

УДК 667.621

С.И. Мишкин<sup>1</sup>, С.С. Малаховский<sup>1</sup>

## **БЫСТРООТВЕРЖДАЕМЫЕ СВЯЗУЮЩИЕ И ПРЕПРЕГИ: ПОЛУЧЕНИЕ, СВОЙСТВА И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-32-40

*Представлен обзор о быстроотверждаемых связующих и препрегах, с помощью которых появляется возможность получения готового изделия за считанные минуты. Показано, что основными областями применения быстроотверждаемых связующих и препрегов является автомобильная промышленность, строительство и транспорт. Показано, что такие композиционные материалы имеют ряд преимуществ, в том числе экономических, при производстве мало- и крупногабаритных деталей. Приведены данные о компаниях-производителях и свойства выпускаемых ими марок быстроотверждаемых связующих и препрегов.*

**Ключевые слова:** быстроотверждаемые связующие, быстроотверждаемые препреги, прессовый метод формования углепластиков, RTM (Resin Transfer Molding), отверждение, температура стеклования.

S.I. Mishkin<sup>1</sup>, S.S. Malakhovskiy<sup>1</sup>

## **FAST CURING RESINS AND PREPREGS: RECEIVING, PROPERTIES AND AREAS OF APPLICATION (review)**

*In article presented a review about fast curing resins and prepregs by means of which there is possibility of receiving finished product in only a few minutes is provided. Showed, that the main scopes of fast curing resins and prepregs is automotive industry, construction and transport. Showed, that such composite materials have number of advantages, including economic, by production small and large-size details. Data on the manufacturing companies are provided in article and properties of brands let out by them fast curing resins and prepregs.*

**Keywords:** fast cure resins, fast cure prepregs, press method of forming CFRP, RTM (Resin Transfer Molding), hardening, glass temperature.

---

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

### **Введение**

За последние двадцать лет объем выпуска полимерных композиционных материалов (ПКМ) утроился, что объясняется постоянно растущим спросом как в гражданском, так и в военном секторах. В настоящее время в авиа- и машиностроительных отраслях предъявляются все более жесткие требования к производству ПКМ [1, 2]. К ним относятся: повышение эксплуатационных характеристик (таких как износостойкость, прочность и т. п.), снижение затрат на производство, высокие экологические требования (отказ от использования органических растворителей и исключение вредных для человека и окружающей среды соединений) и удешевление стоимости конечного продукта. Без перечисленных аспектов невозможно представить стабильный и растущий рынок [3, 4].

Для выполнения вышеуказанных требований в западных странах в последние годы стали разрабатывать быстроотверждаемые связующие и препреги, которые позволяют сократить в разы технологический цикл производства детали. При этом данные

ПКМ обладают высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Высокая производительность способствует уменьшению затрат на серийное производство, что является актуальной задачей, например, для автомобилестроения. Разработкой таких материалов и полуфабрикатов занимаются не только в странах Европы (Великобритания, Нидерланды, Бельгия), но также в США и Японии (компании Toho Tenax и Mitsubishi Rayon Co Ltd). Новые быстроотверждаемые препреги и изделия из них обладают комплексом уникальных свойств, таких как:

- продолжительность отверждения от 2 до 5 мин;
- высокая температура стеклования готового ПКМ – до 170°C;
- различные методы формования – пресс, автоклав, вакуумный мешок, RTM;
- подходят для автоматического раскроя;
- низкие затраты энергии (не нужно охлаждать форму и деталь);
- гладкая поверхность получаемых изделий;
- возможность выкладки изделий сложной геометрической формы;
- хранение препрега при комнатной температуре до 30 дней (6 мес при температуре -18°C).

Одним из направлений развития ПКМ на основе быстроотверждаемых связующих стало появление SMC-материалов, позволяющих в условиях средне- и крупносерийного производства получать изделия по традиционной прессовой технологии. SMC-материалы представляют собой листовые пресс-материалы на основе олигомеров (полиэфирной или винилэфирной смол), армированные коротковолокнистым наполнителем (преимущественно стеклянным), содержащие также те или иные сочетания специальных добавок. Продолжительность изготовления изделий из SMC-материалов составляет около 30 с на 1 мм толщины изделия благодаря уникальному составу быстроотверждаемого связующего. Широкий спектр доступных компонентов обеспечивает многообразие возможных комбинаций при создании SMC-материалов.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [3].

### **Способы создания быстроотверждаемых связующих**

Разработка быстроотверждаемых связующих является сложной задачей, пути решения которой зависят от технологии формования изделия и дальнейшего ее применения. Одной из актуальных задач, которая до сих пор не реализована российскими учеными, является создание быстроотверждаемого связующего для препрегов. Первые попытки создания быстроотверждаемых композиций для препреговой технологии предпринимались еще в конце XX века и продолжают в лидирующих экономиках мира. Непрерывное расширение использования термореактивных матриц (в основном эпоксидных и фенолформальдегидных) в сложных деталях конструкций автомобилей и самолетов стимулирует производителей к минимальным издержкам (минимизация продолжительности процесса отверждения) при максимальном объеме выпуска готовой продукции [5, 6].

Основной задачей в разработке быстроотверждаемых ПКМ является подбор необходимого отвердителя. От правильного выбора отвердителя зависят скорость протекания реакции, температура и методы переработки, а также хранение препрега и самого связующего.

В 1981 г. разработан катализатор для инициирования эпоксидной полимеризации. Катализатор, который состоял из алюминиевого комплекса и активного соединения кремния, образовывал кислоту Бренстеда и вызывал быстрое отверждение эпоксидной смолы при низких температурах [7, 8].

Важной задачей является увеличение жизнеспособности быстроотверждаемых связующих и препрегов. Срок хранения препрегов может достигать более 30 дней даже при комнатной температуре. В связи с этим возникла необходимость в создании капсулированных катализаторов – соединений внутри защищающей микросферы, которые не реагировали с функциональными группами смол при комнатных условиях, а высвобождались и вступали бы в реакцию отверждения при нагреве до определенной температуры.

В работе [9] авторы создавали микрокапсулы, содержащие алюминиевые комплексы (рис. 1), путем межфазной полимеризации изоцианата. Микрокапсулы покрывали слоем поли-(мочевинуретановой) смолы, которая разрушалась при температуре выше температуры стеклования ( $T_c$ ) и высвобождала каталитический комплекс в систему, содержащую эпоксидные смолы. Такие термочувствительные микрокапсулы, содержащие комплекс катализатора, сохраняли свою активность при комнатной температуре. Авторам удалось не только ускорить процесс отверждения, но и продлить срок хранения полученной системы.

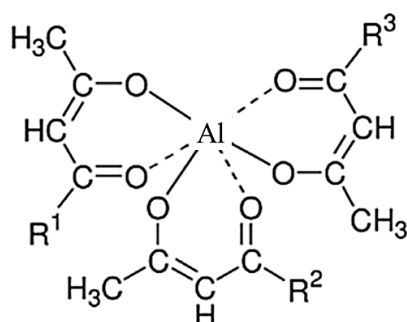


Рис. 1. Химическая структура алюминиевого комплекса ( $R^1$ ,  $R^2$ ,  $R^3$  соответственно  $-\text{OC}_2\text{H}_5$  или  $-\text{CH}_3$ )

Для формования углепластика методом RTM (Resin Transfer Molding) требуется, чтобы эпоксидное связующее имело низкую вязкость и длительное время гелеобразования при комнатной температуре для заполнения всей формы и быстрого отверждения гетеросистемы. Одновременно ставится задача по сокращению цикла отверждения, которая может быть решена благодаря использованию производных имидазола. В исследовании [10] авторы снижают вязкость системы до 0,25 Па·с и увеличивают время гелеобразования связующего путем добавления разбавителя диглицидилового эфира 1,4-бутандиола, а использование отвердителя-катализатора 1-бензил-2-метилимидазола сокращает продолжительность отверждения.

В работе [11] также использовали производные имидазола в качестве отвердителя. Авторы получили 1-(дифенилфосфинил)-1Н-имидазол (ДФФИО) путем синтеза дифенилфосфинил хлорида с имидазолом на катализаторах – 3-этиламино и дихлорметаном. Полученное вещество использовали в качестве отверждающего агента в эпоксидной смоле (диглицидиловый эфир бисфенола А). Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии установлено, что ДФФИО присоединяется к эпоксидным группам, заменяет гидроксильные группы, затем высвобождает один алкилзамещенный имидазол, который действует как активный катализатор в течение всего процесса отверждения. Отверждение эпоксидной системы составило 6,5 мин при температуре стеклования 155°C. Соединение 1-(дифенилфосфинил)-1Н-имидазол выступает как отличный латентный отверждающий агент для эпоксидных смол. Включение в 1-(дифенилфосфинил)-1Н-имидазол атомов фосфора придает отверждающимся эпоксидным матрицам дополнительную пожаробезопасность, выступая параллельно в качестве антипирена.

Анализ научно-технических литературных данных по используемым отвердителям в быстроотверждаемых связующих показал, что они могут быть капсулированы в защищающую микросферу либо представлять собой латентные отвердители. Представленные варианты отвердителей в быстроотверждаемых связующих являются возможными способами получения требуемых технологических характеристик. Составы всех быстроотверждаемых связующих и препрегов, которые широко представлены на рынке, являются коммерческой тайной производителя и достоверно неизвестно, какой тип отвердителя применяется в той или иной композиции.

### **Производители и области применения связующих и препрегов быстрого отверждения**

В настоящее время выпускается довольно широкий ассортимент связующих и препрегов быстрого отверждения в основном на эпоксидных (реже на фенолформальдегидных) смолах с углеродными и стеклянными наполнителями.

Во ФГУП «ВИАМ» имеется опыт разработки быстроотверждаемых связующих для препреговой технологии формования на основе фенолформальдегидных смол. Например, связующее марки РС-Н обладает комплексом физико-химических и технологических свойств на уровне зарубежных аналогов, таких как Cusom 799HE (компания Cytec Engineered Materials) и HexPly M41 (фирма Hexcel), которые применяются в качестве самозатухающих и слабодымящих материалов интерьера пассажирских самолетов. Стеклопрепреги на основе отечественного связующего РС-Н имеют ряд преимуществ, одним из которых является срок хранения: жизнеспособность – не менее 3 мес при температуре  $20\pm 5^\circ\text{C}$ , в то время как у зарубежных аналогов этот показатель не превышает одного месяца.

Дальнейшая модификация связующего РС-Н привела к разработке быстроотверждаемого фенолформальдегидного связующего марки ВСФ-16М для получения изделий из трехслойных сотовых панелей по технологии *crush core*. Отвердитель для данного фенолформальдегидного связующего обеспечивает сокращение время гелеобразования до 20 мин при температуре  $140^\circ\text{C}$  при сохранении жизнеспособности связующего в препреге при  $20\pm 3^\circ\text{C}$  в течение 4 мес [12]. Необходимо отметить, что физико-механические показатели трехслойной сотовой панели, изготовленной из препрегов на основе связующего ВСФ-16М методом прессового формования в ускоренном режиме, не уступают материалу, изготовленному по медленному режиму отверждения.

Таким образом, ФГУП «ВИАМ» обладает всеми необходимыми ресурсами и опытом для разработки и дальнейшего производства быстроотверждаемых связующих и препрегов на их основе, у которых будут еще меньшая продолжительность отверждения и повышенный комплекс физико-механических и эксплуатационных свойств материалов.

Применение углепластиков позволило снизить массу изделий, однако процесс формования одного изделия автоклавным или прессовым методом может затянуться до нескольких часов, что невыгодно, например, для автоконцернов. Поэтому у крупных зарубежных компаний, занимающихся разработкой ПКМ, уже имеется широкий ассортимент быстроотверждаемых связующих и препрегов на их основе. Основным способом формования изделий из данных препрегов является метод прямого прессования. Процесс производства изделий состоит из нескольких этапов:

- автоматический раскрой препрега;
- выкладка препрега с заданным количеством слоев;
- разогрев пакета-заготовки и отверждение его в пресс-формах в течение 2–5 мин;
- извлечение изделия и механическая обработка при необходимости.

Весь процесс автоматизирован и требует минимального количества человеческих ресурсов. Кроме того, изделие в пресс-форме не надо охлаждать, что позволяет уменьшить энергетические затраты. Создание такого типа связующего обеспечивает быстрый цикл производства изделия, а значит, и большой объем выпускаемой готовой продукции.

Компания Dow Automotive Systems разработала быстроотверждаемое эпоксидное связующее марки VORAFORCE 5300, которое подходит для получения препрегов на углеродных и стеклянных волокнах. Продолжительность отверждения этого связующего составляет ~2 мин. Температура стеклования готового ПКМ достигает 160°C. Препрег подходит для изготовления деталей стойки ветрового стекла, стойки задней крыши, полки крыши, порога и усилителя двери автомобиля [13].

Компания FTI имеет в своем каталоге материалов быстроотверждающийся препрег на основе фенолформальдегидного связующего марки FibaRoll. Данное связующее отверждается в течение 4 мин и относится к пожаробезопасным недымящим продуктам, в котором содержание формальдегида не превышает 0,01%. Это позволяет применять полученные изделия как в гражданской авиации, так и в автомобилестроении.

Компания Hexion выпустила целую серию быстроотверждаемых связующих. Например, связующее марки EPICOTE Resin TRAC 06170 способно отверждаться за 0,75–3 мин при 120–135°C. Связующее марки EPICOTE Resin TRAC 06150 отверждается за 5–10 мин при 110–120°C. Чем выше температура, тем меньше требуется времени до полного отверждения. Выпускаемые марки связующих подходят для формования методами RTM и LCM (Liquid Composite Molding) таких деталей, как детали рамы, днища кузова и полов автомобиля, а также элементов лицевой поверхности – бампера и крыши капота. Компания Hexion тесно сотрудничает с немецким автогигантом BMW. Автомобили BMW 7 серии имеют 16 деталей из углепластика – панели порогов, крыша, внешняя отделка дверей и т. д. [14].

В другой серии автомобилей BMW – M4 GTS – бельгийская компания Solvay уже внедрила в капот машины быстроотверждаемый препрег на связующем марки MTR 760 (рис. 2). Получаемая прессовым методом деталь легко обрабатывается, а поверхность изделия не нуждается в дополнительной обработке для нанесения краски, что значительно удешевляет процесс. Применение такого вида углепластика не только позволило сократить массу детали на 40% по сравнению с аналогичной деталью из алюминия, но и повысить производительность технологического цикла [15].



Рис. 2. Капот автомобиля BMW M4 GTS, выполненный из углепластика на быстроотверждаемом связующем марки MTR 760 компании Solvay

Еще одним успешным опытом внедрения быстроотверждаемых препрегов может служить компания Mitsubishi Rayon Co (MRC) Ltd (Япония). Компания MRC совместно с автопроизводителем Nissan Motor Co Ltd с 2007 г. вела разработку быстроотверждающегося препрега для замены алюминиевых деталей в автомобилях. Компания Mitsubishi после многолетнего исследования выпустила в 2012 г. препрег марки Pyrofil TR361 E250S и успешно внедрила его в наружную панель спорткара Nissan 2014 GT-R. Препрег перерабатывается в готовое изделие прессовым методом с продолжительностью отверждения всего 5 мин [16].

Компания Hexcel, которая является одним из крупнейших поставщиков препрегов авиационного назначения, также сотрудничает с европейскими автомобилестроительными компаниями, например, с такой как Audi AG. Быстроотверждаемый препрег марки HexPly M77 применяется для выпуска крестового держателя двигателя V8 в моторном отсеке в автомобилях Audi R8. Внедрение углепластика позволило обеспечить снижение массы детали на 15% по сравнению с предыдущей версией из алюминиевого сплава. Препрег отверждается при температуре 150°C в течение 3 мин. Готовые изделия при этом имеют температуру стеклования 125°C.

Помимо препрега быстрого отверждения марки HexPly M77 компания Hexcel выпускает широкий ассортимент полуфабрикатов для товаров спортивной индустрии, одним из которых является препрег углепластика марки HexPly M78. Данный препрег отверждается за 7 мин при температуре 120°C. Однако жизнеспособность препрега HexPly M78 в 3 раза меньше, чем у препрега HexPly M77, и составляет две недели при 23°C.

В табл. 1 приводятся основные зарубежные компании-изготовители быстроотверждаемых препрегов и связующих с условиями их формования и температурами стеклования отвержденных композиций.

Таблица 1

**Компании-производители быстроотверждаемых препрегов и связующих, условия их формования**

Компания	Страна	Марка препрега/ связующего	Свойства* и условия формования (давление и продолжительность)
Hexcel Corporation	США	Препрег HexPly M77 HF	$T_c=150^\circ\text{C}$ (0,6 МПа, 3 мин)
PRF Composite Materials	Великобритания	Препрег RP-570	$T_c=140^\circ\text{C}$ (1 МПа, 4 мин)
TenCate Corporate	Нидерланды	Препрег E732	$T_c=160^\circ\text{C}$ (0,6 МПа, 4 мин)
FTI Redefining Polymer Technology	Великобритания	Препрег FibaRoll (на фенолформальдегид- ном связующем)	$T_c=160^\circ\text{C}$ (0,6 МПа, 4 мин)
Hexion Inc.	США	Связующее EPICOTE Resin TRAC 06170	$T_c=145^\circ\text{C}$ (3 мин)
Solvay S.A.	Бельгия	Связующее MTR 760	$T_c=140^\circ\text{C}$ (5 мин)
Dow Automotive Systems	США	Связующее VORAFORCE 5300	$T_c=160^\circ\text{C}$ (2 мин)
SkyFlex SK Chemicals	Корея	Связующее L06	$T_c=140^\circ\text{C}$ (10 мин)
Mitsubishi Rayon Co Ltd	Япония	Препрег Pyrofil TR 361 E250S	Нет данных (5 мин)

\* Температура стеклования –  $T_c$ .

*Производители и области применения SMC-материалов*

К одному из видов быстроотверждаемых препрегов необходимо отнести SMC-материалы. Во ФГУП «ВИАМ» разработаны марки SMC-материалов на основе рубленого стеклянного волокна и винилэфирного и полиэфирного связующих. Полученные материалы обладают высоким уровнем сохранения эксплуатационных свойств, в том числе в условиях воздействия отрицательных и повышенных температур, влажности и ультрафиолетового излучения, а также характеризуются высокой пожарной безопасностью. SMC-препреги, разработанные во ФГУП «ВИАМ», характеризуются достаточной жизнеспособностью при хранении (более 90 сут), не требуют при формировании приложения высокого давления (давление прессования 10 МПа) и температуры. При рекомендуемой температуре формования 140–150°C продолжительность изготовления составляет не более 30 с на 1 мм толщины стенки изделия [17].

Основными областями применения SMC-материалов являются автомобилестроение (кузов, бампер), строительство (люки, ограждения), транспорт (железнодорожные вагоны, кабины) и электротехника (корпуса приборов).

Существует большое количество зарубежных производителей SMC-материалов, таких как фирмы Polynt и Menzolit (Италия), ВУК (Германия) и др. Материалы, разработанные во ФГУП «ВИАМ», по уровню упруго-прочностных и специальных свойств аналогичны разработкам ведущих мировых фирм (табл. 2).

Таблица 2

**Сравнение свойств зарубежных и разработанных во ФГУП «ВИАМ» SMC-материалов**

Свойства	Значения свойств для SMC-материалов	
	разработанных во ФГУП «ВИАМ»	зарубежных
Прочность при изгибе, МПа	143–174	117–152
Модуль упругости при изгибе, ГПа	11–13	8–15
Прочность при растяжении, МПа	59–78	55–73
Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	60–75	45–75
Горючесть	Трудногорющие	
Дымообразующая способность	Группы II–III (слабо- и среднедымящие)	

**Заключения**

Несмотря на то что в российских научных изданиях не так много публикаций, посвященных быстроотверждаемым связующим и препрегам, все больше научно-исследовательских предприятий страны начинают разработку подобных материалов. Анализ научно-технических литературных данных показал, что в настоящее время технология изготовления такого рода связующих и препрегов на их основе освоено рядом зарубежных компаний и с каждым годом находит все больше областей применения. Получаемые ПКМ не уступают по физико-механическим свойствам композиционным материалам, производимым на обычных полимерных матрицах медленного отверждения [18]. Внедрение быстроотверждаемых связующих и полуфабрикатов позволяет ускорить технологический процесс, повысить производительность, снизить энергетические затраты и расходный материал. Производство и применение угле- и стеклопрепрегов на данных связующих не требует покупки дополнительного специального оборудования, что является еще одним преимуществом, которое будет способствовать дальнейшему внедрению подобных материалов в различных отраслях народного хозяйства.

Необходимо отметить, что по данным работ [19], наибольшее применение ПКМ на основе углеродных волокон приходится на автомобилестроение (18%), аэрокосмическую отрасль (15%), а также спортивную индустрию (12%), которые являются

основными потребителями быстроотверждаемых препрегов (рис. 3). При снижении стоимости данных видов препрегов производители изделий из ПКМ будут отдавать предпочтение более энергоэффективным технологиям формования.

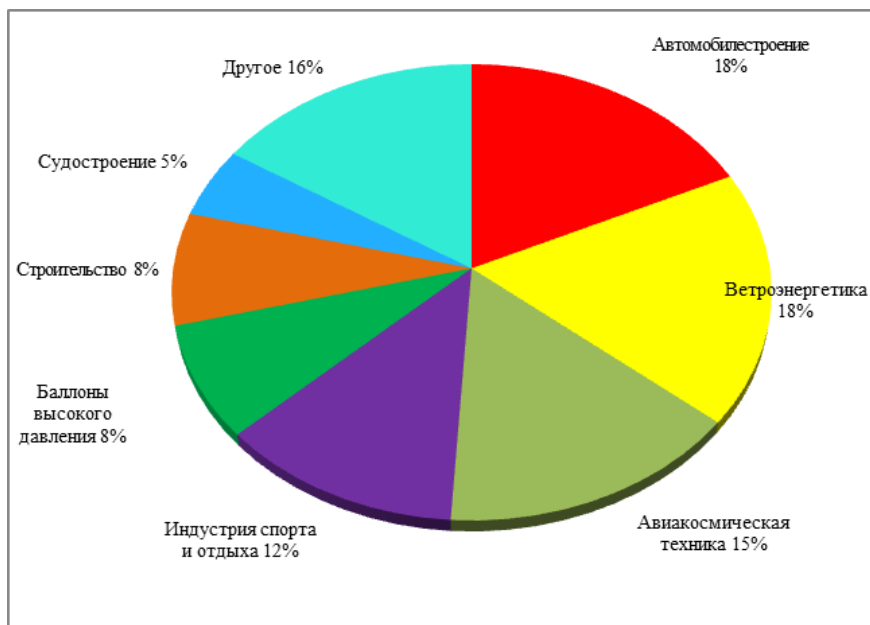


Рис. 3. Характерная мировая структура потребления углеродных материалов

Во ФГУП «ВИАМ» имеется перечень материалов, которые можно отнести к быстроотверждаемым, но существуют виды материалов, которые требуют разработки. Это касается препрегов с продолжительностью отверждения 2–5 мин. Специалисты ФГУП «ВИАМ» располагают всеми необходимыми материальными ресурсами и опытом для разработки быстроотверждаемых связующих и препрегов на их основе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2. №2. С. 37–42.
2. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов // Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8. №3–4. С. 24–42.
3. 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.
4. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
5. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
6. Донецкий К.И., Хрульков А.В. Принципы «зеленой химии» в перспективных технологиях изготовления изделий из ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S2. С. 24–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-24-28.
7. Hayase S., Ito T., Suzuki S., Wada M. Polymerization of cyclohexene oxide with Al(acac)<sub>3</sub>-silanol catalyst // Journal of Polymer Science. Polymer Chemistry Edition. 1981. Vol. 19. No. 10. P. 2541–2550.

8. Hayase S., Ito T., Suzuki S., Wada M. Polymerization of cyclohexene oxide with aluminum complex-silanol catalysts. Part III. Dependence of catalytic activity on bulkiness of silanol and its intramolecular hydrogen bond // *Journal of Polymer Science. Polymer Chemistry Edition*. 1981. Vol. 19. No. 11. P. 2977–2985.
9. Kamiya K., Suzuki N. A low-temperature fast curing latent catalyst microencapsulated in a porous resin structure // *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 2016. Vol. 68. P. 333–340.
10. Wang Y., Lakho D.A., Yao D. Effect of Additives on the rheological Properties of Fast Curing epoxy resins // *Journal of Silicate Based and Composite Materials*. 2015. Vol. 67. No. 4. P. 132–134.
11. Xu Y.-J., Wang J., Tan Y. et al. A novel and feasible approach for one-pack flame-retardant epoxy resin with long pot life and fast curing // *Chemical Engineering Journal*. 2018. Vol. 337. P. 30–39.
12. Застрогина О.Б., Швец Н.И., Постнов В.И., Серкова Е.А. Фенолформальдегидные связующие нового поколения для материалов интерьера // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 265–272.
13. Dow Automotive Systems. VORAFORC 5300 ultra-fast cure composite epoxy system [Электронный ресурс]. URL: <http://msdssearch.dow.com/> (дата обращения: 22.10.2018).
14. Hexion Responsible Chemistry. Epoxy Systems for Automotive Structural Components [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hexion.com/en-US/applications/composites/automotive/structural/> (дата обращения: 24.10.2018).
15. Solvay [Электронный ресурс]. URL: <https://www.solvay.com/en/press-release/solvay-launches-new-rapid-cure-resin-system-mtr-760-manufacture-new-bmw-m4-gts-hoods> (дата обращения: 26.10.2018).
16. Malnati P. Ultra-thin, preformed laminate designs enable CFRP decklid manufacture at lower-than-expected mass and at cycle times approaching mass-production speed // *Composites World*. 2015. Vol. 1. No. 6. P. 62–64.
17. Коваленко А.В., Тундайкин К.О., Лукина А.И., Соколов И.И. Структура и свойства SMC-материалов на основе эпоксивинилэфирного и полиэфирного олигомеров // *Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн.* 2017. №1 (25). Ст. 05. URL: <http://materialsnews.ru> (дата обращения: 01.04.2019).
18. Groh F., Kappel E., Hühne C., Brymerski W. Investigation of fast curing epoxy resins regarding process induced distortions of reinforced composites // *Composite Structures*. 2018. Vol. 207. P. 923–934.
19. Тюнина А.В. Композитные материалы: производство, применение, тенденции рынка // *Полимерные материалы*. 2018. №2. С. 27–29.