
Научная статья

УДК 678.067.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-49-59

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА СТЕКЛОПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ БИСМАЛЕИНИМИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО НА ЕГО УРОВЕНЬ СВОЙСТВ

В.Г. Прокопенков¹, Е.Д. Колпачков¹, А.Л. Шошева¹

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

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния составов стеклопластиков на основе бисмалеинимидного связующего и технологических режимов их формирования на уровень свойств материала. Исследованы текущие разработки в области бисмалеинимидных связующих и препрегов на их основе как на отечественном, так и на зарубежном рынке. Проведены испытания и получен комплекс физических и упруго-прочностных характеристик исследованных материалов. Определен состав стеклопластика с наивысшим пределом прочности при изгибе и наибольшей температурой стеклования.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, стеклопластики, высокотемпературные ПКМ, бисмалеинимидные связующие расплавно-го типа, температура стеклования, предел прочности при изгибе

Для цитирования: Прокопенков В.Г., Колпачков Е.Д., Шошева А.Л. Влияние состава стеклопластика на основе бисмалеинимидного связующего на его уровень свойств // Труды ВИАМ. 2023. № 4 (122). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-49-59.

Scientific article

INFLUENCE OF GLASS FIBER-REINFORCED BISMALEIMIDE COMPOSITION ON THE LEVEL OF ITS PROPERTIES

V.G. Prokopenkov¹, E.D. Kolpachkov¹, A.L. Shosheva¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Results of a study on influence of glass fiber-reinforced bismaleimide composition and curing cycles on the level of its properties are shown. Current development and research in the field of bismaleimide resins and prepregs based on them both in the domestic and the international markets is examined. After testing, a series of physical and mechanical properties were obtained. Based on the results, composition with the highest flexural strength and glass transition temperature was chosen.

Keywords: polymer composite materials, fiberglass, high-temperature composites, bismaleimide binders melt type, glass transition temperature, flexural strength

For citation: Prokopenkov V.G., Kolpachkov E.D., Shosheva A.L. Influence of glass fiber-reinforced bismaleimide composition on the level of its properties. *Trudy VIAM*, 2023, no. 4 (122), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-49-59.

Введение

В связи с развитием авиационной промышленности все более высокие требования предъявляются к разработчикам и производителям авиационной техники в области повышения весовой эффективности летательных аппаратов и расширения допустимых температурных диапазонов их применения. Одна из важнейших задач – разработка новых авиационных материалов, соответствующих современным требованиям и стандартам [1–5].

Одним из направлений развития материалов и технологий их переработки в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ является разработка конструкционных полимерных композиционных материалов (ПКМ). С учетом общего объема разработанных материалов следует отметить, что основная часть приходится на материалы, изготавливаемые с применением эпоксидных смол. Однако верхняя граница интервала рабочих температур ПКМ на основе эпоксидных смол не превышает 200 °С [6]. Например, рабочая температура стеклотекстолита марки СТ-69Н-14 составляет 80 °С и 120 °С – для ВПС-48/7781. Так, в настоящее время для изготовления теплонагруженных конструкций авиационной техники разработаны и применяются препреги марок СПП-97С и СПП-97К, а в случае необходимости обеспечения радиотехнических характеристик изделия – препрег марки СПП-97КК. Тем не менее в настоящее время направление разработки ПКМ с повышенной температурой эксплуатации остается актуальной задачей.

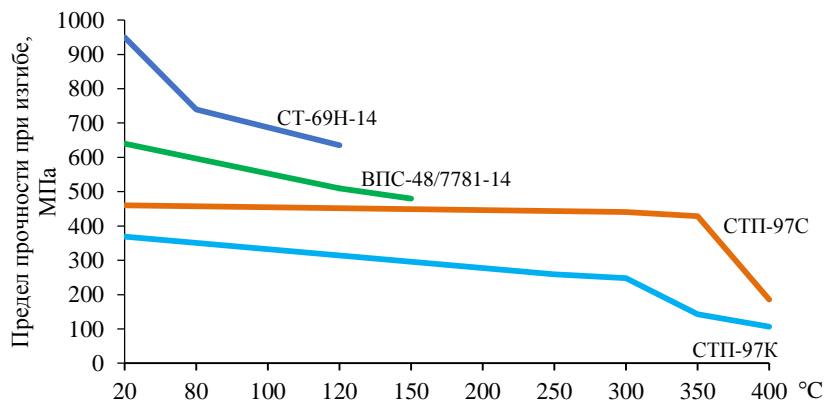


Рис. 1. Сравнение пределов прочности при изгибе полимерных композиционных материалов на основе эпоксидных и полиимидных препрегов при разных температурах испытаний

Как показано на рис. 1, ПКМ на основе полиимидных связующих имеют меньшие показатели пределов прочности по сравнению с ПКМ на основе эпоксидных связующих. Основной причиной этих низких показателей является поликонденсационный характер отверждения связующего в стеклопластике, вследствие чего в процессе формирования выделяется значительное количество летучих продуктов, способное приводить к образованию пор в объеме изделия [6–8].

В настоящее время для ряда предприятий, разрабатывающих авиационную технику, актуальным является запрос на полимерный конструкционный материал, способный обеспечивать температуру эксплуатации до 250 °С, при этом имеющий уровень прочности, не уступающий ПКМ на основе эпоксидных связующих. Для обеспечения заявленных требований наиболее подходящим решением является разработка нового бисмалеинимидного связующего и ПКМ на его основе.

Бисмалеинимидные связующие – это класс полимерных термореактивных связующих, обладающих температурой стеклования до 300 °С, благодаря чему ПКМ на их основе обеспечивают работоспособность конструкций до 250 °С. Следует также

отметить, что переработка данного класса материалов протекает без выделения летучих продуктов при отверждении за счет отсутствия необходимости использования растворителей, что в свою очередь существенно повышает уровень прочностных свойств ПКМ в составе конструкций и снижает степень вредного воздействия при работе с полуфабрикатом. Среди недостатков данного класса материалов можно выделить такие параметры, как повышенные показатели водопоглощения и низкая трещиностойкость. Так, повышенная чувствительность к влаге существенно снижает как температуру стеклования, так и прочностные характеристики получаемого материала [9–18].

В настоящее время на отечественном рынке ПКМ применяются стекло- и углепластики на основе бисмалеинимидных связующих марок БМИ-3 (АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина») и SB-270 (ООО «Итекма»), перерабатываемые по препреговым технологиям [19–24]. Однако в каталоге продукции НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ не представлены предложения по ПКМ на основе бисмалеинимидных связующих.

Несмотря на существенный прогресс в разработке бисмалеинимидных связующих и материалов на их основе в России, зарубежные производители и фирмы продвинулись в этом направлении намного дальше. Так, истребитель Lockheed Martin F-22 Raptor на 24 % состоит из ПКМ, причем в половине этих композитов применяется матрица на основе бисмалеинимидного связующего [15]. В разрабатываемом компанией Lockheed Martin истребителе-бомбардировщике F-35 Lightning II также широко используются композиционные материалы на основе эпоксидных и бисмалеинимидных связующих [25]. Из ПКМ на основе бисмалеинимидных связующих выполнены обтекатели приводов закрылков самолета Boeing C-17 Globemaster III [26]. В вертолете Bell 429 GlobalRanger из таких ПКМ выполнены элементы конструкции хвостового оперения, а компания Airbus применяет их во вспомогательных силовых установках своих самолетов [27].

Фирмой Renegade Materials Corporation (принадлежит компании Teijin, Япония) разработаны связующие на основе бисмалеинимидных смол марок RM-3002 (формование пропиткой под давлением) и RM-3004 (безавтоклавное формование). Компания производит препреги с использованием стеклянных, кварцевых и углеродных тканей. Данные материалы отверждаются при температуре 190 °С и имеют высокую температуру стеклования. Так, у отвержденного препрега с использованием связующего марки RM-3002 после процесса формования при максимальной температуре 191 °С и последующей термообработке при температуре 256 °С температура стеклования составляет 339 °С [28].

Компанией Solvay (Бельгия) разработано связующее марки SYCOM 5250-4 с температурой отверждения препрега при автоклавном формовании от 177 до 204 °С. Температура стеклования отвержденного препрега с использованием термообработки при температуре 243 °С составляет 304 °С [29].

Компанией Toqay (Япония) производится связующее марки 4000. Препреги на основе этого связующего отверждаются при температуре 191 °С, а термообработка проводится при 227 °С. Формование материалов возможно как с использованием пропитки под давлением, так и инфузионной пропитки под вакуумом [30].

Фирмой Hexcel (США) разработаны связующие марок HexPly F650, F652 и F655 [31]. Отверждение препрегов с использованием связующего марки F650 проводится при температурах 177–191 °С с последующей термообработкой при температуре 232 °С. Получаемый отвержденный материал имеет температуру стеклования не ниже 316 °С. При проведении упруго-прочностных испытаний препрега на основе связующего марки HexPly F650 и стеклянной ткани марки 7781 получены значения пределов прочности при изгибе и межслойном сдвиге. Так, значения пределов прочности при

изгибе при температурах 20 и 232 °С равны 638 и 541 МПа соответственно; значения пределов прочности при межслойном сдвиге при тех же температурах равны соответственно 53 и 39 МПа.

В данной статье приведены результаты разработки составов бисмалеинимидного связующего нового поколения и стеклопластика на его основе.

Материалы и методы

Исследованы стеклопластики на основе экспериментальных композиций расплавленного термостойкого бисмалеинимидного связующего и стеклянной ткани Т-10-14, которые изготавливали по препреговой технологии методом прямого прессования.

Разработаны три состава связующих (1–3), на основе которых и проводили формование стеклопластиков. В качестве исходных компонентов для синтеза бисмалеинимидного связующего использовали бисмалеинимидодифенилметан, аллильные производные и пропенилфункционализированный сомономер. Использование различных сомономеров для реакции с бисмалеинимидом улучшает технологичность и физико-механические свойства отвержденных полимеров. Так, аллильное соединение на основе бисфенола А в составе композиций 1–3 является хорошим разбавителем, значительно снижает вязкость системы и улучшает прочностные характеристики стеклопластиков. Наличие в составе композиций 1 и 3 пропенильного соединения повышает гибкость полимерной цепи, что приводит к снижению температуры стеклования получаемого материала и повышению его прочности. Добавление диаллилового эфира в композиции 2 и 3 способствует длительному сохранению вязкости при переработке связующего, в то время как температура стеклования увеличивается за счет более жесткой структуры полимера.

Процесс пропитки стеклоткани состоял из раскатки пленки связующего на технологической подложке при постоянной температуре с приложением давления на гидравлическом прессе горячего прессования ОРМА. После получения пленки связующего поверх нее укладывали полотно стеклоткани и путем приложения давления на технологический пакет осуществляли пропитку стеклоткани.

Поскольку использовали композиции с различными составами, режим формования стеклопластика для каждого нового состава подбирали отдельно. Основные параметры формования оставались неизменными, однако варьировали продолжительность выдержки технологической заготовки при постоянной температуре перед подачей давления. Необходимость регулирования данного параметра объясняется отличающимся временем гелеобразования связующих разных составов, из-за чего прикладывать давление к технологической заготовке необходимо в индивидуальный для каждого отдельного состава период времени. Различия режимов формования стеклопластиков представлены в табл. 1. Формование экспериментальных стеклопластиков проводили на гидравлическом прессе горячего прессования.

Таблица 1

Продолжительность выдержки пакета из препрегов при постоянной температуре 150 °С перед подачей давления

Композиция	Продолжительность выдержки, мин
1	23
2	50
3	23

Плотность образцов стеклопластика определяли по ГОСТ Р 56682–2015 с использованием аналитических весов с дискретностью 0,0001 г, штангенциркуля и микрометра. Эти же образцы далее применяли для определения толщины монослоя

и содержания матрицы, испытания также проводили по ГОСТ Р 56682–2015. Для определения содержания матрицы образцы выжигали в муфельной печи.

Температуру стеклования определяли по ГОСТ Р 56753–2015 методом динамического механического анализа (ДМА). Прямоугольный образец нагревали с постоянной скоростью 5 °С/мин и с частотой 1 Гц прикладывали переменную нагрузку. Температуру стеклования определяли как точку перегиба на кривой зависимости модуля упругости от температуры. Испытания проводили на динамико-механическом термоанализаторе.

Определение водопоглощения осуществляли по ГОСТ 4650–2014 с использованием аналитических весов с дискретностью 0,0001 г, штангенциркуля и эксикатора. Образцы испытывали при полном погружении в воду комнатной температуры, общая продолжительность испытаний составила 30 сут.

Предел прочности при изгибе определяли по ГОСТ Р 56805–2015 на электромеханической разрывной машине при температурах 20 и 220 °С. Для испытаний на трехточечный тип нагружения изготавливали прямоугольные образцы.

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

Результаты и обсуждение

Формование стеклопластиков на основе композиций экспериментального бисмалеинимидного связующего проводили в соответствии с режимами, указанными в табл. 1. Результаты исследования плотности образцов, толщины монослоя и содержания матрицы представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения плотности, толщины монослоя и содержания матрицы в образцах стеклопластика

Свойства	Значения свойств* образцов стеклопластика композиции		
	1	2	3
Плотность, кг/м ³	1880–1910	1910–1940	1910–1930
	1893	1924	1922
Толщина монослоя, мм	0,20–0,21	0,19–0,21	0,21–0,21
	0,21	0,20	0,21
Массовая доля связующего, %	27,3–28,7	28,3–28,4	28,7–29,8
	27,8	28,4	29,3

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

По полученным результатам можно сделать вывод, что, несмотря на различия в продолжительности выдержки перед подачей давления, все выбранные режимы формования обеспечивают физические характеристики стеклопластика на одинаковом уровне.

Результаты определения температур стеклования экспериментальных стеклопластиков на основе бисмалеинимидного связующего представлены на рис. 2.

Как отмечено ранее, наличие низковязкого диаллилового эфира в составе связующего увеличивает его температуру стеклования. Эти результаты подтверждены испытаниями на температуру стеклования ПКМ на основе вышеприведенных связующих. Так, температура стеклования стеклопластика на основе композиции 2 достигает 296 °С, а стеклопластики на основе композиций 1 и 3 имеют температуру стеклования ~280 °С. Следует отметить, что наличие диаллилового эфира в составе связующего действительно увеличивает температуру стеклования отформованного композиционного материала.

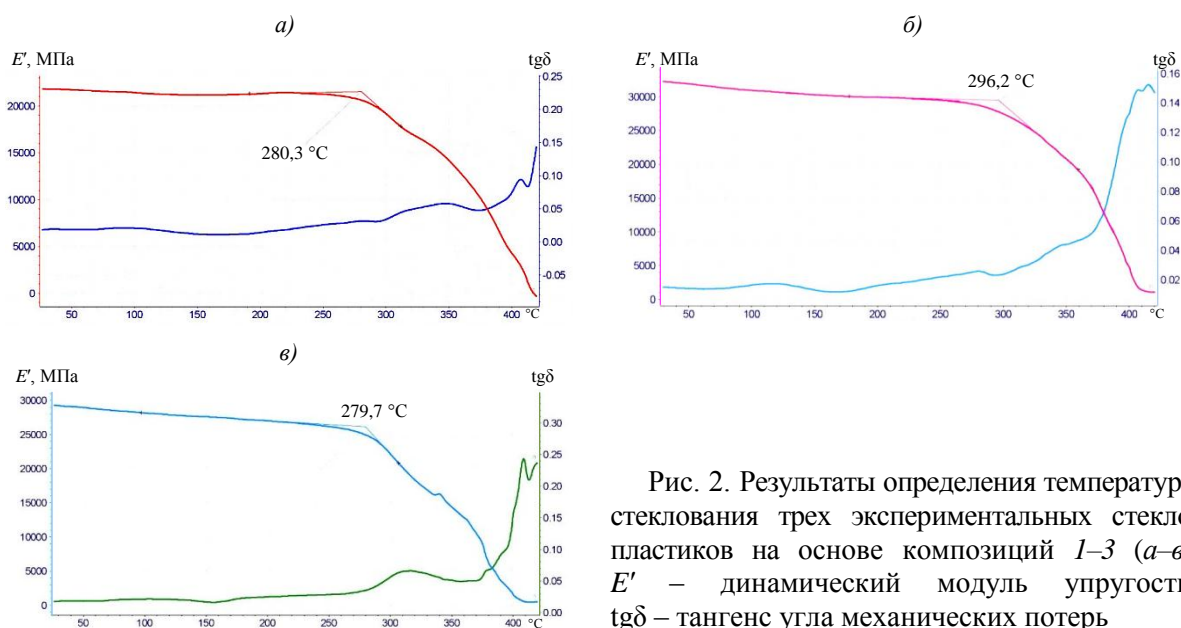


Рис. 2. Результаты определения температуры стеклования трех экспериментальных стеклопластиков на основе композиций 1–3 (а–в); E' – динамический модуль упругости; $\text{tg}\delta$ – тангенс угла механических потерь

В рамках разработки состава бисмалеинимидного стеклопластика у полученных образцов определяли пределы прочности при изгибе при температурах 20 и 220 °С. Результаты испытаний представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты определения предела прочности при изгибе в образцах стеклопластика при различных температурах (схема армирования волокон [0]₉)

Свойства	Значения свойств* образцов стеклопластика композиции		
	1	2	3
Предел прочности при изгибе, МПа, при температуре, °С:			
20	<u>541–599</u> 560	<u>744–813</u> 779	<u>616–690</u> 656
220	<u>435–480</u> 447	<u>522–598</u> 546	<u>466–498</u> 478
Сохранение предела прочности (среднее значение), %	79,82	70,09	72,87

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Наивысшим пределом прочности при изгибе при температуре испытаний 20 °С со средним значением 779 МПа обладает стеклопластик на основе композиции связующего 2. Наивысшее сохранение предела прочности при температуре испытаний 220 °С составляет 79,8 %, им обладает стеклопластик на основе композиции 1. Сохранение предела прочности при изгибе при 220 °С стеклопластика на основе композиции связующего 2 составляет 70,09 %, а среднее значение предела прочности составляет 546 МПа. Стеклопластики на основе композиций 1 и 3 имеют более высокие значения сохранения предела прочности (по сравнению с композицией 2) при повышенной температуре испытаний, что объясняется наличием пропенильного соединения в составе связующего. Стеклопластик на основе композиции 1, несмотря на больший процент сохранения предела прочности, имеет самое низкое значение предела прочности при изгибе при 220 °С, равное 447 МПа, вследствие чего можно сделать вывод, что наивысшим значением предела прочности при изгибе при температурах испытаний как 20, так и 220 °С, обладает стеклопластик на основе композиции 2.

Проведены исследования на водопоглощение образцов экспериментальных стеклопластиков. Результаты испытаний представлены на рис. 3.

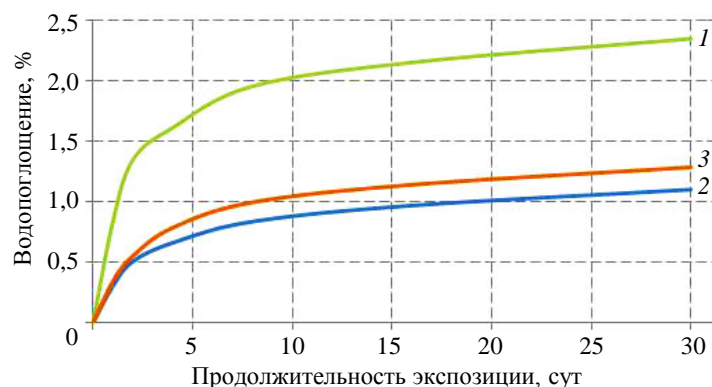


Рис. 3. Кривые водопоглощения стеклопластиков на основе экспериментальных композиций (1–3) бисмалеинимидного связующего

Установлено, что водопоглощение образцов композиций 2 и 3 спустя 30 сут после начала испытания составляет 1,10 и 1,29 % соответственно, в то время как водопоглощение образца 1 составило 2,35 %. Возможной причиной такого результата стеклопластика композиции 1 являются микропоры внутри материала, которые заполнились влагой, тем самым увеличив массу материала, выдерживаемого в воде. Одной из причин образования пор может являться набор технологических параметров формования, не обеспечивающий полного удаления летучих компонентов в процессе переработки.

Заключения

По результатам исследований разработаны три различных состава ПКМ на основе композиций экспериментального бисмалеинимидного связующего и стеклянной ткани Т-10-14. Установлено, что, несмотря на разные составы связующих при формовании стеклопластика, полученные материалы обладали одинаковым уровнем физических свойств. Все испытанные ПКМ имеют высокие значения температуры стеклования, однако наибольшее – у стеклопластика на основе композиции 2 с добавлением диаллилового эфира. Наилучшим сохранением предела прочности при изгибе обладают композиции с добавлением пропенильного соединения, но самые высокие абсолютные значения как при температуре 20, так и 220 °С, у стеклопластика на основе композиции 2. Стеклопластик на основе этой композиции обладает наименьшим уровнем водопоглощения, что объясняется наименьшим количеством пор в объеме полученного после формования материала.

Высокие упруго-прочностные характеристики исследуемого материала при допустимых рабочих температурах до 250 °С показывают хорошие перспективы дальнейшей разработки ПКМ на основе бисмалеинимидных связующих. Такие материалы могут найти применение, заменив как ПКМ на основе высокотемпературных эпоксидных связующих, так и традиционных сплавов в тех областях, где ранее использование полимеров было недоступно. Одним из возможных вариантов применения такого материала являются теплонагруженные элементы конструкций двигателей семейства ПД, в том числе узлов газогенератора авиационного двигателя.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотруднику лаборатории НИЦ «Курчатовский институт» ВИАМ М.И. Вавиловой за оказанную помощь при написании статьи.

Список источников

1. 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.
2. 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.
3. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // *Инновации*. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
4. Комплексная программа развития авиатранспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года: распоряжение Правительства РФ от 25 июня 2022 г. № 1693-р // *Собрание законодательства РФ*. 2022. № 27. С. 12996–13019.
5. Валуева М.И., Евдокимов А.А., Начаркина А.В., Губин А.М. Полимерные композиционные материалы и технологии в автомобилестроении (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 1 (107). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-53-65.
6. Гуняева А.Г., Курносоев А.О., Гуляев И.Н. Высокотемпературные полимерные композиционные материалы, разработанные во ФГУП «ВИАМ», для авиационно-космической техники: прошлое, настоящее, будущее (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 1 (95). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
7. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Полиимидный стеклотекстолит с пониженной температурой отверждения // *Труды ВИАМ*. 2015. № 2. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-8-8.
8. Жаринов М.А., Шимкин А.А., Ахмадиева К.Р., Зеленина И.В. Особенности и свойства расплавленного полиимидного связующего полимеризационного типа // *Труды ВИАМ*. 2018. № 12 (72). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-46-53.
9. 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.
10. Chen X., Yuan L., Zhang Z. et al. New glass fiber/bismaleimide composites with significantly improved flame retardancy, higher mechanical strength and lower dielectric loss // *Composites. Part B: Engineering*. 2015. Vol. 71. P. 96–102. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.11.001.
11. Валуева М.И., Зеленина И.В., Жаринов М.А., Ахмадиева К.Р. Мировой рынок высокотемпературных полиимидных углепластиков (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 12. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 17.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-67-79.
12. Zhao Y., Liu W., Keey Seah L., Boay Chai G. Delamination growth behavior of a woven E-glass/bismaleimide composite in seawater environment // *Composites. Part B: Engineering*. 2016. Vol. 106. P. 332–343. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.09.045.
13. Ciubotariu-Ana P., Micu C.A., Lohan N.M. et al. Thermal Analysis of a New Glass Fiber-Reinforced Bismaleimide Composite Material Used for Firefighter Helmets // *IOP Conference Series: Materials, Science and Engineering*. 2018. Vol. 374. DOI: 10.1088/1757-899X/374/1/012022.
14. Prasanaa Iyer N., Arunkumar N. Review on Fiber reinforced/modified Bismaleimide resin composites for Aircraft Structure Application // *IOP Conference Series: Materials, Science and Engineering*. 2020. Vol. 923. DOI: 10.1088/1757-899X/923/1/012051.
15. Drukker E., Green A.K., Marom G. Mechanical and chemical consequences of through thickness thermal gradients in polyimide matrix composite materials // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2003. Vol. 34. Is. 2. P. 125–133. DOI: 10.1016/S1359-835X(02)00261-0.
16. Fink J.K. Bismaleimide Resins // *Reactive Polymers: Fundamentals and Applications*. Third Edition. Elsevier, 2018. P. 367–402. DOI: 10.1016/B978-0-12-814509-8.00011-7.

17. Hopewell J.L., George G.A., Hill D.J.T. Analysis of the kinetics and mechanism of the cure of a bismaleimide-diamine thermoset // *Polymer*. 2000. Vol. 41. Is. 23. P. 8231–8239. DOI: 10.1016/S0032-3861(00)00193-2.
18. Yuan Q., Huang F., Jiao Y. Characterization of modified bismaleimide resin // *Journal of Applied Polymer Science*. 1996. Vol. 62. Is. 3. P. 459–464. DOI: 10.1002/(SICI)1097-4628(19961017)62:3<459::AID-APP3>3.0.CO;2-P.
19. Русланцев А.Н., Думанский А.М., Портнова Я.М. Модуль ползучести углепластика БМИ-3/3692 на основе равнопрочной ткани // Тез. докл. XXI Междунар. науч.-техн. конф. «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов». Обнинск: АО «ОНПП «Технология», 2017. С. 128–130.
20. Волков Д.А., Попов А.Г., Осауленко А.В. и др. Исследование влияния технологических факторов и конфигурации образцов на значение предела прочности при сжатии углепластика на основе препрега БМИ-3/3692 // Тез. докл. XXI Междунар. науч.-техн. конф. «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов». Обнинск: АО «ОНПП «Технология», 2017. С. 168–170.
21. Ворвуль С.В., Мосиук В.Н., Томчани О.В. Подбор режимов дополнительной термообработки связующего БМИ-3 методом ДМА // Тез. докл. XXI Междунар. науч.-техн. конф. «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов». Обнинск: АО «ОНПП «Технология», 2017. С. 178–181.
22. Связующие для ПКМ // АО «ОНПП «Технология». URL: <https://technologiya.ru/files/1154/%D0%A1%D0%B2%D1%8F%D0%B7%D1%83%D1%8E%D1%89%D0%B8%D0%B5%D0%B4%D0%BB%D1%8F%D0%9F%D0%9A%D0%9C.pdf> (дата обращения: 15.11.2022).
23. Бисмалеимидные связующие // АО «ИНУМиТ». URL: <https://inunit.ru/rus/produkcija-i-uslugi/ugleplastiki/Resins/bismaleimides/> (дата обращения: 15.11.2022).
24. Продукция // Itecma. URL: <https://itecma.ru/products/> (дата обращения: 15.11.2022).
25. Lockheed Martin extends F-35 supply agreement with Solvay // Solvay. URL: https://www.solvay.com/sites/g/files/srpend221/files/2020-09/2020-09-29-PR-Lockheed%20Martin%20extends%20F-35%20supply%20agreement%20with%20Solvay_0.pdf (дата обращения: 15.11.2022).
26. GE Aviation Aerostructures Facility Overview // GE Aerospace. URL: <https://www.geaerospace.com/sites/default/files/structures-brochure.pdf> (дата обращения: 15.11.2022).
27. Fischer G. High temperature and toughened bismaleimide composite materials for aeronautics // HAL archives-ouvertes. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01299359> (дата обращения: 15.11.2022).
28. Prepregs and Adhesives for Aerospace Applications // Renegade Materials Corporation. URL: <http://www.renegadematerials.com/products/> (дата обращения: 15.11.2022).
29. CYCOM 5250-4 // Solvay. URL: <https://www.solvay.com/en/product/cycom-5250-4> (дата обращения: 15.11.2022).
30. Prepreg Systems for the Aerospace Market // Toray Composite Materials. URL: <https://www.toraycma.com/products/prepreg/> (дата обращения: 15.11.2022).
31. Prepreg Data Sheet // Hexcel. URL: <https://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg> (дата обращения: 15.11.2022).

References

1. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
2. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

3. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technological development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. *Innovatsii*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
4. Comprehensive program for the development of the air transport industry of the Russian Federation until 2030: Decree of the Government of the Russian Federation of June 25, 2022 No. 1693-r. *Collection of Legislation of the Russian Federation*, 2022, no. 27, pp. 12996–13019.
5. Valueva M.I., Evdokimov A.A., Nacharkina A.V., Gubin A.M. Polymer composite materials and technologies in the automotive industry (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 1 (107), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 17, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-53-65.
6. Gunyaeva A.G., Kurnosov A.O., Gulyaev I.N. High-temperature polymer composite materials developed FSUE «VIAM» for aero-space engineering: past, present and future (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 17, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
7. Davydova I.F., Kavun N.S. Polyimide fiberglass plastic with lower curing temperature. *Trudy VIAM*, 2015, no. 2, paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 17, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-8-8.
8. Zharinov M.A., Shimkin A.A., Akhmediyeva K.R., Zelenina I.V. Features and properties of solvent-free PMR-type polyimide resin. *Trudy VIAM*, 2018, no. 12 (72), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 17, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-46-53.
9. Muhametov R.R., Dolgova E.V., Merkulova Yu.I., Dushin M.I. Development of heat-resistant bismaleimide binder for composites for aeronautical application. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 4, pp. 53–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-4-53-57.
10. Chen X., Yuan L., Zhang Z. et al. New glass fiber/bismaleimide composites with significantly improved flame retardancy, higher mechanical strength and lower dielectric loss. *Composites. Part B: Engineering*, 2015, vol. 71, pp. 96–102. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.11.001.
11. Valueva M.I., Zelenina I.V., Zharinov M.A., Akhmediyeva K.R. World market of high temperature polyimide carbon plastic (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 12 (84), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 17, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-67-79.
12. Zhao Y., Liu W., Keey Seah L., Boay Chai G. Delamination growth behavior of a woven E-glass/bismaleimide composite in seawater environment. *Composites. Part B: Engineering*, 2016, vol. 106, pp. 332–343. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.09.045.
13. Ciubotariu-Ana P., Micu C.A., Lohan N.M. et al. Thermal Analysis of a New Glass Fiber-Reinforced Bismaleimide Composite Material Used for Firefighter Helmets. *IOP Conference Series: Materials, Science and Engineering*, 2018, vol. 374. DOI: 10.1088/1757-899X/374/1/012022.
14. Prasanaa Iyer N., Arunkumar N. Review on Fiber reinforced/modified Bismaleimide resin composites for Aircraft Structure Application. *IOP Conference Series: Materials, Science and Engineering*, 2020, vol. 923. DOI: 10.1088/1757-899X/923/1/012051.
15. Drukker E., Green A.K., Marom G. Mechanical and chemical consequences of through thickness thermal gradients in polyimide matrix composite materials. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2003, vol. 34, is. 2, pp. 125–133. DOI: 10.1016/S1359-835X(02)00261-0.
16. Fink J.K. Bismaleimide Resins. *Reactive Polymers: Fundamentals and Applications*. Third Edition. Elsevier, 2018, pp. 367–402. DOI: 10.1016/B978-0-12-814509-8.00011-7.
17. Hopewell J.L., George G.A., Hill D.J.T. Analysis of the kinetics and mechanism of the cure of a bismaleimide-diamine thermoset. *Polymer*, 2000, vol. 41, is. 23, pp. 8231–8239. DOI: 10.1016/S0032-3861(00)00193-2.
18. Yuan Q., Huang F., Jiao Y. Characterization of modified bismaleimide resin. *Journal of Applied Polymer Science*, 1996, vol. 62, is. 3, pp. 459–464. DOI: 10.1002/(SICI)1097-4628(19961017)62:3<459::AID-APP3>3.0.CO;2-P.

19. Ruslantsev A.N., Dumansky A.M., Portnova Ya.M. Creep modulus of carbon fiber BMI-3/3692 based on equal-strength fabric. *Reports of XXI Int. sci.-tech. conf. "Designs and technologies for obtaining products from non-metallic materials"*. Obninsk: ONPP Tekhnologiya, 2017, pp. 128–130.
20. Volkov D.A., Popov A.G., Osaulenko A.V. et al. Investigation of the effect of technological factors and configuration of samples on the value of the compressive strength of carbon fiber based prepreg BMI-3/3692. *Reports of XXI Int. sci.-tech. conf. "Designs and technologies for obtaining products from non-metallic materials"*. Obninsk: ONPP Tekhnologiya, 2017, pp. 168–170.
21. Vorvul S.V., Mosiyuk V.N., Tomchani O.V. Selection of modes of additional heat treatment of binder BMI-3 by the DMA method. *Report XXI Intern. sci.-tech. conf. "Designs and technologies for obtaining products from non-metallic materials"*. Obninsk: ONPP Tekhnologiya, 2017, pp. 178–181.
22. *Binders for PCM*. Available at: <https://tehnologiya.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> (accessed: November 15, 2022).
23. *Bismaleimide binders*. Available at: <https://inunit.ru/rus/produkcija-i-uslugi/ugleplastiki/Resins/bismaleimides/> (accessed: November 15, 2022).
24. *Products of Itecma*. Available at: <https://itecma.ru/products/> (accessed: November 15, 2022).
25. *Lockheed Martin extends F-35 supply agreement with Solvay*. Available at: https://www.solvay.com/sites/g/files/srpend221/files/2020-09/2020-09-29-PR-Lockheed%20Martin%20extends%20F-35%20supply%20agreement%20with%20Solvay_0.pdf (accessed: November 15, 2022).
26. *GE Aviation Aerostructures Facility Overview*. Available at: <https://www.geaerospace.com/sites/default/files/structures-brochure.pdf> (accessed: November 15, 2022).
27. Fischer G. *High temperature and toughened bismaleimide composite materials for aeronautics*. Available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01299359> (accessed: November 15, 2022).
28. *Prepregs and Adhesives for Aerospace Applications*. Available at: <http://www.renegadematerials.com/products/> (accessed: November 15, 2022).
29. *CYCOM 5250-4*. Available at: <https://www.solvay.com/en/product/cycom-5250-4> (дата обращения: 15.11.2022).
30. *Prepreg Systems for the Aerospace Market*. Available at: <https://www.toraycma.com/products/prepreg/> (accessed: November 15, 2022).
31. *Prepreg Data Sheet*. Available at: <https://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg> (accessed: November 15, 2022).

Информация об авторах

Прокопенков Василий Григорьевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Колпачков Егор Дмитриевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Шошева Анфиса Львовна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vasily G. Prokopenkov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Egor D. Kolpachkov, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anfisa L. Shosheva, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 24.01.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 25.01.2023.

The article was submitted 24.01.2023; approved and accepted for publication after reviewing 25.01.2023.