

УДК 667.621

А.И. Ткачук¹, И.В. Терехов¹, Я.М. Гуревич¹, А.Н. Кудрявцева¹

**ПРИМЕНЕНИЕ БИСМАЛЕИМИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО
МАРКИ VST-57 ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕПЛОСТОЙКИХ
РАЗМЕРОСТАБИЛЬНЫХ ОСНАСТОК
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-32-40

Рассмотрены основные физико-химические, термомеханические и упруго-прочностные характеристики разработанного во ФГУП «ВИАМ» бисмалеимидного связующего марки VST-57, перерабатываемого по инжекционной технологии. Приведены результаты исследования отвержденных отливок связующего в условиях старения в диапазоне температур от 200 до 300 °С в течение 500 ч при каждой температуре, определены их термостойкость и механические свойства. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) исследованы кинетические параметры процесса отверждения и выбран оптимальный ступенчатый режим отверждения связующего марки VST-57. На изготовленных образцах стекло- и углепластиков измерен температурный коэффициент линейного расширения в диапазоне температур от 20 до 250 °С. Образцы углепластика подвергались термоциклированию (100 циклов при температурах 50–250 °С) и испытаны на теплофизические и механические характеристики.

Ключевые слова: бисмалеимидное связующее, теплостойкие размеростабильные оснастки, температура стеклования, вакуумная инфузионная технология, углепластики, стеклопластики.

А.И. Tkachuk¹, I.V. Terekhov¹, Ya.M. Gurevich¹, A.N. Kudryavtseva¹

**APPLICATION OF BISMALLEIMIDE VST-57 BINDER
FOR OBTAINING HEAT-RESISTANT DIMENSIONALLY
STABLE MOLDS FROM POLYMER COMPOSITE MATERIALS**

In this paper, we consider the main physicochemical, thermomechanical, and elastic-strength characteristics of the bismaleimide VST-57 binder developed by FSUE «VIAM» and processed by injection technology. There are presented the results of the study of cured binder castings under aging conditions in the temperature range of 200–300 °C for 500 hours at each temperature; their heat-resistance and mechanical properties were determined. The kinetic parameters of the curing process were investigated by the DSC method and the optimal step curing mode of the VST-57 binder was selected. On the manufactured samples of glass and carbon fiber reinforced polymer materials the thermal coefficient of linear expansion was measured in the temperature range from 20 to 250 °C. The carbon fiber reinforced polymer samples underwent thermal cycling (100 cycles at temperature of 50–250 °C) and were tested for their thermal and mechanical characteristics.

Keywords: bismaleimide binder, heat-resistant dimensionally stable molds, glass transition temperature, vacuum infusion technology, carbon and fiberglass reinforced polymer materials.

¹Федеральное 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

Системы на основе бисмалеимидных смол представляют собой относительно молодой класс термореактивных олигомеров, которые в настоящее время получили признание в промышленности, так как сочетают ряд уникальных свойств, в том числе превосходное сохранение механических характеристик при повышенных температурах и во влажных

средах, а также достаточно стабильных диэлектрических свойств в широком интервале температур [1–4].

Благодаря этому бисмалеимидные связующие являются одними из наиболее распространенных термореактивных полиимидов. На современном этапе мировой рынок бисмалеимидов (БМИ) оценивается в >140 млн долл. Глобальные объемы производства выросли на

~1,77% в 2013–2017 гг. Отрасль его потребления в основном ориентирована на изготовление таких материалов, как композиты, клеи, изоляционные материалы, микроэлектроника и формовочные материалы.

До 2017 г. Европа и США в целом являлись доминирующими производителями и экспортерами бисмалеимидов. На долю таких четырех ведущих производителей, как международная компания Cytec Solvay Group, Атул (Индия), 3М (США), ХОС-Техник Vertriebs-und Produktions GmbH (Германия), в 2017 г. приходилось 59,68% рынка. Мировое производство БМИ в это время достигло 1269,4 млн тонн. В настоящее время во всем мире ведущими производителями данных смол и связующих на их основе являются компании Evonik Industries AG (Германия), Huntsman International LLC (США), Hexcel (США) [5–7]. Однако большой интерес и внимание к бисмалеимидам проявляются и на развивающихся рынках – в Китае и Индии.

Основными компонентами БМИ-связующих являются бисмалеимидные мономеры – вещества, получаемые в результате взаимодействия диаминов и малеинового ангидрида в присутствии катализатора в толуоле, диметилформамиде, диметилацетомиде и т. д. Самая большая область потребления бисмалеимидов – это полимерные композиционные материалы (ПКМ), эксплуатирующиеся при повышенных температурах до (250 °С) [8], на которые приходится 55,36% мирового потребления БМИ. Использование их в клеях, формовочных материалах также быстро растет, однако, по прогнозам аналитиков, доля композитов увеличивается быстрее за счет развития аэрокосмической и оборонной промышленности [9–12].

В качестве примера можно привести компанию Hexcel, производящую бисмалеимидное связующее марки F655 с температурой стеклования до 288 °С [13, 14]. Такое связующее подходит для изготовления ПКМ как в автоклаве, так и методом пропитки под давлением. Помимо этого, Hexcel предлагает несколько марок бисмалеимидных связующих, из которых HexPly F655 используется для изготовления основных компонентов авиалайнера Airbus A380, а также реверса тяги турбовентиляторного самолета Gulfstream G-450. Компания Cytec Industries (Аризона, США) предлагает бисмалеимидное связующее CYCOM-5250-4 с температурой стеклования до 296 °С с различными модификациями по составу для переработки его в ПКМ по препреговой и RTM-технологии [15]. В частности, полимерные композиционные материалы на основе связующего CYCOM-5250-4 использовали для изготовления около 400 деталей для самолета F-22 [16].

Следует отметить, что цена на бисмалеимидные мономеры ниже, по сравнению с другими полиимидами, но выше, чем у эпоксидных смол. В будущем предполагается, что их стоимость будет уменьшаться, что сделает БМИ более конкурентоспособными на рынке передовых полимеров.

Одним из перспективных направлений использования бисмалеимидных связующих является изготовление крупногабаритной технологической оснастки из ПКМ. Полученные композитные оснастки, в отличие от традиционных металлических форм, обладают большей рентабельностью из-за их меньшей трудо- и энергоемкости процесса изготовления и востребованы при изготовлении тонкостенных средне- и малонагруженных изделий авиационной техники (корпуса вентилятора, лопатки, решетки реверсивного устройства, силовой панели и др.).

В настоящее время иностранными компаниями разработаны бисмалеимидные связующие для изготовления оснастки из ПКМ по различным технологиям переработки. Так, компания Huntsman предлагает связующие марки Araldite LY 8615/XB 5173 для производства методом инфузии высокотемпературной оснастки, работающей при температуре до 200 °С; у компании Hexcel разработано связующее HexTool M61 БМИ для автоклавного процесса формования оснастки из ПКМ при температуре 180–190 °С; международная компания Cytec предлагает бисмалеимидное связующее Duratool 450® для производства высокотемпературной композитной оснастки с рабочей температурой до 190 °С; компания Advanced Composites Group (Англия) выпустила цианэфирное связующее для композитной оснастки с температурой стеклования до 250 °С [17].

В России до 2019 г. бисмалеимидные мономеры в чистом виде не производили, поэтому в настоящий момент на отечественном рынке представлено всего несколько видов бисмалеимидных и эпоксибисмалеимидных связующих, разработанных в ОАО «ОНПП «Технология». Связующее ТЭИС-33М (ТУ 1-596-444–2007) представляет собой расплавную композицию полифункциональных эпоксидных и бисмалеимидных смол, а также ароматического амина в качестве отвердителя; связующее БМИ-3 (ТУ 1-5960489–2012) – эвтектическую смесь бисмалеимидов, модифицированную добавками на основе бензофенона и бисфенола А [18, 19].

При получении технологических оснасток в основном используют эпоксидные материалы с температурами эксплуатации до 200 °С. При этом при необходимости получения размеростабильных оснасток

с рабочей температурой до 200–250 °С эпоксидные связующие использовать либо невозможно, либо очень затруднительно.

ФГУП «ВИАМ» имеет многолетний опыт по созданию теплостойких композиционных материалов, в институте разработана целая серия терморепаративных связующих на основе эпоксидбисмалеимидных смол, циановых эфиров, полиимидов, фталонитрилов и др., обладающих комплексом ценных свойств [7]. Данные связующие марок ВСЭ-17, ВСТ-1208, ВСЦ-14, ВСТ-1210, ВС-51, ВСН-31 используются для изготовления угле- и стеклопластиков методами пропитки под давлением, вакуумной инфузии и с применением препреговой технологии, а композиционные материалы на их основе обладают рабочей температурой вплоть до 350 °С. Полиимидное связующее ВС-51, имеющее рабочую температуру до 300 °С, разработано для получения ПКМ методом автоклавного или прессового формования. Следует отметить, что вследствие особенностей химической реакции отверждения данного связующего невозможно применение инжекционных технологий переработки [20–22].

Для расширения возможностей использования оснастки из ПКМ для изготовления крупногабаритных деталей из материалов, отверждающихся при температуре до 250 °С, необходимо было создать новое связующее, ориентированное на промышленно доступные отечественные компоненты, с рабочей температурой до 250 °С.

Во ФГУП «ВИАМ» для изготовления по инжекционным технологиям размеростабильной полимерной оснастки из ПКМ с многократной выдержкой циклов «нагрев–охлаждение» при температурах до 250 °С разработали бисмалеимидное связующее марки ВСТ-57 (ТУ 1-595-12-1799–2019), которое характеризуется высокими показателями как прочностных, так и термомеханических и технологических характеристик. Основными плюсами связующего являются его высокая термостойкость и низкое значение температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) для стекло- и углепластиков на его основе.

В данной работе приводятся технологические и эксплуатационные характеристики бисмалеимидного связующего марки ВСТ-57, свойства стекло- и углепластиков на его основе, а также исследовано влияние температуры и режима отверждения на уровень его механических и термомеханических показателей.

Материалы и методы

Предмет исследования – бисмалеимидное связующее марки ВСТ-57 производства

ФГУП «ВИАМ». Температуру и режим его отверждения подбирали по разным режимам. Отвержденные отливки связующего и образцы ПКМ на его основе были изготовлены по ступенчатому режиму с конечной температурой 250 °С. Образцы ПКМ на основе теплостойкого терморепаративного связующего марки ВСТ-57, углеродной равнопрочной ткани саржевого плетения марки ВТКУ-2.200 и стеклоткани марки Т-10-14 – методом вакуумной инфузии при температуре пропитки 120 °С с применением предварительного вакуумирования и последующим отверждением в термошкафу под вакуумом по вышеприведенному режиму.

Температуру стеклования отвержденных образцов измеряли в соответствии с ASTM E 1640 при скорости нагрева 10 °С/мин. Испытания проводились на образцах размером 50×10×4 мм (термоанализатор динамическо-механической модификации DMA 242С фирмы Netzsch, Германия).

Тепловой эффект реакции выявляли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на калориметре марки Netzsch с интервалом рабочих температур от -100 до +400 °С и диапазоном скоростей нагрева от 1 до 20 °С/мин. Исследования проводили в соответствии с ISO 11357-5.

Вязкость образцов связующего марки ВСТ-57 определяли по ГОСТ 25271–93 при температуре 120,0±1,0 °С ротационным вискозиметром Брукфильда модели САР2000+Н (шпиндель 1). Скорость сдвига устанавливали от 700 до 2400 с⁻¹.

Время гелеобразования связующего при температуре 160±2 °С определяли на автоматическом гель-таймере Gelnorm GelTimer, а прочность при изгибе – на испытательной машине ИР5282-50 по ГОСТ 4648–2014 при комнатной температуре. Испытание проводили на образцах размером 80×10×4 мм; расстояние между опорами 60 мм, скорость испытания 5 мм/мин.

Результаты и обсуждение

С целью оценки различных показателей связующего марки ВСТ-57 и возможности его применения для изготовления полимерной оснастки из полимерных композиционных материалов проведены исследования его технологических свойств (вязкости и жизнеспособности) и эксплуатационных характеристик [23].

Для определения жизнеспособности установлен тепловой эффект реакции отверждения рассматриваемого связующего методом ДСК, составивший ~235 Дж/г. При этом у образца связующего, выдержанного 30 сут при температуре 25 °С, обнаружено,

что тепловой эффект реакции отверждения снизился до ~217 Дж/г. Такое небольшое снижение (7%) энтальпии реакции отверждения связующего в течение 30 сут указывает о незначительном протекании химических реакций отверждения в процессе хранения.

Ниже, а также на рис. 1 представлены результаты испытаний связующего марки ВСТ-57.

Тепловой эффект реакции отверждения, Дж/г	235
Тепловой эффект реакции отверждения после 30 сут хранения, Дж/г	217
Вязкость связующего при температуре 120 °С, Па·с	0,32
Вязкость связующего после изотермической выдержки при температуре 120 °С в течение 1 ч, Па·с	0,61
Вязкость связующего при температуре 120 °С после выдержки 30 сут при температуре 25 °С, Па·с	0,40
Время гелеобразования при температуре 140 °С по гель-таймеру, мин	158

Как видно, наиболее оптимальной вязкостью для переработки связующего по инъекционным технологиям является вязкость в диапазоне температур от 115 до 125 °С [24]. Исследование данной характеристики при температуре 120 °С после выдержки 30 сут при температуре 25 °С показало, что ее значение превышает уровень вязкости до экспозиции на 25%. Такое значение вязкости достаточно для качественной пропитки волокнистого наполнителя методом вакуумной инфузии или методом пропитки под давлением, что подтверждает технологическую жизнеспособность связующего в течение 30 сут при температуре 25 °С. Исследование поведения связующего при его изотермической выдержке при температуре переработки показало, что за 1 ч данный показатель увеличивается до 0,6 Па·с. Учитывая, что для переработки полимерной

композиции по инъекционным технологиям вязкость не должна превышать 0,7 Па·с, то можно сделать вывод: технологическая жизнеспособность связующего марки ВСТ-57 позволяет изготавливать крупногабаритные изделия из ПКМ методами вакуумной инфузии и пропитки под давлением.

Для определения прочностных характеристик, температуры стеклования и деструкции на основе связующего ВСТ-57 изготовили отвержденные отливки по ступенчатому режиму отверждения с конечной выдержкой при температуре 250 °С. Результаты испытаний приведены ниже.

Температура стеклования отвержденных образцов связующего (T_{gdy}), °С	274
Температура начала разложения отвержденного связующего на воздухе, °С	423
Прочность при растяжении при температуре 20 °С, МПа	70
Модуль упругости при растяжении при температуре 20 °С, ГПа	3,7
Прочность при изгибе при температуре 20 °С, МПа	62

Таким образом, связующее марки ВСТ-57 обладает достаточно высокой температурой начала разложения (до 420 °С) и температурой стеклования, что позволяет эксплуатировать композиционные материалы вплоть до температуры 250 °С. Значение прочности при растяжении отвержденного связующего до 70 МПа обеспечит целостность технологической оснастки при многократных операциях съема и выемки изделий.

Для прогнозирования поведения связующего в условиях длительного воздействия высоких температур отвержденные образцы исследовали в условиях старения в диапазоне температур от 200 до 300 °С в течение 500 ч при каждой температуре, после чего определили их термостойкость

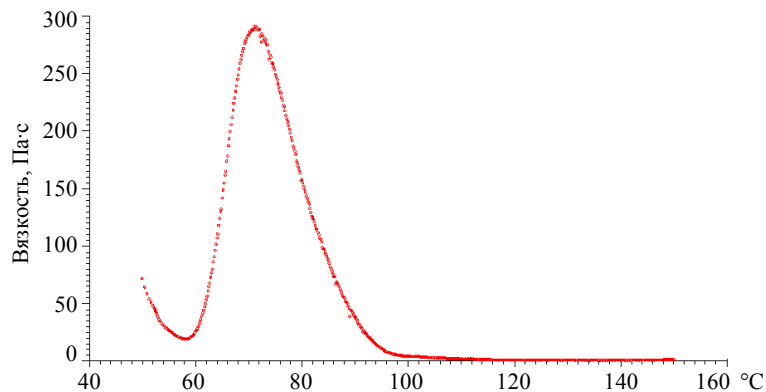


Рис. 1. Значения кажущейся вязкости образца связующего марки ВСТ-57 при изотермической выдержке при температуре 120 °С

**Результаты испытаний на термостарение отвержденных образцов
теплостойкого термореактивного связующего марки ВСТ-57**

Показатель	Исходный образец	Образец после старения в течение 500 ч при температуре, °С		
		200	250	300
Температура начала разложения на воздухе, °С	407	403	412	458
Прочность при изгибе при температуре 20 °С, МПа	62	67	68	10

и прочность при изгибе при температуре испытаний 20 °С (табл. 1).

Установлено, что после воздействия температур 200 и 250 °С в течение 500 ч отвержденные образцы теплостойкого термореактивного связующего марки ВСТ-57 остаются стабильными (не наблюдают коробления и растрескивания отливок связующего) и не подвергаются действию деструкции, сохраняя свои термические и механические характеристики. Температуры начала разложения отвержденного связующего на воздухе при выдержке при 200 и 250 °С также не изменяются, что говорит об отсутствии протекания химических реакций доотверждения полимерной матрицы.

После выдержки образцов при температуре 300 °С в течение 500 ч, напротив, наблюдаются значительный эффект доотверждения (увеличение термостойкости и снижение прочностных характеристик) и разрушение (растрескивание) отвержденного образца связующего, сопровождающееся снижением механических характеристик (матричное охрупчивание полимерной матрицы) [10, 17].

Для оценки влияния волокнистого наполнителя (стекло- и углеволокна) на процесс полимеризации полимерной матрицы использован метод ДСК, позволяющий получить и сравнить данные о скорости реакции процесса отверждения связующего в контакте

с наполнителем и уточнить химическую активность или инертность функциональных групп на поверхности волокна, в том числе и аппретирующего состава.

На стеклоткань и углеродную ткань ручным способом нанесли связующее марки ВСТ-57 и методом ДСК исследовали процесс его отверждения (табл. 2).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что как стеклянные, так и углеродные волокнистые наполнители в контакте со связующим марки ВСТ-57 не оказывают существенного влияния на теплофизические параметры отверждения материала (изменение значений температур начала, пика реакции и конца отверждения находятся в интервале не более 1–5 °С, т. е. в пределах погрешности измерения прибора).

Как видно из табл. 2, отверждение связующего марки ВСТ-57 на волокнах наполнителя происходит при температуре от 167 до 296 °С, а максимальное тепловыделение при этом – при температуре 250 °С. Ступенчатый режим отверждения позволяет добиться необходимой реализации теплостойких и прочностных характеристик ПКМ на основе связующего марки ВСТ-57.

Для подтверждения возможности переработки связующего инъекционным методом собрали пакеты из стеклоткани Т-10-14 и углеродной ткани ВТкУ-2.200 и пропитали

Таблица 2

**Результаты исследования методом ДСК связующего марки ВСТ-57,
в том числе в составе с волокнистыми наполнителями**

Материал	Температура реакции отверждения, °С		
	начало	пик	окончание
Образец связующего	168,7	255,8	300,1
Образец стеклоткани с нанесенным связующим	167,4	256,8	296,7
Образец углеродной ткани с нанесенным связующим	167,3	252,2	295,1

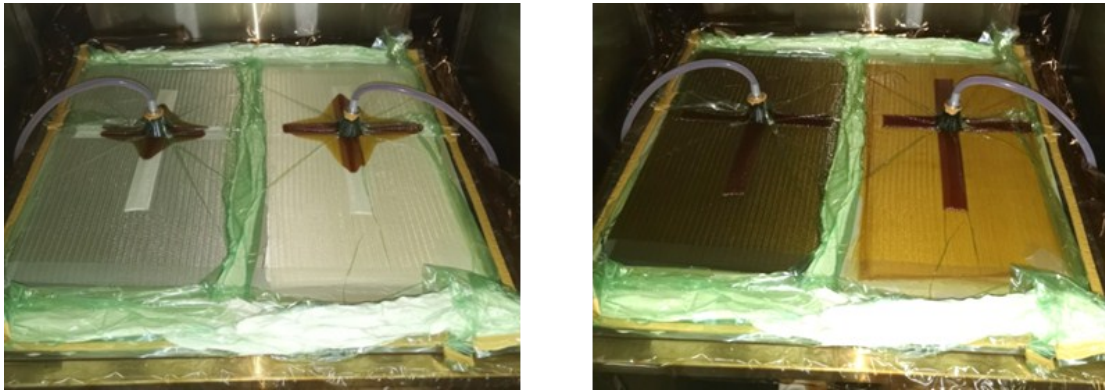


Рис. 2. Пропитка технологического пакета

связующим марки ВСТ-57. Пропитку проводили в термопечи при температуре 120 °С и вакуумном давлении 0,95 кг/см² (рис. 2). Время распределения связующего в пакете составило 15–20 мин. Формование ПКМ проводили по ступенчатому режиму с конечной выдержкой при температуре 250 °С.

Визуальное исследование показало: полученные образцы угле- и стеклопластика имеют монолитную структуру; в них отсутствуют крупные поры и «сухие» зоны непровитки связующим, пустоты или другие дефекты. Полученные плиты ПКМ толщиной 5 мм представлены на рис. 3.

Таким образом, опытные работы продемонстрировали правильность выбранной технологии переработки связующего марки ВСТ-57 инъекционным методом (вакуумной инфузией) в ПКМ для получения размеростабильной полимерной оснастки.

Исследовали также одну из главных характеристик, предъявляемых к связующим для изготовления полимерной оснастки, – температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), который измеряли для

отливок связующего марки ВСТ-57 и образцов ПКМ в диапазоне температур от 20 до 250 °С (табл. 3).

Установлено, что ТКЛР образцов ПКМ зависит в основном от наполнителя. Связующее марки ВСТ-57 обладает большим ТКЛР, чем образцы ПКМ на его основе, а его вклад в ТКЛР образцов ПКМ незначителен. Температурный коэффициент линейного расширения образцов на основе стеклоткани Т-10-14 при температуре до 250 °С не превышает по утку значения 15,17 К⁻¹, для углеродной ткани ВТкУ-2.200 при той же температуре он почти в 5 раз ниже, чем у стеклопластика

Другим, не менее важным, показателем является собственно возможность многократной выдержки образцами ПКМ циклов «нагрев–охлаждение» при температурах до 250 °С для имитации формования и съема изделий с определением свойств ПКМ [25].

Образцы ПКМ после проведения испытания на термоциклирование (ТС) (100 циклов при температурах 50–250 °С, скорость нагревания и охлаждения 1 °С/мин) исследовали на определение теплофизических

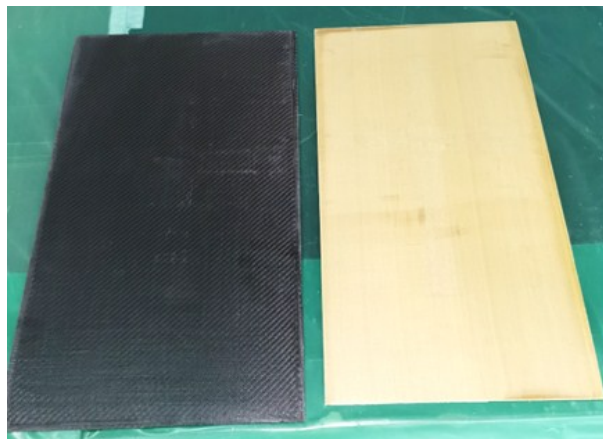


Рис. 3. Полученные плиты ПКМ

**ТКЛР отвержденного связующего марки ВСТ-57 и образцов ПКМ
на основе стеклоткани Т-10-14, углеродной ткани ВТкУ-2.200
и связующего марки ВСТ-57 при температуре испытаний от 20 до 250 °С**

Температура испытаний, °С	ТКЛР отвержденного связующего марки ВСТ-57, $\bar{\alpha}_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$	ТКЛР стеклопластика на основе стеклоткани Т-10-14, $\bar{\alpha}_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$		ТКЛР углепластика на основе углеродной ткани ВТкУ-2.200, $\bar{\alpha}_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$	
		основа	уток	основа	уток
0	41,87	9,75	12,79	1,55	1,80
50	45,32	10,09	13,31	1,81	2,25
100	49,12	10,18	13,55	1,74	2,50
150	51,08	10,50	14,01	1,75	2,64
200	53,58	10,94	14,58	1,71	2,85
250	56,70	11,44	15,17	1,74	3,18

и механических характеристик. Результаты испытаний представлены в табл. 4.

Исследования продемонстрировали, что основное требование, предъявляемое к образцам ПКМ, – низкое значение ТКЛР (до 250 °С), которое обеспечит размеростабильность полимерной оснастки в процессе формования на ней изделий, при этом после термоциклирования у образцов ПКМ на 8,7% увеличилась температура стеклования относительно прочности исходных образцов (до термоциклирования) и на 26% снизился ТКЛР.

Результаты механических испытаний показали: после термоциклирования прочность при изгибе относительно прочности исходных образцов (до воздействия) составила 73%, а прочность при сдвиге 88%. Данное небольшое снижение прочности происходит вследствие доотверждения бисмалеимидной матрицы, в результате которого увеличивается плотность сшивки в композите. В свою очередь, высокая плотность сшивки повыша-

ет температуру стеклования из-за образования более жестких полимерных цепей. Однако высокая плотность сшивки также вызывает охрупчивание матрицы. Этот эффект характерен для бисмалеимидных связующих, и его необходимо обязательно учитывать при расчете долговечности использования композиционного материала.

Исследование свойств (ТКЛР, температура стеклования, прочность при изгибе, прочность при сдвиге) образцов углепластика на основе углеродной ткани ВТкУ-2.200 и связующего марки ВСТ-57 после многократной выдержки циклов «нагрев–охлаждение» при температурах до 250 °С (не менее 100 циклов – имитация формования и съема изделий) показало сохранение свойств на уровне 73–88% относительно исходных образцов (до воздействия), что подтверждает возможность использования ПКМ для получения размеростабильной полимерной оснастки при температуре до 250 °С.

Таблица 4

**Результаты исследования свойств углепластиков на основе связующего ВСТ-57
до и после термоциклирования**

Показатель	ВСТ-57/ВТкУ-2.200	
	до ТС	после ТС
Температура стеклования, °С	276	302
Температура начала разложения на воздухе, °С	404	405
Прочность при изгибе при температуре 20 °С, МПа	755	550
Прочность при сдвиге при температуре 20 °С, МПа	33	29
ТКЛР при температуре 0°С, $\bar{\alpha}_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$	1,46	1,08
ТКЛР при температуре 250 °С, $\bar{\alpha}_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$	1,84	1,19

Заключения

В работе представлены технологические и термомеханические свойства связующего марки ВСТ-57. Показано, что разработанное связующее может быть рекомендовано для изготовления инъекционными методами (VaRTM и RTM) деталей из ПКМ для изготовления размеростабильной полимерной оснастки. Методом вакуумной инфузии на основе связующего марки ВСТ-57 и углеродной равнопрочной ткани саржевого плетения ВТКУ-2.200 и стеклоткани марки Т-10-14 изготовлены образцы угле- и стеклопластиков по ступенчатому режиму с конечной выдержкой при температуре 250 °С, а также исследованы их прочностные и теплотехнические характеристики.

Проведено исследование ТКЛР углепластика на основе углеродной ткани ВТКУ-2.200

и связующего марки ВСТ-57 в диапазоне температур от 20 до 250 °С, которое показало, что ТКЛР в данном диапазоне температур не превышает значения $3,18 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Многократная выдержка циклов «нагрев–охлаждение» при температурах до 250 °С образцов углепластика на основе связующего ВСТ-57 показало сохранение свойств на уровне 73–88%, что подтверждает возможность использования ПКМ для получения размеростабильной полимерной оснастки при температуре до 250 °С.

Благодарности

Коллектив авторов выражает благодарность за помощь в работе сотрудникам ФГУП «ВИАМ» К.И. Донецкому, Р.Ю. Караваеву, М.И. Мищуну, Р.А. Сатдинову.

Библиографический список

1. ASM Handbook / eds. D.B. Miracle, S.L. Donaldson. ASM International, 2001. Vol. 21: Composites. P. 97–104. DOI: 10.31399/asm.hb.v21.9781627081955.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
3. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тез. докл. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
4. Campbell F.C. Structural Composite Materials. Ohio: ASM International Materials Park, 2010. 612 p.
5. Bismaleimide Monomer Market – Global Industry Analysis: Size, Share, Growth, Trends, and Forecast 2018–2026 // Transparency Market Research: офиц. сайт. URL: <https://www.transparencymarketresearch.com/bismaleimide-monomer-market.html> (дата обращения: 14.01.2020).
6. Evonik for composites // Evonik Industries AG: офиц. сайт. URL: <https://www.rohacell.com/sites/lists/RE/DocumentsHP/Evonik-for-composites-EN.pdf> (дата обращения: 14.01.2020).
7. Валуева М.И., Зеленина И.В., Жаринов М.А., Ахмадиева К.Р. Мировой рынок высокотемпературных полиимидных углепластиков (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №12 (84). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.01.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-67-79.
8. Михайлин Ю.А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. СПб.: Научные основы и технологии, 2011. 416 с.
9. Iredale R.J., Ward C., Hamerton I. Modern advances in bismaleimide resin technology: A 21st century perspective on the chemistry of addition polyimides // Progress in Polymer Science. 2017. Vol. 69. P. 1–21. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2016.12.002.
10. Xu M., Lei Y., Ren D. et al. Thermal stability of allyl-functional phthalonitriles-containing benzoxazine/bismaleimide copolymers and their improved mechanical properties // Polymer Bulletin. 2018. Vol. 10. Is. 6. P. 596–611. DOI: 10.3390/polym10060596.
11. Dan X., Zhengjun Y., Jintang Z. Mechanical and thermal properties of a novel bismaleimide matrix resin for high-performance composite materials // High Performance Polymers. 2015. Vol. 28. Is. 8. P. 945–952.
12. Mold for use in making composite structures: pat. US 8257631; field 30.05.11; publ. 22.09.11.
13. Kuznetsov A.A., Semenova G.K. Perspective thermally stable thermoset binders for polymer composite materials // Russian Journal of General Chemistry. 2010. No. 80. P. 2170–2180. DOI: 10.1134/S1070363210100464.
14. Препреги и смолы // Hexcel Corporation: [офиц. сайт]. URL: <http://www.hexcel.com/> (дата обращения: 14.01.2020).
15. Bismaleimide resin with high temperature thermal stability: pat. US 20070117956A1; filed 27.01.06; publ. 24.05.07.
16. Fisher G. High temperature and toughened bismaleimide composite materials for aeronautics // HAL archives-ouvertes: офиц. сайт. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01299359> (дата обращения: 13.01.2020).

17. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 660 с.
18. Связующие для ПКМ // ОНПП «Технология»: офиц. сайт. URL: <https://technologiya.ru/files/1154/%D0%A1%D0%B2%D1%8F%D0%B7%D1%83%D1%8E%D1%89%D0%B8%D0%B5%20%D0%B4%D0%BB%D1%8F%20%D0%9F%D0%9A%D0%9C.pdf> (дата обращения: 14.01.2020).
19. Бисмалеимидные связующие // АО «ИНУМиТ»: офиц. сайт. URL: <https://inumit.ru/rus/produkcija-i-uslugi/ugleplastiki/Resins/bismaleimides/> (дата обращения: 14.01.2020).
20. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Соловьева Н.А., Гуляев А.И. Повышение водостойкости бисмалеимидного связующего // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. №5 (53). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.01.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-8-8.
21. Жаринов М.А., Шимкин А.А., Ахмадиева К.Р., Зеленина И.В. Особенности и свойства расплавленного полиимидного связующего полимеризационного типа // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2018. №12 (72). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.01.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-46-53.
22. Мухаметов Р.Р., Долгова Е.В., Меркулова Ю.И., Душин М.И. Разработка бисмалеимидного термостойкого связующего для композиционных материалов авиационного назначения // Авиационные материалы и технологии. 2014. №4. С. 53–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-4-53-57.
23. Замышляева О.Г. Методы исследования современных полимерных материалов: учеб.-метод. пособие. Н. Новгород: Нижегород. гос. ун-т, 2012. 90 с.
24. Liu P., Qu C., Wang D. et al. High-performance bismaleimide resins with low cure temperature for resin transfer molding process // High Performance Polymers. 2017. Vol. 29. Is. 3. P. 298–304. DOI: 10.1177/0954008316642278.
25. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. №2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.