

УДК 678.7

РАЗРАБОТКИ ФГУП «ВИАМ» В ОБЛАСТИ РАСПЛАВНЫХ СВЯЗУЮЩИХ ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е. Н. КАБЛОВ, Л. В. ЧУРСОВА, А. Н. БАБИН, Р. Р. МУХАМЕТОВ⁺, Н. Н. ПАНИНА

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» ГНЦ РФ, ул. Радио, д. 17, г. Москва, 105005, Россия

Представлены разработки современных расплавных связующих для полимерных композиционных материалов с рабочей температурой до 350 °С. Описаны основные особенности и подходы, реализованные при разработке связующих, как для автоклавной технологии получения изделий, так и для безавтоклавных технологий.

Ключевые слова: полимерное связующее, полимерный композиционный материал, препрег, инфузия, ИК-спектроскопия, реология.

Введение

Переход России к новому технологическому укладу невозможен без развития материалов и индустрии полимерных композиционных материалов (ПКМ). Для обеспечения соответствия повышенным техническим требованиям, предъявляемым к создаваемым ПКМ необходимо использование передовых полимерных связующих, разработка которых невозможна без применения современных тенденций в области материаловедения [1, 2]. Создаваемые полимерные связующие должны максимально обеспечить реализацию прочностных свойств армирующих материалов и теплостойкости, сочетать в себе комплекс технологических характеристик, иногда на первый взгляд совершенно несовместимых с химической точки зрения, но без соответствия которым становится невозможным получение изделия. Кроме того, связующие и технологии их производства должны быть основаны на принципах «зеленой химии» для снижения уровня нагрузки на биосферу. Основные направления развития полимерных связующих на перспективу до 2030 года были сформулированы в разработанных ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ стратегических направлениях развития материалов и технологий их переработки до 2030 года [3]. Данная работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.1 «Связующие для полимерных композиционных материалов конструкционного и специального назначения».

В соответствии с принципами «зеленой химии» уже на стадии разработки составов и создании технологии синтеза новых полимерных связующих приходится учитывать возможность возникновения отрицательных экологических воздействий на

окружающую среду. Поэтому в состав современных полимерных связующих не включаются токсичные легколетучие органические растворители, что уменьшает выброс в атмосферу вредных веществ и снижает пожарную опасность производства [4, 5].

Характеристика связующих для ПКМ

Полимерное связующее ВСЭ-1212

В производстве композитов для изделий аэрокосмической промышленности и других сложных технических систем технология автоклавного формования препрегов (предварительно пропитанных термореактивной смолой армирующих наполнителей) традиционно занимает основное место, так как обеспечивает получение высокопрочных материалов с пониженной пористостью. В последнее время активно развиваются энергосберегающие и экономически эффективные безавтоклавные технологии. Для создания перспективных ПКМ по препреговой технологии в ВИАМ разработано термореактивное эпоксидное связующее марки ВСЭ-1212, которое способно формировать в процессе отверждения полимерную матрицу с рабочей температурой до 120 °С. Полимерная матрица характеризуется высокими физико-механическими характеристиками (прочностью при растяжении не менее 90 МПа и относительным удлинением при разрыве 3–4%), повышенной вязкостью разрушения и необходимыми для переработки в ПКМ технологическими характеристиками. Базовые компоненты связующего ВСЭ-1212 получены модифицированием эпоксидных олигомеров (ЭО).

⁺— автор, с которым следует вести переписку. E-mail: mukhametovr@viam.ru

Эпоксидные олигомеры, получаемые прямым эпоксидированием, в своей структуре имеют гидроксильные группы, которые оказывают негативное воздействие на стойкость полимерных матриц к тепловлажностному старению. Гидроксильные группы можно использовать в качестве активных центров для увеличения функциональности эпоксидных олигомеров и повышения густоты сетчатой структуры полимерной матрицы.

Одним из способов такой модификации является использование взаимодействия эпоксидных олигомеров с полиизоцианатом. Такой подход описывался в работах [6–8], но он не был применен к полимерным матрицам на основе эпоксирезорциновых олигомеров, обладающих максимальными прочностными показателями среди эпоксидных олигомеров. Процесс взаимодействия эпоксидных олигомеров с изоцианатами может приводить к образованию нескольких типов продуктов реакции: карбодиимиды, уретаны, изоцианураты (рис. 1). Продукт реакции определяется температурой синтеза, строением исходных олигомеров и наличием в композиции катализатора.

Наиболее интересным направлением модифицирования эпоксидных олигомеров изоцианатами для материалов с рабочими температурами до 150 °С является получение эпокси-уретановых олигомеров разветвленной структуры (рис. 2).

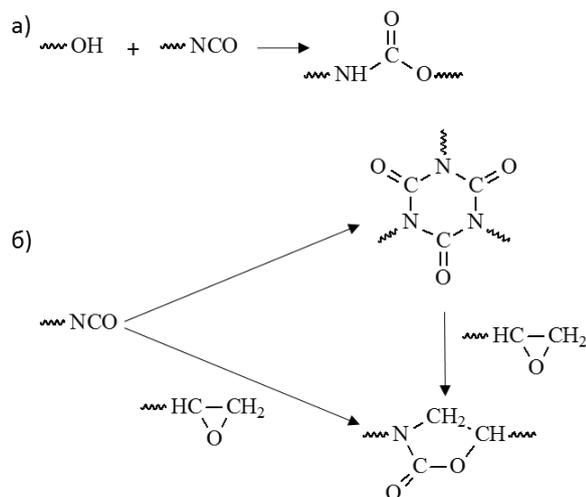


Рисунок 1 – Схема взаимодействия изоцианатных групп с функциональными группами эпоксидных олигомеров

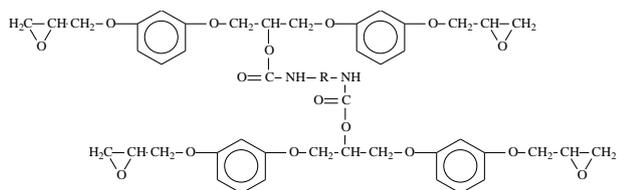


Рисунок 2 – Структура эпоксиуретанового олигомера

Исследования продуктов реакции эпоксидированного резорцина и полиизоцианата без применения катализатора показали, что наряду с уретановыми структурами могут образовываться оксазолидиноновые структуры при температурах до

120 °С, что не характерно для этой реакции. Методами ИК-спектроскопии установлено, что наряду с характеристическими пиками уретановых групп 1730–1735 см⁻¹ в спектрах модифицированного эпоксирезорцинового олигомера проявляются полосы 1750–1760 см⁻¹, характерные для оксазолидиноновых структур (рис. 3).

В зависимости от молекулярного состава исходного эпоксирезорцинового олигомера и температуры реакции можно регулировать в продукте реакции соотношение уретановых и оксазолидиноновых структур. Для повышения стойкости к тепловлажностному воздействию необходимо в первую очередь блокировать гидроксильные группы и повысить функциональность эпоксидных олигомеров, поэтому реакция с полиизоцианатами должна направляться в сторону образования уретановых мостиков между молекулами эпоксидного олигомера. Продукты с оксазолидиноновыми структурами в эпоксидных олигомерах могут быть востребованы при создании полимерных матриц с теплостойкостью до 200 °С.

Проведенные исследования позволили регламентировать температурные параметры процессов производства связующего с целью получения эпоксиуретановых олигомеров как основного компонента связующего.

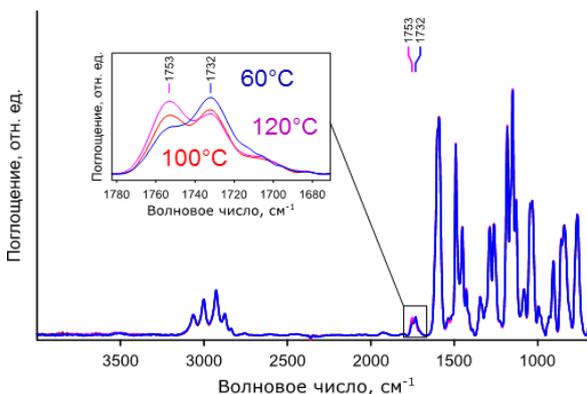


Рисунок 3 – ИК-спектр модифицированных эпоксирезорциновых олигомеров, полученных при 60, 100 и 120 °С

Эпокси-полиарилсульфоновые связующие

Получение ПКМ для сложных технических систем невозможно без обеспечения достаточно высокой ударо- и трещиностойкости полимерной матрицы. Основной подход, используемый для обеспечения подобных свойств – это использование термопластичных олигомеров и полимеров. Так при разработке связующего ВСЭ-1212 использованы полиарилсульфоны (рис. 4), созданные и освоены в производстве ОАО «Институт пластмасс имени Г.С. Петрова».

Важными особенностями применения термопластичных модификаторов являются получение стабильных расплавов термопластов в эпоксидных олигомерах и обеспечение образования непрерывной фазовой морфологии в отвержденной полимерной матрице.

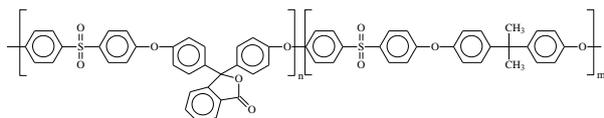


Рисунок 4 – Структурная формула полиарилсульфона

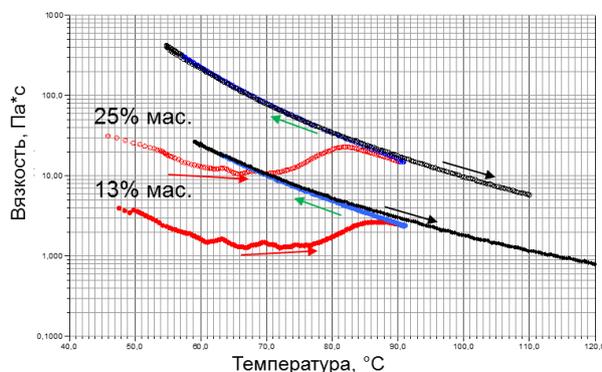


Рисунок 5 – Зависимость вязкости смеси ЭД-20 с ПСФФ-30 (13 и 25 мас.%) от температуры в условиях циклического нагрева–охлаждения со скоростью 2 °С/мин.

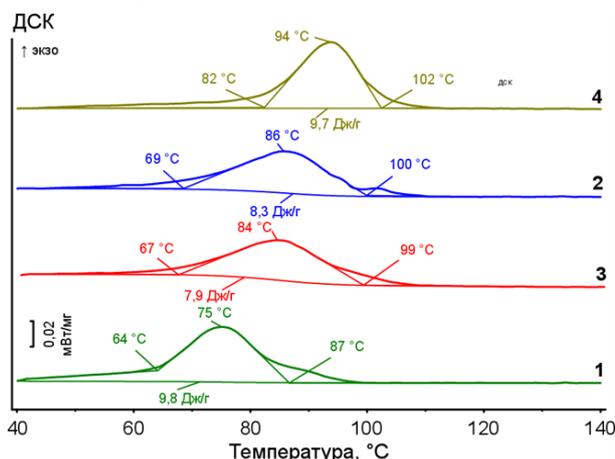


Рисунок 6 – Тепловые эффекты при совмещении полиарилсульфонов с эпокси-диановым олигомером (1 – ЭО / ПСК-1; 2 – ЭО / ПССФ-30; 3 – ЭО / ПССФ-70; 4 – ЭО / ПССФ-90)

Процесс растворения термопластичных модификаторов изучали реологическим методом и с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Проведенные исследования показали, что при совмещении полиарилсульфонов с эпоксиолигомерами наблюдается S-образный переход на зависимости вязкости от температуры при динамическом режиме нагрева (рис. 5). Изменение вязкости дисперсной системы эпоксидный олигомер-полиарилсульфон связано с процессом взаимодиффузии эпоксидного олигомера и полиарилсульфона, при котором вокруг частиц полиарилсульфона образуются концентрационные градиенты, чья протяженность которых определяется размером частиц и временем процесса. При диффузии модификатора в эпоксидный олигомер происходит увеличение вязкости дисперсионной среды и, наряду с этим, уменьшается размер частиц дисперсной фазы полиарилсульфона. Эти процессы приводят к изменениям вязкости системы до момента образования гомогенного раствора. После

растворения полиарилсульфона образуются стабильные расплавы, которые не расслаиваются при повторных циклах нагрева–охлаждения. Температурные интервалы этого процесса подтверждены ДСК исследованиями (рис. 6). Установлено, что при увеличении количества карбовых групп в полиарилсульфоне температура совмещения смещается в область более высоких значений. По результатам выполненных исследований определены оптимальные технологические параметры изготовления связующих.

Подбором термопластичных модификаторов, обеспечивающих образование непрерывной фазовой морфологии полимерной матрицы удалось сформировать высокопрочный и одновременно теплостойкий сетчатый полимер с оптимальной фазовой морфологией, в котором различные структурные фрагменты полимерной матрицы определяют ее функции. Жесткоцепные фрагменты с большими временами релаксации, выполняющие роль молекулярного каркаса, обеспечивают высокую теплостойкость, а также требуемые упругие и диссипативные свойства полимерной матрицы, реализуя различные механизмы замедления роста трещины. Более подвижные фрагменты создают релаксацию остаточных внутренних напряжений в материале. Оптимизация липкости связующего позволила реализовать автоматизированную выкладку препрега и тем самым обеспечить переход на новый уровень реализации технологии изготовления изделий автоклавным методом [9; 10].

Разработанное ВИАМ связующее ВСЭ-1212 обеспечило создание целого ряда углепластиков ВКУ-25, ВКУ-28, ВКУ-29, ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48, которые применяются для изготовления ряда агрегатов мотогондолы двигателя ПД-14.

Циан-эфирные связующие

Постоянно повышающийся уровень требований к рабочим температурам применения композитов уже не может быть обеспечен только традиционными связующими на основе эпоксидных, фенолоформальдегидных, полиэфирных, олигоимидных и т.п. смол. Одним из наиболее перспективных направлений решения задач создания полимерных материалов для работы при температурах 200 °С и выше представляется получение связующего реакцией полициклотримеризации мономеров, содержащих две и более функциональные группы с кратными связями между гомо- и гетероатомами, которая приводит к образованию сшитой трехмерной структуры с одинаковыми межузловыми фрагментами и устойчивыми шестичленными ароматическими карбо- и гетероциклами в качестве узлов полимерной сетки [11]. Реакция полициклотримеризации дициановых эфиров протекает с образованием сшитых полимеров (рис. 7).

Для полициклотримеризации дицианатов с образованием сшитых полимеров характерна высокая селективность и практически стереометрическая конверсия N≡C–O–групп, отличающая их от других функциональных групп (нитрильная, изоцианатная,

этинильная и др.). Все это способствует осуществлению «чистой» малодфектной полициклотримеризации и образованию частосетчатых полимеров регулярной химической структуры.

Разработка способа получения 1,3,5-триазинсодержащего связующего заключалась, прежде всего, в проведении исследований по оптимизации условий частичной циклотримеризации арилдицианата с целью получения олигоцианурата – связующего, обеспечивающего требуемый комплекс технологических свойств (жизнеспособность, липкость, вязкость, содержание реакционных групп, скорость химической реакции и др.).

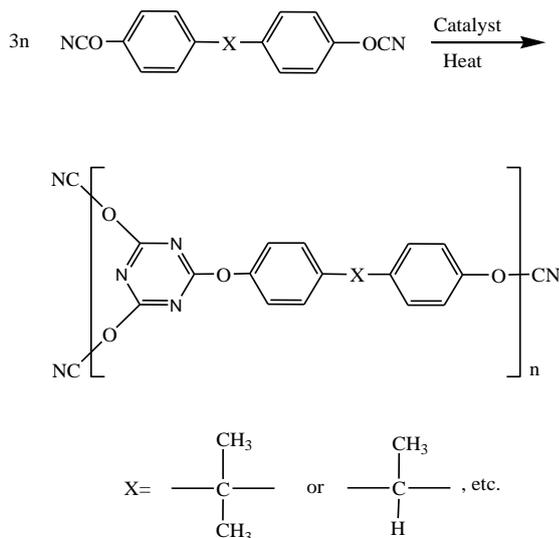


Рисунок 7 – Схема реакции полициклотримеризации дицианового эфира

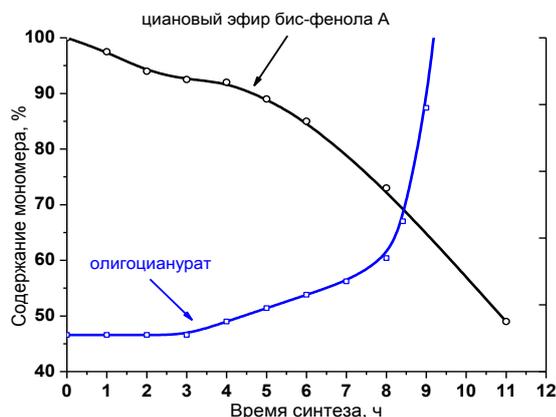


Рисунок 8 – Зависимость изменения содержания цианового эфира бис-фенола А и олигоцианурата от времени синтеза при 145 °С

Процесс олигоциклотримеризации исследован методом обращено-фазовой и гель-проникающей хроматографии. На основе полученных данных рассчитана кинетика расходования дицианата и образования олигоцианурата в процессе синтеза (рис. 8).

Анализ зависимостей содержания функциональных групп и S-образный ход кинетической кривой свидетельствует об автокаталитическом характере исследуемой реакции, скорость которой существенно возрастает по мере увеличения в реакционной смеси

концентрации продуктов циклотримеризации арилдицианата (димеров и тримеров), причем максимальное ускорение наблюдается уже после 4 часов синтеза при 145 °С и 20% конверсии N≡C–O–групп мономера.

В ИК-спектрах полученных образцов регистрируется постепенное уменьшение интенсивности полос поглощения валентных колебаний N≡C–O–групп при 2236–2270 см⁻¹ и появление интенсивных полос поглощения в области 1564 и 1364 см⁻¹, характерных для триазинового цикла (рис. 9).

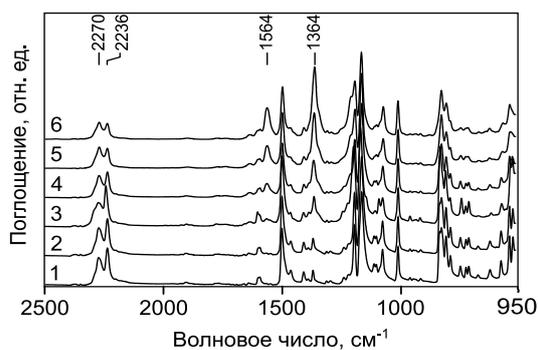


Рисунок 9 – ИК-спектр исходного дицианового эфира бис-фенола А (1), после термообработки при 145 °С в течение 2 ч (2), 4 ч (3), 6 ч (4), 8 ч (5) и 11 ч (6)

Разработанный метод синтеза триазинсодержащего полимера позволил получать его в виде высоковязкой смолообразной массы, хорошо растворимой в кетонах, сложных эфирах, спиртах, ароматических углеводородах. С использованием цианового эфира бисфенола А разработан ряд полициануратных связующих марок ВСТ-1208, ВСТ-1210, ВСЦ-14, ВСТ-32, которые перерабатываются по современным препретовым, инфузионным технологиям и обеспечивают работоспособность ПКМ до 200 °С.

Отверждение разработанных связующих происходит в результате дальнейшей циклотримеризации N≡C–O–групп и контролируется методом ИК-спектроскопии по уменьшению интенсивности полос поглощения цианатных групп и увеличению полос поглощения характерных для триазинового цикла. Отверждение протекает без выделения каких-либо низкомолекулярных продуктов реакции, что позволяет получать монолитные матрицу и ПКМ на ее основе. Режим отверждения в температурном диапазоне 150–220 °С позволяет полностью реализовать потенциальные возможности термореактивного связующего и оптимизировать плотность швов.

Углепластик на полициануратном связующем используется при разработке основных силовых конструкций перспективных изделий: пылезащитное устройство и переходный канал вертолетного двигателя нового поколения, детали входного направляющего аппарата компрессора авиационного газотурбинного двигателя.

На основе цианового эфира, эпоксиолигомера и полых стеклянных микросфер разработан сферопластик (заполнитель) для интегральных конструкций. Разработанный материал может быть использован

также в качестве изолирующего материала для трубопроводов, в судостроении – как композиционный каркасный компонент [12].

Фталонитрильные связующие

Создание нового поколения термостойких связующих с температурой эксплуатации до 400 °С требует разработки уникальных полимерных матриц, сочетающих высокие прочностные свойства и способность к эксплуатации на уровне, предельном для органических полимеров. Известные в настоящее время термостойкие связующие (PMR-15, RP-46, Thermid и др.) отверждаются по поликонденсационному механизму с выделением низкомолекулярных продуктов (вода, спирт и т.п.), что приводит к получению ПКМ с высокой пористостью, устранение которой требует применения сложных технологических приемов. В конце прошлого века был предложен перспективный класс термостойких полимерных материалов на основе дифталонитрилов, отверждающихся без выделения летучих продуктов и способных перерабатываться по технологии пропитки под давлением и вакуумной инфузии. В качестве мономеров для их синтеза наиболее часто используются соединения, содержащие концевые фталонитрильные фрагменты (рис. 10).

Полимеризация фталонитрилов осуществляется по нитрильным $N\equiv C$ -группам с образованием, главным образом, полииминоизоиндолининовых и триазинных структур [13], а также небольшое количество фталоцианинов, содержание которых лимитировано наличием в системе восстановителей (рис. 11).

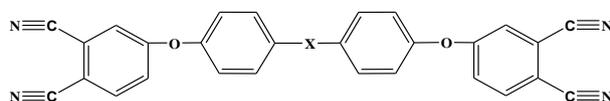


Рисунок 10 – Структурная формула фталонитрила

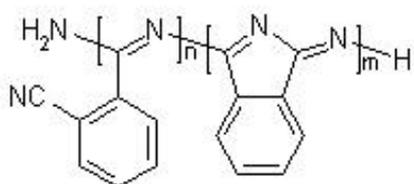


Рисунок 11 – Структурная формула продуктов полимеризации фталонитрилов

В результате проведенных в ВИАМе исследований разработан состав порошкового фталонитрильного связующего марки ВСН-31, который после расплавления образует низковязкую подвижную жидкость и перерабатывается в пластики безавтоклавным методом [14].

Исследование отверждения связующего проводили методом ИК-спектроскопии по изменению интенсивности полосы поглощения нитрильных $C\equiv N$ -групп при 2232 см^{-1} . По результатам термогравиметрического анализа (ТГА) температура начала деструкции отвержденного связующего ВСН-31 составляет 520 °С как в окислительной, так и в инертной средах (рис. 12), при этом методом ДСК в

обоих случаях фиксируется экзотермический тепловой эффект. Сказанное свидетельствует о том, что основные процессы при разложении полимерной матрицы происходят без участия кислорода воздуха.

Скорость отверждения и плотность сшивки контролируется температурой и концентрацией отвердителя. Температура начала деструкции отвержденного фталонитрила составляет 520 °С как в окислительной, так и в инертной среде. Полученный углепластик может эксплуатироваться до 350 °С, высокое коксовое число (до 75%), водостойкость и негорючесть открывают возможность его использования в теплозащитных элементах, лопатках газотурбинных двигателей и других изделиях.

Необходимо отметить, что отверждение связующего протекает без выделения каких-либо газообразных продуктов, позволяя тем самым получать качественные ПКМ без видимых дефектов. Отсутствие в составе высококипящих органических растворителей, обеспечивает экологическую безопасность технологии получения ПКМ.

Разработанные углепластики марки ВКУ-38ТР и ВКУ-38ЖН на основе связующего ВСН-31 применены при изготовлении элементов рабочего колеса центробежного компрессора, теплонагруженных деталей и авиационных конструкций. Углепластик марки ВКУ-38ЖН рекомендуется для применения в деталях, изготавливаемых методом намотки (втулки, каналы, трубопроводы для топлива и смазок, баллоны высокого давления и другие тела вращения), углепластик ВКУ-38ТР – для изготовления теплонагруженных деталей и агрегатов в конструкции двигателя.

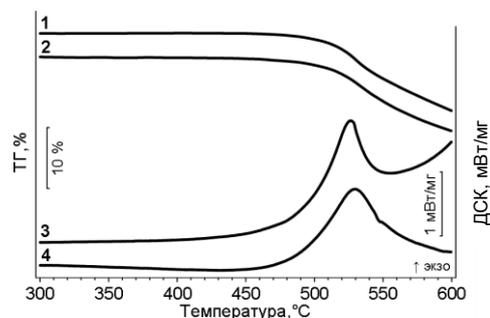


Рисунок 12 – Кривые ТГА и ДСК отвержденного связующего ВСН-31 в атмосфере воздуха (1, 3) и азота (2, 4)

Дальнейшее развитие технологии полимерных связующих для конструкционных материалов требует снижения издержек при их производстве материалов и получения материалов с дополнительными функциями. Пути снижения затрат на изготовление изделий из ПКМ может являться: снижение температур полимеризации без потери теплостойкости и механических характеристик, использование альтернативных способов отверждения, создание связующих для безавтоклавных технологий. Важным направлением регулирования свойств полимерных матриц является использование наночастиц в качестве микроармирующих компонентов и агентов структурирующих полимерную матрицу [15].

Одним из направлений функционального развития полимерных матриц является придание им способности к самозалечиванию [16–18].

Перспективные работы необходимо проводить во взаимосвязи с фундаментальными работами институтов Российской академии наук, а также в непосредственном контакте с разработчиками изделий из композиционных материалов. Такой подход позволит связать воедино научные подходы и требования конечного пользователя, что обеспечит создание востребованных материалов и технологий.

Выводы

В результате проведенных исследований в ФГУП ВИАМ разработаны полимерные связующие для пластиков конструкционного назначения. В качестве основы связующих использованы эпоксидные смолы, циановые эфиры и фталонитрилы. Полученные материалы обладают комплексом улучшенных эксплуатационных свойств (теплостойкость, прочность, удлинение, вязкость разрушения и др.) и работоспособны в интервале температур от -60 до 350 °С. Модифицирование терморезистивных полимеров различными соединениями (изоцианаты, полиарилсульфонаты) и использование специальных катализаторов позволяют регулировать свойства связующих, повысить трещиностойкость и улучшить переработку по современным технологиям. Оптимизация и регламентирование температурно-временных процессов синтеза связующих проведена с использованием современных методов термического, хроматографического и спектрального анализа.

Обозначения

ДСК – дифференциальная сканирующая калориметрия, ПКМ – полимерный композиционный материал, ТГА – термогравиметрический анализ, ФГУП ВИАМ – Федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, ПСК – полисульфон клеевой, ПСФФ – полисульфон фенолфталеидный, ЭО – эпоксидный олигомер.

Литература

- Kablov, E.N. Prospects of using carbonaceous nanoparticles in binders for polymer composites / E.N. Kablov, S.V. Kondrashov, G.Y. Yurkov // *Nanotechnologies in Russia*. – 2013. – Т. 8, № 3–4. – С. 163–185.
- Каблов, Е.Н. России нужны материалы нового поколения / Е.Н. Каблов // *Редкие земли*. – 2014. – №3. – С. 8–13.
- Каблов, Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» / Е.Н. Каблов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – №1 (34). – С. 3–33.
- Anastas, P.T. *Green Chemistry: Theory and Practice* / P.T. Anastas, J.C. Warner. – New York: Oxford University Press, 1998. – P. 30.
- Anastas, P.T. The role of catalysis in the design, development, and implementation of green chemistry / P.T. Anastas, L.B. Bartlett, M.M. Kirchhoff, T.C. Williamson // *Catalysis Today* – 2000. – 55 (1–2). – P. 11–22.
- Лапицкий, В. А. Физико-механические свойства эпоксидных полимеров и стеклопластиков. / В. А. Лапицкий, А. А. Крицук. – Киев: Наукова думка, 1986. – 96 с.
- Сычева, М.В. Модификация эпоксидных материалов изоцианатами / М.В. Сычева, Р.М. Гарипов, Р.Я. Дебердеев // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2009. – № 6. – С. 193–198.
- Kadurina, T.I. Studies of interactions in oligomeric epoxy resin-isocyanate systems / T.I. Kadurina, V.A. Prokopenko, S.I. Omelchenko // *Eur. Polym. J.* – 1986. – Vol. 22., № 11. – P. 865–870.
- Мухаметов, Р.Р. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения / Р.Р. Мухаметов, К.Р. Ахмадиева, М.А. Ким, А.Н. Бабин. // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – №5. – С. 260 – 265.
- Бабин, А.Н. Связующие для полимерных композиционных материалов нового поколения / А.Н. Бабин // *Труды ВИАМ*. – 2013. – №4. – Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 09.02.2016 г.).
- Мухаметов, Р.Р. Получение термостойких полимерных матриц по реакции полициклотримеризации циановых эфиров / Р.Р. Мухаметов, Ю.И. Меркулова, Е.В. Долгова, М.И. Душин // *Клеи. Герметики. Технологии*. – 2014. – № 5. – С. 10–14.
- Соколов, И.И. Многослойные конструкции со сферопластиками для изделий авиационной техники / И.И. Соколов, Д.И. Коган, А.Е. Раскутин, А.Н. Бабин, А.А. Филатов, Б.Б. Морозов // *Конструкции из композиционных материалов*. – 2014. – № 1 (133). – С. 37–42.
- Шимкин, А.А. Исследование процесса отверждения дифталонитрильного связующего / А.А. Шимкин, С.А. Пономаренко, Р.Р. Мухаметов // *Журнал прикладной химии*. – 2016. – Т. 89, № 2. – С. 256–264.
- Мухаметов, Р.Р. Фталонитрильное связующее для термостойких композиций / Р.Р. Мухаметов, А.А. Шимкин, А.И. Гуляев, А.И. Кучеровский // *Материаловедение*. – 2015. – № 11. – С. 48–53.
- Акатенков, Р.В. Влияние малых количеств функционализированных нанотрубок на физико-механические свойства и структуру эпоксидных композиций / Р.В. Акатенков, В.Н. Алексакин, И.В. Аношкин, А.Н. Бабин, В.А. Богатов, В.П. Грачев, С.В. Кондрашов, В.Т. Минаков, Э.Г. Раков // *Деформация и разрушение материалов*. – 2011. – №11. – С. 35–39.
- Syrett, J.A. Self-healing and self-mendable polymers / J. A. Syrett, C. R. Becer and D. M. Haddleton // *Polym. Chem.* – 2010. – P. 978–987.
- Blaiszik, B. J. Self-Healing Polymers and Composites / B. J. Blaiszik, L. B. Kramer, S. C. Olugebefola, J. S. Moore, N. R. Sottos and S. R. White // *Annu. Rev. Mater. Res.* – 2010. – P. 179–211.
- Wu, D.Y. Self-healing polymeric materials: a review of recent developments / D.Y. Wu, S. Meure, D. Solomon // *Prog. Polym. Sci.* – 2008. – 33(5) – P. 479–522.

Kablov E.N., Chursova L.V., Babin A.N., Mukhametov R.R., Panina N.N.
FSUE "VIAM" solvent-free binders for polymer composite materials

The development of the modern free solvent binders for polymer composite materials with operating temperatures up to 350°C is presented. The basic features and approaches, which were realized in the development of binders, are described both for autoclave technology and for non-autoclave technologies.

Keywords: polymeric binder, polymer composite material, prepreg, infusion, IR-spectroscopy, rheology.

Поступила в редакцию 21.03.2016.