterhölzl R.M. Application of the abaqus fabric model to approximate the draping behavior of UD prepregs based on suited mechanical characterization. *Front. Mater.*, 2022, vol. 9, art. 865477, doi: <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.865477>
- [29] Bai R., Chen B., Colmars J. et al. Physics-based evaluation of the drapability of textile composite reinforcements. *Compos. B. Eng.*, 2022, vol. 242, art. 110089, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110089>
- [30] Rashidi A., Crawford B., Olfatbakhsh T. et al. A mixed lubrication model for inter-ply friction behaviour of uncured fabric prepregs. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2021, vol. 149, art. 106571, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106571>
- [31] Yuan H., Khan M., Qian C. et al. Experimental and numerical investigation of the intra-ply shear behaviour of unidirectional prepreg forming through picture-frame test. *Compos. B. Eng.*, 2023, vol. 266, art. 111036, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.111036>
- [32] Martin C.J., Seferis J.C., Wilhelm M.A. Frictional resistance of thermoset prepregs and its influence on honeycomb composite processing. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 1996, vol. 27, no. 10, pp. 943–951, doi: [https://doi.org/10.1016/1359-835X\(96\)00037-1](https://doi.org/10.1016/1359-835X(96)00037-1)
- [33] Rashidi A., Keegan C., Milani A.S. Analysis of inter-ply friction in consolidation process of thermoset woven prepregs. *AIP Conf. Proc.*, 2019, vol. 2113, no. 1, art. 020023, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5112528>
- [34] Kruse M., Werner H.O., Chen H. et al. Investigation of the friction behavior between dry/infiltrated glass fiber fabric and metal sheet during deep drawing of fiber metal lami-

- nates. *Prod. Eng. Res. Devel.*, 2023, vol. 17, no. 1, pp. 37–46, doi: <https://doi.org/10.1007/s11740-022-01141-y>
- [35] Ghatage P.S., Kar V.R., Sudhagar P.E. On the numerical modelling and analysis of multi-directional functionally graded composite structures: a review. *Compos. Struct.*, 2020, vol. 236, art. 111837, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111837>
- [36] Sidorov I.N., Andrianova K., Gaifutdinov A. et al. Modeling and experimental investigations of mechanical properties of hybrid composite rods with gradient composition. *Mater. Today Commun.*, 2024, vol. 39, art. 108738, doi: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4740647>
- [37] Андрианова К.А., Халиков А.А., Беззаметнов О.Н. и др. Функционально-градиентный углепластик на основе эпоксидной матрицы, модифицированной термоэластопластом. *Вопросы материаловедения*, 2023, № 3, с. 170–177, doi: <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2023-115-3-170-177>
- [38] Zhang J., Taylor T., Shukla L. et al. Rapid fabrication of 3D CFRP parts by hot forming of pre-cured CFRP sheets. *Compos. Struct.*, 2021, vol. 268, art. 113942, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113942>
- [39] Halley P.J., Mackay M.E. Chemorheology of thermosets — an overview. *Polym. Eng. Sci.*, 1996, vol. 36, no. 5, pp. 593–609, doi: <https://doi.org/10.1002/pen.10447>
- [40] Domínguez J.C. Rheology and curing process of thermosets. In: *Thermosets*. Elsevier, 2018, pp. 115–146, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101021-1.00004-6>
- [41] Müller-Pabel M., Agudo J.A.R., Gude M. Measuring and understanding cure-dependent viscoelastic properties of epoxy resin: a review. *Polym. Test.*, 2022, vol. 114, art. 107701, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107701>
- [42] Malkin A.Y., Kulichikhin S.G. *Rheokinetics*. Wiley, 2008. 236 p.
- [43] Vyazovkin S., Achilias D., Fernandez-Francos X. et al. ICTAC Kinetics Committee recommendations for analysis of thermal polymerization kinetics. *Thermochim. Acta*, 2022, vol. 714, art. 179243, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179243>
- [44] Dittrich B., Wartig K-A., Mühlhaupt R. et al. Flame-retardancy properties of intumescent ammonium poly(phosphate) and mineral filler magnesium hydroxide in combination with graphene. *Polymers*, 2014, vol. 6, no. 11, pp. 2875–2895, doi: <https://doi.org/10.3390/polym6112875>
- [45] Domínguez J.C., Alonso M.V., Oliet M. et al. Chemorheological study of the curing kinetics of a phenolic resol resin gelled. *Eur. Polym. J.*, 2010, vol. 46, no. 1, pp. 50–57, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2009.09.004>
- [46] Peng W., Riedl B. The chemorheology of phenol-formaldehyde thermoset resin and mixtures of the resin with lignin fillers. *Polymer*, 1994, vol. 35, no. 6, pp. 1280–1286, doi: [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(94\)90024-8](https://doi.org/10.1016/0032-3861(94)90024-8)
- [47] Domínguez J.C., Oliet M., Alonso M.V. et al. Rheokinetic of a gelled resol resin curing by dynamic temperature rheometry based on rectangular torsion strain. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2012, vol. 124, no. 6, pp. 5122–5129, doi: <https://doi.org/10.1002/app.35663>
- [48] Yang Z., Peng H., Wang W. et al. Crystallization behavior of poly(ϵ -caprolactone)/layered double hydroxide nanocomposites. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2010, vol. 116, no. 5, pp. 2658–2667, doi: <https://doi.org/10.1002/app.31787>
- [49] Roller M.B. Rheology of curing thermosets: a review. *Polym. Eng. Sci.*, 1986, vol. 26, no. 6, pp. 432–440, doi: <https://doi.org/10.1002/pen.760260610>

References

- [1] Lunetto V., Galati M., Settineri L. et al. Sustainability in the manufacturing of composite materials: a literature review and directions for future research. *J. Manuf. Process.*, 2023, vol. 85, pp. 858–874, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.12.020>
- [2] Yadav N., Schledjewski R. Review of in-process defect monitoring for automated tape laying. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2023, art. 107654, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107654>
- [3] Sherwood J.A., Fetfatsidis K.A., Gorczyca J.L. et al. Fabric thermostamping in polymer matrix composites. In: *Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs)*. Woodhead Publ., 2012, pp. 139–181, doi: <https://doi.org/10.1533/9780857096258.2.139>

- [4] Brooks R.A., Wang H., Ding Z. et al. A review on stamp forming of continuous fibre-reinforced thermoplastics. *Int. J. Lightweight Mater. Manuf.*, 2022, vol. 5, no. 3, pp. 411–430, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2022.05.001>
- [5] Chen H., Li S., Wang J. et al. A focused review on the thermo-stamping process and simulation progresses of continuous fibre reinforced thermoplastic composites. *Compos. B. Eng.*, 2021, vol. 224, art. 109196, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109196>
- [6] Gong Y., Song Z., Ning H. et al. A comprehensive review of characterization and simulation methods for thermo-stamping of 2D woven fabric reinforced thermoplastics. *Compos. B. Eng.*, 2020, vol. 203, art. 108462, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108462>
- [7] Solovyev R.I., Balkaev D.A., Amirova L.M. Thermoforming of products from consolidated sheet blanks based on the polypropylene reinforced by the fiberglass. *Izvestiya vuzov. Aviatcionnaya tekhnika*, 2024, no. 1, pp. 164–171. EDN: KORRDN (in Russ.).
- [8] Solovyev R.I., Amirova L.M. et al. Determination of the shaping behavior of thermoplastic composite materials required for simulation of thermoforming. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial laboratory. Diagnostics of materials], 2023, vol. 89, no. 7, pp. 61–70, doi: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-7-61-70> (in Russ.).
- [9] Amirov R.R., Antipin I.S., Balkaev D.A. et al. *Ugleplastik na osnove polifenilensulfidnogo svyazuyushchego i sposob ego polucheniya (varianty)* [Carbon fibre-reinforced plastic based on polyphenylene sulphide binder and method for production thereof (versions)]. Patent RU 2816084. Appl. 15.09.2023, publ. 26.03.2024. (In Russ.).
- [10] Yanagimoto J., Ikeuchi K. Sheet forming process of carbon fiber reinforced plastics for lightweight parts. *CIRP Annals*, 2012, vol. 61, no. 1, pp. 247–250, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.129>
- [11] Uriya Y., Yanagimoto J. Suitable structure of thermosetting CFRP sheet for cold/warm forming. *Int. J. Mater. Form.*, 2016, vol. 9, pp. 243–252, doi: <https://doi.org/10.1007/s12289-015-1227-x>
- [12] Uriya Y., Yanagimoto J. Erichsen cupping test on thermosetting CFRP sheets. *Int. J. Mater. Form.*, 2017, vol. 10, pp. 527–534, doi: <https://doi.org/10.1007/s12289-016-1298-3>
- [13] Nishino A., Oya T. Multiscale analysis of the formability of CFRP sheets subjected to warm forming with a temperature-dependent epoxy model. *Int. J. Mater. Form.*, 2019, vol. 12, pp. 793–800, doi: <https://doi.org/10.1007/s12289-018-1449-9>
- [14] Oya T., Nishino A. Formability mechanism of CFRP sheets using multiscale model based on microscopic characteristics of thermosetting resin. *Multiscale and Multidiscip. Model. Exp. and Des.*, 2021, vol. 4, no. 2, pp. 65–76, doi: <https://doi.org/10.1007/s41939-020-00082-2>
- [15] Melnikov D.A., Khaskov M.A., Guseva M.A. et al. To the question of the development of pressing mode for laminated PCMs based on prepreg. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2018, no. 2, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-2-9-9> (in Russ.).
- [16] Hallander P., Sjölander J., Petersson M. et al. Fast forming of multistacked UD prepreg using a high pressure process. *Polym. Compos.*, 2019, vol. 40, no. 9, pp. 3550–3561, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.25217>
- [17] Janzen J.P., May D. Solid epoxy prepreps with patterned resin distribution: Influence of pattern and process parameters on part quality in vacuum bag only processing. *Polym. Compos.*, 2023, vol. 44, no. 11, pp. 8153–8167, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.27696>
- [18] Amirova L.M., Antipin I.S., Balkaev D.A. et al. *Sposob polucheniya armirovannogo uglekompozita na osnove poroshkovogo svyazuyushchego, soderzhashchego tverduyu epoksidnuyu smolu i bifunktsionalnyy benzoksazin (varianty)* [Method for producing reinforced carbon composite based on powder binder containing solid epoxy resin and bifunctional benzoxazine (embodiments)]. Patent RU 2813113. Appl. 07.06.2023, publ. 06.02.2024. (In Russ.).
- [19] Khamidullin O.L., Madiyarova G.M., Amirova L.M. et al. *Poroshkovoe svyazuyushchee na osnove tsianovoy kompozitsii i sposob polucheniya armirovannogo uglekompozita na ego osnove (varianty)* [Powder binder based on cyanic composition and method of producing reinforced carbon composite based thereon (versions)]. Patent RU 2813882. Appl. 23.08.2023, publ. 19.02.2024. (In Russ.).
- [20] Khamidullin O.L., Madiyarova G.M., Amirova L.M. et al. *Tokoprovodyashchee poroshkovoe svyazuyushchee na osnove epoksidnoy kompozitsii i sposob polucheniya preprega i*

- armirovannogo uglekompozita na ego osnove (varianty)* [Current-conducting powder binder based on epoxy composition and method of producing prepreg and reinforced carbon composite based on it (versions)]. Patent RU 2820925. Appl. 07.08.2023, publ.11.06.2024. (In Russ.).
- [21] Rashidi A., Montazerian H., Milani A.S. Slip-bias extension test: a characterization tool for understanding and modeling the effect of clamping conditions in forming of woven fabrics. *Compos. Struct.*, 2021, vol. 260, art. 113529, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113529>
- [22] Qi J., Li L., Wang Y. et al. A mechanics analysis of carbon fiber plain-woven thermoset prepreg during forming process considering temperature effect. *Polymers*, 2022, vol. 14, no. 13, art. 2618, doi: <https://doi.org/10.3390/polym14132618>
- [23] Khan M.A., Pasco C., Reynolds N. et al. On the validity of bias-extension test method for the characterisation of in-plane shear properties of rapid-cure prepregs. *Compos. Struct.*, 2020, vol. 246, art. 112399, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112399>
- [24] Le A., Nimbalkar S., Zobeiry N. et al. An efficient multi-scale approach for viscoelastic analysis of woven composites under bending. *Compos. Struct.*, 2022, vol. 292, art. 115698, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115698>
- [25] Ten Thije R.H.W. et al. A lubrication approach to friction in thermoplastic composites forming processes. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2011, vol. 42, no. 8, pp. 950–960, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.03.023>
- [26] Erland S., Dodwell T.J., Butler R. Characterisation of inter-ply shear in uncured carbon fibre prepreg. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2015, vol. 77, pp. 210–218, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.07.008>
- [27] Rashidi A. et al. Experimental characterization of the inter-ply shear behavior of dry and prepreg woven fabrics: significance of mixed lubrication mode during thermoset composites processing. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2020, vol. 129, art. 105725, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105725>
- [28] Osterberger J., Maier F., Hinterhölzl R.M. Application of the abaqus fabric model to approximate the draping behavior of UD prepregs based on suited mechanical characterization. *Front. Mater.*, 2022, vol. 9, art. 865477, doi: <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.865477>
- [29] Bai R., Chen B., Colmars J. et al. Physics-based evaluation of the drapability of textile composite reinforcements. *Compos. B. Eng.*, 2022, vol. 242, art. 110089, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110089>
- [30] Rashidi A., Crawford B., Olfatbakhsh T. et al. A mixed lubrication model for inter-ply friction behaviour of uncured fabric prepregs. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2021, vol. 149, art. 106571, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106571>
- [31] Yuan H., Khan M., Qian C. et al. Experimental and numerical investigation of the intra-ply shear behaviour of unidirectional prepreg forming through picture-frame test. *Compos. B. Eng.*, 2023, vol. 266, art. 111036, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.111036>
- [32] Martin C.J., Seferis J.C., Wilhelm M.A. Frictional resistance of thermoset prepregs and its influence on honeycomb composite processing. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 1996, vol. 27, no. 10, pp. 943–951, doi: [https://doi.org/10.1016/1359-835X\(96\)00037-1](https://doi.org/10.1016/1359-835X(96)00037-1)
- [33] Rashidi A., Keegan C., Milani A.S. Analysis of inter-ply friction in consolidation process of thermoset woven prepregs. *AIP Conf. Proc.*, 2019, vol. 2113, no. 1, art. 020023, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5112528>
- [34] Kruse M., Werner H.O., Chen H. et al. Investigation of the friction behavior between dry/infiltrated glass fiber fabric and metal sheet during deep drawing of fiber metal laminates. *Prod. Eng. Res. Devel.*, 2023, vol. 17, no. 1, pp. 37–46, doi: <https://doi.org/10.1007/s11740-022-01141-y>
- [35] Ghatage P.S., Kar V.R., Sudhagar P.E. On the numerical modelling and analysis of multi-directional functionally graded composite structures: a review. *Compos. Struct.*, 2020, vol. 236, art. 111837, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111837>
- [36] Sidorov I.N., Andrianova K., Gaifutdinov A. et al. Modeling and experimental investigations of mechanical properties of hybrid composite rods with gradient composition. *Mater. Today Commun.*, 2024, vol. 39, art. 108738, doi: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4740647>

- [37] Andrianova K.A., Khalikov A.A., Bezzametnov O.N. et al. Functional-gradient carbon fiber-reinforced plastic based on epoxy matrix modified with thermoplastic elastoplast. *Voprosy materialovedeniya*, 2023, no. 3, pp. 170–177, doi: <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2023-115-3-170-177> (in Russ.).
- [38] Zhang J., Taylor T., Shukla L. et al. Rapid fabrication of 3D CFRP parts by hot forming of pre-cured CFRP sheets. *Compos. Struct.*, 2021, vol. 268, art. 113942, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113942>
- [39] Halley P.J., Mackay M.E. Chemorheology of thermosets — an overview. *Polym. Eng. Sci.*, 1996, vol. 36, no. 5, pp. 593–609, doi: <https://doi.org/10.1002/pen.10447>
- [40] Domínguez J.C. Rheology and curing process of thermosets. In: *Thermosets*. Elsevier, 2018, pp. 115–146, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101021-1.00004-6>
- [41] Müller-Pabel M., Agudo J.A.R., Gude M. Measuring and understanding cure-dependent viscoelastic properties of epoxy resin: a review. *Polym. Test.*, 2022, vol. 114, art. 107701, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107701>
- [42] Malkin A.Y., Kulichikhin S.G. *Rheokinetics*. Wiley, 2008. 236 p.
- [43] Vyazovkin S., Achilias D., Fernandez-Francos X. et al. ICTAC Kinetics Committee recommendations for analysis of thermal polymerization kinetics. *Thermochim. Acta*, 2022, vol. 714, art. 179243, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179243>
- [44] Dittrich B., Wartig K.-A., Mülhaupt R. et al. Flame-retardancy properties of intumescent ammonium poly(phosphate) and mineral filler magnesium hydroxide in combination with graphene. *Polymers*, 2014, vol. 6, no. 11, pp. 2875–2895, doi: <https://doi.org/10.3390/polym6112875>
- [45] Domínguez J.C., Alonso M.V., Oliet M. et al. Chemorheological study of the curing kinetics of a phenolic resol resin gelled. *Eur. Polym. J.*, 2010, vol. 46, no. 1, pp. 50–57, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2009.09.004>
- [46] Peng W., Riedl B. The chemorheology of phenol-formaldehyde thermoset resin and mixtures of the resin with lignin fillers. *Polymer*, 1994, vol. 35, no. 6, pp. 1280–1286, doi: [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(94\)90024-8](https://doi.org/10.1016/0032-3861(94)90024-8)
- [47] Domínguez J.C., Oliet M., Alonso M.V. et al. Rheokinetic of a gelled resol resin curing by dynamic temperature rheometry based on rectangular torsion strain. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2012, vol. 124, no. 6, pp. 5122–5129, doi: <https://doi.org/10.1002/app.35663>
- [48] Yang Z., Peng H., Wang W. et al. Crystallization behavior of poly(ϵ -caprolactone)/layered double hydroxide nanocomposites. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2010, vol. 116, no. 5, pp. 2658–2667, doi: <https://doi.org/10.1002/app.31787>
- [49] Roller M.B. Rheology of curing thermosets: a review. *Polym. Eng. Sci.*, 1986, vol. 26, no. 6, pp. 432–440, doi: <https://doi.org/10.1002/pen.760260610>

Статья поступила в редакцию 20.09.2024

Информация об авторах

ГАБДРАХМАНОВА Гульназ Мазгаровна — аспирант кафедры «Производство летательных аппаратов». КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: GMMadiyarova@kai.ru).

ХАМИДУЛЛИН Оскар Ленарович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Производство летательных аппаратов». КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: khamidullinoskarl@mail.ru).

Information about the authors

GABDRAKHMANOVA Gulnaz Mazgarovna — Postgraduate, Department of Aircraft Manufacturing. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10, e-mail: GMMadiyarova@kai.ru).

KHAMIDULLIN Oskar Lenarovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Aircraft Manufacturing. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10, e-mail: khamidullinoskarl@mail.ru).

АНДРИАНОВА Кристина Александровна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Производство летательных аппаратов». КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: tina_a@mail.ru).

ANDRIANOVA Kristina Alexandrovna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Aircraft Manufacturing. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10, e-mail: tina_a@mail.ru).

АМИРОВА Лилия Минахмедовна — доктор химических наук, профессор кафедры «Производство летательных аппаратов». КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: amirovaliliyam@mail.ru).

AMIROVA Liliya Miniakhmedovna — Doctor of Science (Chemistry), Professor, Department of Aircraft Manufacturing. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10, e-mail: amirovaliliyam@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Габдрахманова Г.М., Хамидуллин О.Л., Андрианова К.А., Амирова Л.М. Реологические аспекты термомпрессования изделий из консолидированных пластин на основе термореактивных связующих. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 1, с. 98–111.

Please cite this article in English as:

Gabdrakhmanova G.M., Khamidullin O.L., Andrianova K.A., Amirova L.M. Rheological aspects in thermo-pressing the products made of consolidated plates based on the thermosetting binders. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 1, pp. 98–111.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие**

«Испытания ракетного оружия»

**Авторы: В.М. Кашин, Ф.В. Марушин, С.В. Медвецкий,
В.Д. Самарин, В.А. Хандогин**

Рассмотрены вопросы испытаний ракетного оружия. Показано, что процесс испытаний является составной частью проектирования и разработки образца ракетного оружия. Приведена классификация испытаний по видам и категориям, включающая в себя наземные и летные испытания, а также научно-исследовательские испытания, испытания на этапах опытно-конструкторской работы и серийного производства. Описаны методы, технические средства и оборудование для проведения испытаний ракетного оружия. Представлены фотоматериалы различных испытаний ракетного оружия, наглядно показывающие его функционирование.

Для студентов старших курсов, обучающихся по специальности 17.05.02 «Стрелково-пушечное, артиллерийское и ракетное вооружение», изучающих курсы «Испытания ракетного оружия», «Испытания ракетного и ствольного оружия». Пособие может быть полезно студентам смежных специальностей, аспирантам и инженерам.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>