

Научная статья

УДК 539.612

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-84-93

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВРЕМЯ ВЫСЫХАНИЯ И ЖИЗНЕСПОСОБНОСТЬ ШПАТЛЕВКИ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИВИНИЛЭФИРНОЙ СМОЛЫ

С.А. Марченко¹, П.В. Скивко¹

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

Аннотация. Изучено влияние температуры и влажности среды на скорость отверждения шпатлевки на основе ненасыщенной полиэфирной смолы (эпоксивинилэфирной): исследована жизнеспособность шпатлевки после смешения с отвердителем и ускорителем, время высыхания до степени 3 покрытия шпатлевки. Определены физико-механические свойства покрытия шпатлевки при отверждении в различных условиях температуры и влажности. Определены оптимальные температура и влажность (при выполнении работ на открытых площадках) при отверждении покрытий на основе эпоксивинилэфирной шпатлевки.

Ключевые слова: ненасыщенные полиэфирные смолы, эпоксивинилэфирная смола, шпатлевка, время высыхания до степени 3, жизнеспособность

Для цитирования: Марченко С.А., Скивко П.В. Влияние температуры на время высыхания и жизнеспособность шпатлевки на основе эпоксивинилэфирной смолы // Труды ВИАМ. 2024. № 10 (140). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-84-93.

Scientific article

EFFECT OF TEMPERATURE ON DRYING TIME AND VIABILITY OF EPOXYVINYL ETHER RESIN PUTTY

S.A. Marchenko¹, P.V. Skivko¹

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

Abstract. The influence of ambient temperature and humidity on the curing rate of putty based on unsaturated polyester resin (epoxy vinyl ether) was studied: the viability of the putty after mixing with a hardener and accelerator, the drying time to degree 3 of the putty coating was investigated. The physical and mechanical properties of the putty coating during curing under various temperature and humidity conditions have been determined. The optimal temperature and humidity (when working in open areas) were determined during the curing of coatings based on epoxy vinyl ether putty.

Keywords: unsaturated polyester resins, epoxy vinyl ether resin, putty, drying time to degree 3, viability.

For citation: Marchenko S.A., Skivko P.V. Effect of temperature on drying time and viability of epoxyvinyl ether resin putty. *Trudy VIAM*, 2024, no. 10 (140), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-84-93.

Введение

Одно из основных направлений в разработке лакокрасочных покрытий – это создание материалов с наибольшим временем жизнеспособности и наименьшей продолжительностью отверждения. Кроме этого, при быстром отверждении не должны ухудшаться защитные и декоративные свойства покрытий. Одним из способов быстрого отверждения покрытий является создание лакокрасочных материалов (в данном случае шпатлевки) на основе ненасыщенных полиэфирных смол.

Ненасыщенные полиэфирные смолы широко применяются в технике и народном хозяйстве как в качестве матричного полимера в армированных волокном композитах, так и для изготовления различных клеев, полимербетона, искусственного камня, эмалей, грунтовок и шпатлевок [1–8]. На основе ненасыщенных полиэфиров со стекловолокнистыми наполнителями получают стеклопластики, характеризующиеся высокой удельной прочностью, хорошими диэлектрическими свойствами и повышенной коррозионной устойчивостью.

В настоящее время основной объем применяемых шпатлевок (исходя из химической основы связующего вещества) составляют полиэфирные шпатлевки различного назначения. Эти материалы обладают наименьшей усадкой (при относительно большой толщине наносимого слоя) и наибольшей скоростью полимеризации, по сравнению со шпатлевками на акриловой или нитроакриловой основах [9].

Ненасыщенные полиэфирные смолы – это продукты поликонденсации ненасыщенных дикарбоновых кислот и многоосновных спиртов. Двойные связи, находящиеся в цепях молекул полиэфиров, способны к радикальной сополимеризации с мономерными (мет)акрилатами, аллильными соединениями и другими ненасыщенными мономерами, в особенности со стиролом. Реакция отверждения составов на основе ненасыщенных полиэфиров протекает либо при иницировании органическими пероксидами или гидропероксидами, либо при фотохимическом иницировании ультрафиолетовым светом в присутствии фотоинициаторов [10].

Кислород воздуха снижает скорость радикальной полимеризации, что обусловлено преждевременным обрывом цепи из-за образования пероксидных радикалов. Для предотвращения этого явления в состав шпатлевки вводят экранирующие добавки (например, парафин) или добавляют в рецептуру смолу, которая содержит аллильные эфирные группы, обеспечивающие устранение ее липкости [11].

Обычное отверждение ненасыщенных полиэфирных смол может протекать при повышенных температурах или холодном отверждении (при добавлении ускорителей). Покрытия обычно получают при холодном отверждении. Распространенными комбинациями инициатора и ускорителя являются следующие системы: (гидро)пероксид кетона и октоат кобальта или пероксид бензоила и третичный ароматический амин в случае высоконаполненных систем (шпатлевок). Химическое сшивание начинается сразу после смешения компонентов. Жизнеспособность и время высыхания зависят от соотношения полуфабриката шпатлевки к отвердителю и ускорителю и температуры. Поскольку при отверждении отсутствует необходимость в улетучивании растворителей, ненасыщенные полиэфирные рассматриваются как продукты, не опасные для окружающей среды, поэтому за одну операцию нанесения можно достичь достаточно большой толщины покрытия [12].

Улучшение эксплуатационных свойств в полиэфирных шпатлевках обеспечиваются наполнителями и добавками. Введение наполнителей снижает уровень остаточных напряжений в матрице композитов с сетчатой структурой полимера. Основной проблемой таких композитов является горение с образованием токсичных газообразных углеводородных соединений, поэтому в их состав добавляют антипирены. Для повышения огнестойкости материала необходимо большое количество наполнителей в составе, что

ухудшает физические свойства материала, поэтому обычные наполнители макро- и микрометрового размера заменяют на наноразмерные частицы [13–15].

В данной работе определены оптимальные температура и влажность (при выполнении работ на открытых площадках) при отверждении покрытий на основе эпоксивинилэфирной шпатлевки.

Работа выполнена в рамках реализации стратегического направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия» комплексной научной проблемы 17.7. «Лакокрасочные материалы и покрытия на полимерной основе» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Материалы и методы

Для определения влияния температуры на жизнеспособность и времени высыхания до степени 3 исследовано покрытие шпатлевки на основе эпоксивинилэфирной смолы, наполненной различными добавками и наполнителями, улучшающими свойства.

В качестве ускорителя использовался раствор кобальтовой соли одноосновных органических кислот в стироле, а отвердителя – гидроперекись кумола.

Для подложки использовали образцы из алюминиевого сплава Д16 с нанесенным покрытием Ан.Окс.нхр размером 150×70 мм и стеклянные пластины размером 90×120 мм. На подложку пластиковым шпателем наносили шпатлевку. Образцы с нанесенными покрытиями выдерживали в камере с постоянными условиями – при заданной температуре и влажности. Для определения физико-механических свойств и адгезии покрытия выдерживали в течение 5 сут при температуре 20±2 °С.

Значения времени высыхания покрытий до степени 3 определяли по ГОСТ 19007–73. Поверх окрашенной пластины помещали лист бумаги, на него накладывали резиновую пластину, на середину которой устанавливали гирю массой 200 г. Через 60 с груз и резиновую пластину убирали, а окрашенную пластину с листом бумаги свободно бросали на деревянную поверхность. Степень высыхания оценивали через 30 с после снятия груза. Если бумага не прилипла к пленке, фиксировали время достижения степени высыхания 3.

Жизнеспособность шпатлевки определяли по ГОСТ 27271–2014. Сущность метода заключается в определении жизнеспособности путем повторного определения конкретного показателя (способность к нанесению) через установленный промежуток времени. По прошествии 1 ч после смешения компонентов на образец шпателем наносят шпатлевку. Если по истечении указанного времени она легко наносится шпателем, не сворачиваясь под ним, испытание повторяют через каждые 15 мин, до получения отрицательного результата. За результат принимают последнее время проведения испытания, когда шпатлевка сохраняет способность к равномерному нанесению.

Толщину покрытий измеряли с помощью прибора «Константа К6Ц» в соответствии с ГОСТ 31993–2013.

Прочность покрытий при ударе определяли по ГОСТ 4765–73. За результат принимали числовое значение максимальной высоты в сантиметрах, при падении с которой груз массой 1 кг не наносит механических повреждений покрытию испытываемого образца.

Твердость покрытия измеряли с помощью маятникового прибора ТМЛ (маятник Б) по ГОСТ 5233–2021.

Адгезию покрытий определяли с помощью метода решетчатого надреза по ГОСТ 31149–2014 при расстоянии между надрезами 3 мм.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ».

Результаты и обсуждение

На результаты испытаний существенно влияет состав шпатлевки. В винилэфирной смоле только две сложноэфирные группы в молекуле, что обеспечивает отличную химическую стойкость и устойчивость к гидролизу по сравнению с обычными полиэфирными смолами [16]. Отвержденная винилэфирная смола может иметь двухфазную микроструктуру, состоящую из фазы стирола с более низкой температурой стеклования и фазы винилэфирного эфира с более высокой температурой стеклования [17, 18]. Кинетика отверждения каждой фазы оказывает значительное влияние на термические свойства системы, такие как степень сшивки, температура стеклования и окончательная конверсия [19]. Высокое содержание стирола может привести к уменьшению плотности поперечных связей, что приводит к снижению температуры стеклования [20].

Непосредственное влияние на жизнеспособность и время высыхания шпатлевки оказывают наполнители в ее составе. Природные силикаты, такие как диоксид и волластонит, играют роль ускорителей отверждения полиэфирной смолы, а цеолит тормозит этот процесс. Степень дисперсности наполнителя оказывает влияние на скорость отверждения за счет адсорбции на поверхности наполнителя кислорода воздуха, ингибирующего отверждение. С повышением дисперсности, т. е. с увеличением площади удельной поверхности наполнителя, ингибирование возрастает [21, 22].

В данной работе рассмотрено влияние внешней среды – температуры и влажности – при отверждении покрытия. Состав шпатлевки, количество ускорителя и отвердителя при отверждении проб были идентичны.

Средняя толщина полимерных покрытий, которые использовались для определения времени высыхания, физико-механических свойств и адгезии, находилась в интервале 190–230 мкм.

Результаты исследования зависимости жизнеспособности и времени высыхания до степени 3 шпатлевки от температуры представлены в табл. 1. Для исключения параметра влажности, испытания проводили при ее различных значениях.

Таблица 1

Зависимость жизнеспособности и времени высыхания шпатлевки от температуры

Влажность, %	Температура, °С	Жизнеспособность, ч	Время высыхания до степени 3, ч
40	16	4,75	5,50
	20	2,63	3,63
	25	1,38	1,67
	30	1,13	1,75
50	16	4,25	6,00
	20	2,33	3,63
	25	1,38	2,63
	30	1,13	1,75
60	16	3,75	7,25
	20	2,63	4,50
	25	1,50	2,75
	30	1,00	2,00
70	16	3,50	7,75
	20	2,63	6,00
	25	1,33	3,50
	30	1,00	2,13
80	16	5,00	8,50
	20	3,25	7,33
	25	1,75	3,75
	30	1,50	2,50

Видно, что чем выше температура, при одном и том же параметре влажности, тем меньше жизнеспособность шпатлевки и быстрее отверждается покрытие.

При отверждении с разницей в температуре окружающей среды 14 °С значения жизнеспособности образцов шпатлевки отличаются (при различной влажности) в среднем на 3 ч. При влажности 70 % значение влияния температуры на отверждение меньше, чем при испытаниях с другими параметрами влажности. Минимальное значение жизнеспособности получено при температуре 30 °С и влажности 70 %, максимальное – при температуре 16 °С и влажности 80 %.

При отверждении покрытий с разницей в температуре окружающей среды 14 °С значения времени высыхания до степени 3 образцов шпатлевки отличаются (при различной влажности) в среднем на 4,9 ч. Видно, что при одной и той же температуре образцы шпатлевки быстрее отверждаются при более низкой влажности. Дольше всего покрытие отверждалось при температуре 16 °С и влажности 80 %, быстрее всего – при температуре 30 °С и влажности 40–50 %.

Такие результаты обусловлены тем, что инициирование радикальной полимеризации происходит при создании в реакционной системе свободных радикалов, способных начать цепные реакции. Термический гомолитический распад инициатора происходит быстрее при более высокой температуре.

На рис. 1 приведены зависимости жизнеспособности и времени высыхания шпатлевки до степени 3 от температуры.

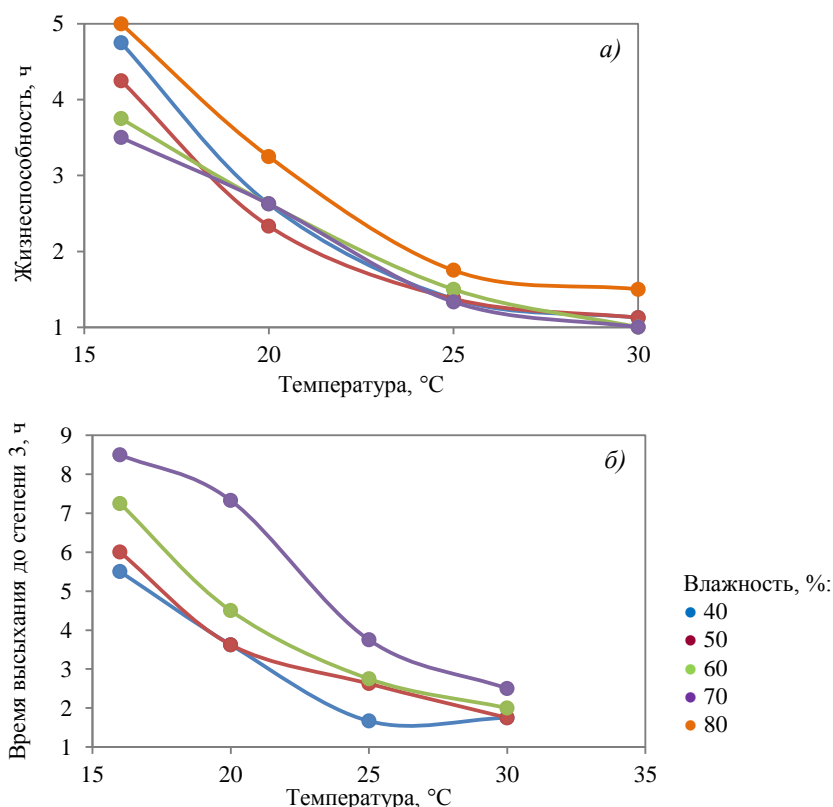


Рис. 1. Температурные зависимости жизнеспособности (а) и времени высыхания шпатлевки до степени 3 (б)

Результаты исследования зависимости жизнеспособности и времени высыхания шпатлевки до степени 3 от влажности представлены в табл. 2. Для исключения параметра температуры испытания проводили при ее различных значениях.

Водяной пар является одним из компонентов окружающего воздуха, но его содержание очень сильно изменяется в зависимости от климатического района. Чем выше температура, тем больше влаги может содержаться в воздухе. В случае понижения температуры избыток влаги будет оседать на поверхности, а в случае повышения температуры начинается процесс испарения воды с поверхности и увеличение ее абсолютного содержания в воздухе.

Таблица 2

Зависимость жизнеспособности и времени высыхания шпатлевки от влажности

Температура, °С	Влажность, %	Жизнеспособность, ч	Время высыхания до степени 3, ч
16	40	4,75	5,50
	50	4,25	6,00
	60	3,75	7,25
	70	3,50	7,75
	80	5,00	8,50
20	40	2,63	3,63
	50	2,33	3,63
	60	2,63	4,50
	70	2,63	6,00
	80	3,25	7,33
25	40	1,38	1,67
	50	1,38	2,63
	60	1,50	2,75
	70	1,33	3,50
	80	1,75	3,75
30	40	1,13	1,75
	50	1,13	1,75
	60	1,00	2,00
	70	1,00	2,13
	80	1,50	2,50

В отличие от температуры влажность окружающей среды не оказывает существенного влияния на жизнеспособность. Например, различие значений жизнеспособности при влажности 40 и 80 % (при температуре 25 °С) достигает всего 22 мин. Влажность оказывает существенное влияние на время высыхания. При температуре 25 °С покрытие, которое отверждалось при влажности 40 %, достигло времени высыхания до степени 3 на 2 ч раньше, чем при влажности 80 %.

При влажности 80 % при разных температурах наблюдаются наибольшие значения жизнеспособности и времени отверждения покрытия. Минимальное время высыхания пленки покрытия до степени 3 достигается при влажности 40 %. Наименьшая жизнеспособность при разных температурах достигается при влажности 70 %.

На рис. 2 приведены зависимости жизнеспособности и времени высыхания шпатлевки до степени 3 от влажности.

Свойства покрытий шпатлевки при отверждении при разных температурах и влажности представлены в табл. 3 и находятся приблизительно на одном уровне. Однако большое влагосодержание (максимальное 70 %) негативно влияет на химические и механические свойства полиэфира и его реакцию с ускорителем, что видно по ухудшению прочности при ударе. При отверждении при большей температуре прочность при ударе становится меньше, а твердость больше. В отвержденных продуктах очень

большое влияние на механические и физические свойства оказывает частота сшивки, т. е. число петель трехмерной сетчатой молекулы, приходящихся на единицу объема. Частота сшивки обуславливает твердость продуктов. Причиной может быть улетучивание стирола во время отверждения, в результате чего меньшее его количество участвует в сшивке, что влечет за собой меньшую эластичность покрытия.

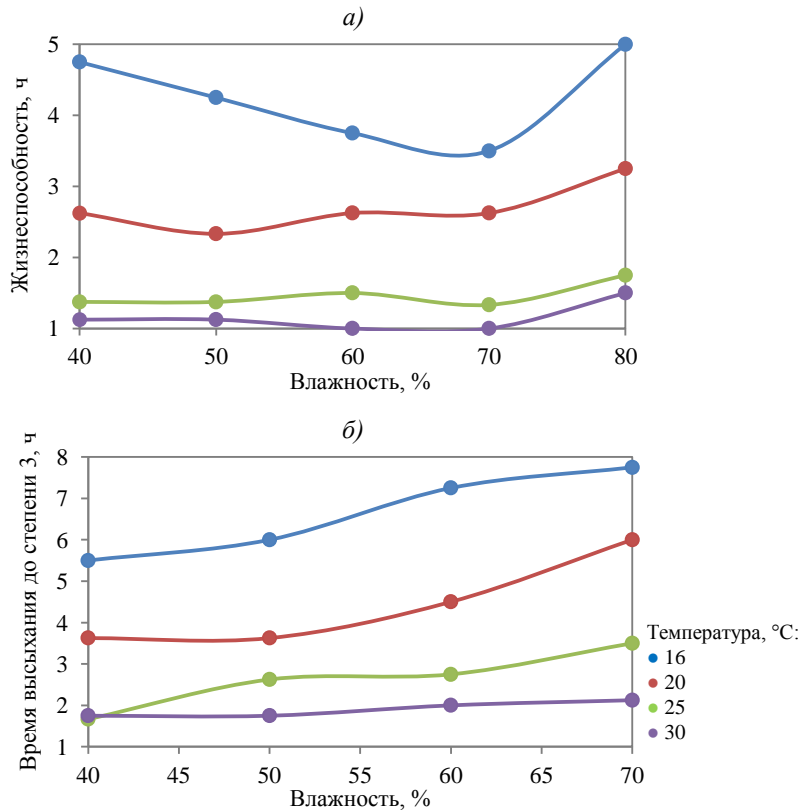


Рис. 2. Зависимости жизнеспособности (а) и времени высыхания шпатлевки до степени 3 от влажности (б)

Таблица 3

Зависимость физико-механических свойств и адгезии от параметров при отверждении покрытий

Влажность, %	Температура, °С	Прочность при ударе, Дж	Твердость, отн. ед.	Адгезия, балл
40	16	5	0,26	0
	20	5	0,28	1
	25	5	0,35	1
	30	4	0,35	0
50	16	5	0,30	0
	20	5	0,30	0
	25	5	0,31	0
	30	5	0,32	0
60	16	5	0,30	0
	20	5	0,27	0
	25	5	0,30	0
	30	4	0,31	1
70	16	4	0,29	1
	20	4	0,29	1
	25	4	0,30	1
	30	3	0,30	0

Заключения

Производители лакокрасочных материалов стремятся к получению продукции с максимальной жизнеспособностью после смешения с отвердителем и к минимальному времени высыхания.

Данная работа проведена для определения влияния температуры и влажности от времени отверждения и жизнеспособности эпоксивинилэфирной шпатлевки при выполнении работ на открытых площадках, чтобы определить, насколько при определенной температуре и влажности снизятся или увеличатся исследуемые свойства.

На отверждение покрытий сильное влияние оказывает температура – чем она выше, тем быстрее отверждается покрытие, однако при температуре 30 °С покрытия обладают меньшей прочностью при ударе и большей твердостью.

Выяснено, что минимальное значение жизнеспособности получено при температуре 30 °С и влажности 70 %, максимальное – при температуре 16 °С и влажности 80 %. Дольше всего покрытие отверждалось при температуре 16 °С и влажности 80 %, быстрее всего – при температуре 30 °С и влажности 40–50 %.

В отличие от температуры влажность окружающей среды не оказывает такого существенного влияния на жизнеспособность. Высокие значения влажности увеличивают жизнеспособность. Среднее различие жизнеспособности (при одинаковых температурах) между значениями влажности 40 и 80 % составляет 20 мин. На время высыхания покрытия влажность влияет существеннее – чем она выше, тем дольше происходит отверждение и тем хуже свойства покрытия.

Оптимальной температурой и влажностью для отверждения эпоксивинилэфирной шпатлевки являются соответственно 25 °С и 60 %, при этих показателях – лучшая разница в значениях жизнеспособности и времени высыхания, при этом физико-механические свойства шпатлевки после отверждения находятся на высоком уровне.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72. № 1. С. 3–12.
2. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России // Вопросы материаловедения. 2006. № 1. С. 64–67.
3. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002. М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 23–47.
4. Ткачук А.И., Загора А.Г., Донецкий К.И., Евдокимов А.А. Связующие для полимерных композиционных материалов, применяемых при строительстве быстровозводимых мостовых сооружений // Труды ВИАМ. 2020. № 12 (94). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-67-74.
5. Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 6-7 (89). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37.
6. Сидорина А.И. Мультиаксиальные углеродные ткани в изделиях авиационной техники (обзор). Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 21.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.
7. Harish V., Nagaiah N., Niranjana Prabhu T. et al. Preparation and characterization of lead monoxide filled unsaturated polyester based polymer composites for gamma radiation shielding applications // Journal of Applied Polymer Science. 2009. Vol. 112. Is. 3. P. 1503–1508.
8. Martínez-Barrera G., Villarruel U., Viguera-Santiago E. et al. Compressive strength of gamma-irradiated polymer concrete // Polymer Composites. 2008. Vol. 29. Is. 11. P. 1210–1217.
9. Кучеренко Е.В., Щербаков А.С., Арзамасцев С.В. Композиционные материалы на основе полиэфирной смолы // Современные инновации. 2016. № 3 (5). С. 5–7.

10. Ткачук А.И., Терехов И.В., Гуревич Я.М., Григорьева К.Н. Исследования влияния природы модифицирующих добавок на реологические и термомеханические характеристики фотополимерной композиции на основе эпоксивинилэфирной смолы // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 3 (56). С. 31–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-31-40.
11. Cook M.I., Dubowik D.A., Walker F.H. Improved high solids epoxy paints with new curing agents // *Fabre und Lack*. 2000. Vol. 106 (4). P. 28–43.
12. Брок Т., Гротэклаус М., Мишке П. Ненасыщенные полиэфирные смолы // *Европейское руководство по лакокрасочным материалам и покрытиям*. М.: Пэйнт-Медиа, 2007. С. 73–78.
13. Серцова А.А., Королева М.Ю., Юртов Е.В. и др. Огнестойкие полимерные нанокомпозиты на основе оксидов и гидроксидов металлов // *Химическая технология*. 2009. Т. 10. № 12. С. 706–712.
14. Pravednikova O.B., Dutikova O.S., Karelina I.M. et al. Effect of nano-sized metal compounds on the flameproof properties of plasticized polyvinyl chloride // *Fiber Chemistry*. 2009. Vol. 41 (2). P. 80–84.
15. Начаркина А.В., Зеленина И.В., Валуева М.И., Барботько С.Л. Пожаробезопасность высоко-температурных углепластиков авиационного назначения (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 7 (113). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-134-150.
16. Сорина Т.Г., Поляков Д.К., Коробко А.П., Пенская Т.В. Винилэфирные смолы для пултрузионной технологии // *Электротехника*. 2002. № 4. С. 49–51.
17. Li P., Yu Y., Yang X. Effects of initiators on the cure kinetics and mechanical properties of vinyl ester resins // *Journal of Applied Polymer Science*. 2008. Vol. 109. Is. 4. P. 2539–2545.
18. Garay A., Paese L., Souza J., Amico S. Studies on thermal and viscoelastic properties of vinyl ester resin and its composites with glass fiber // *Matéria*. 2015. Vol. 20. P. 64–71.
19. Fraga A., Alvarez V., Vazquez A., de La Osa O. Relationship between dynamic mechanical properties and water absorption of unsaturated polyester and vinyl ester glass fiber composites // *Journal of Composite Materials*. 2003. Vol. 37. P. 1553–1574.
20. Zhang J., Richardson M. Micro-heterogeneity of urethane vinyl ester resin networks // *Polymer*. 2000. Vol. 41. Is. 18. P. 6843–6849.
21. Бородина И.А., Козик В.В., Борода Л.П. Влияние природных силикатов на отверждение ненасыщенных полиэфирных смол // *Известия Томского политехнического университета*. 2005. Т. 308. № 3. С. 118–122.
22. Дильмиев В.В., Онина С.А. Особенности модификации ненасыщенных полиэфирных смол на примере ортофталевой // *Вестник науки*. 2024. Т. 4. № 5 (74). С. 1805–1808.

References

1. Kablov E.N. Aviation Materials Science: Results and Prospects. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2002, vol. 72, no. 1, pp. 3–12.
2. Kablov E.N. Structural and Functional Materials – the Basis of Economic and Scientific-Technical Development of Russia. *Voprosy materialovedeniya*, 2006, no. 1, pp. 64–67.
3. Kablov E.N. Aviation Materials Science in the 21st Century. Prospects and Tasks. *Aviation Materials. Selected Works of VIAM 1932–2002*. Moscow: MISiS–VIAM, 2002, pp. 23–47.
4. Tkachuk A.I., Zagora A.G., Donetsky K.I., Evdokimov A.A. Polymeric matrixes for composite materials used in the construction of quickly built bridge structures. *Trudy VIAM*, 2020, no. 12 (94), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 21, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-67-74.
5. Doriomedov M.S. Russian and world market of polymer composites (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 20, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37.
6. Sidorina A.I. Multiaxial carbon fabrics in the products of aviation technology (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 21, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.

7. Harish V., Nagaiah N., Niranjana Prabhu T. et al. Preparation and characterization of lead monoxide filled unsaturated polyester based polymer composites for gamma radiation shielding applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, vol. 112, is. 3, pp. 1503–1508.
8. Martínez-Barrera G., Villarruel U., Viguera-Santiago E. et al. Compressive strength of gamma-irradiated polymer concrete. *Polymer Composites*, 2008, vol. 29, is. 11, pp. 1210–1217.
9. Kucherenko E.V., Shcherbakov A.S., Arzamastsev S.V. Composite materials based on polyester resin. *Sovremennye innovatsii*, 2016, no. 3 (5), pp. 5–7.
10. Tkachuk A.I., Terekhov I.V., Gurevich Ya.M., Grigoreva K.N. Research of the influence of the modifying additives nature on the rheological and thermomechanical properties of a photopolymer composition based on epoxy vinyl ester resin. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 31–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-31-40.
11. Cook M.I., Dubowik D.A., Walker F.H. Improved high solids epoxy paints with new curing agents. *Fabre und Lack*, 2000, vol. 106 (4), pp. 28–43.
12. Brock T., Groteklaus M., Mischke P. Unsaturated polyesters. *European Guide to Paints and Coatings*. Moscow: Paint-Media, 2007, pp. 73–78.
13. Sertsova A.A., Koroleva M.Yu., Yurtov E.V. et al. Fire-resistant polymer nanocomposites based on metal oxides and hydroxides. *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2009, vol. 10, no. 12, pp. 706–712.
14. Pravednikova O.B., Dutikova O.S., Karelina I.M. et al. Effect of nano-sized metal compounds on the flameproof properties of plasticized polyvinyl chloride. *Fiber Chemistry*, 2009, vol. 41 (2), pp. 80–84.
15. Nacharkina A.V., Zelenina I.V., Valueva M.I., Barbotko S.L. Fire safety of high-temperature carbon fiber reinforced plastics for aviation purposes (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 7 (113), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 26, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-134-150.
16. Sorina T.G., Polyakov D.K., Korobko A.P., Penskaya T.V. Vinyl ester resins for pultrusion technology. *Elektrotehnika*, 2002, no. 4, pp. 49–51.
17. Li P., Yu Y., Yang X. Effects of initiators on the cure kinetics and mechanical properties of vinyl ester resins. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, vol. 109, is. 4, pp. 2539–2545.
18. Garay A., Paese L., Souza J., Amico S. Studies on thermal and viscoelastic properties of vinyl ester resin and its composites with glass fiber. *Matéria*, 2015, vol. 20, pp. 64–71.
19. Fraga A., Alvarez V., Vazquez A., de La Osa O. Relationship between dynamic mechanical properties and water absorption of unsaturated polyester and vinyl ester glass fiber composites. *Journal of Composite Materials*, 2003, vol. 37, pp. 1553–1574.
20. Zhang J., Richardson M. Micro-heterogeneity of urethane vinylester resin networks. *Polymer*, 2000, vol. 41, is. 18, pp. 6843–6849.
21. Borodina I.A., Kozik V.V., Borilo L.P. Effect of natural silicates on the curing of unsaturated polyester resins. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2005, vol. 308, no. 3, pp. 118–122.
22. Dilmiev V.V., Onina S.A. Features of modification of unsaturated polyester resins on the example of orthophthalic. *Vestnik nauki*, 2024, vol. 4, no. 5 (74), pp. 1805–1808.

Информация об авторах

Марченко Сергей Андреевич, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Скирко Полина Владимировна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Sergei A. Marchenko, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Polina V. Skivko, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 17.09.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.09.2024.

The article was submitted 17.09.2024; approved and accepted for publication after reviewing 20.09.2024.