

УДК 691.175.2
DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_311

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ОТВЕРЖДЕННОЙ ПОЛИЭФИРАКРИЛАТНОЙ СМОЛЫ МГФ-9**

**MECHANICAL PROPERTIES
OF THE HARDENED POLYESTER ACRYLATE RESIN MGF-9**

*В.Т. ЕРОФЕЕВ, В.И. ИВЛЕВ, А.В. МЫШКИН, В.А. ЮДИН,
Т.Ф. ЕЛЬЧИЩЕВА, А.Ф. СИГАЧЕВ*

*V.T. EROFEEV, V.I. IVLEV, A.V. MYSHKIN, V.A. YUDIN,
T.F. ELCHISHCHEVA, A.F. SIGACHEV*

**(Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева,
Тамбовский государственный технический университет)**

**(National Research Mordovia State University named after N.P. Ogarev,
Tambov State Technical University)**

E-mail: a464aa@gmail.com; elshevat@mail.ru

Использование полимерных материалов и их экономическая эффективность заключается в возможности изготовления на их основе защитных покрытий для строительных конструкций, покрытий полов и других элементов самых различных рецептур, обеспечивающих требуемые эксплуатационные свойства, важнейшими из которых являются физико-механические. В связи с этим цель исследований состояла в анализе зависимостей механических свойств и степени отверждения полиэфиракрилатных композитов от содержания отверждающих компонентов.

Прочностные испытания показали возможность получения высокопрочных полиэфиракрилатных композитов на основе смолы марки МГФ-9 с использованием в качестве ускорителя отверждения октоата кобальта (ОК-1) и инициатора отверждения – пероксида циклогексанона (ПЦОН-2).

Показана возможность применения оптимальных составов композиций в качестве защитных покрытий по строительным конструкциям и прочных полимербетонных полов на предприятиях текстильной промышленности.

The use of polymeric materials and their economic efficiency lies in the possibility of manufacturing, on their basis, of protective coatings for building structures, floor coverings and other elements of various formulations that provide the required performance properties, the most important of which are physical and mechanical. In this regard, the aim of the research was to analyze the dependences of the mechanical properties and the degree of hardening of polyester acrylate composites on the content of hardening components.

Strength tests have shown the possibility of obtaining high-strength polyether acrylate composites based on MGF-9 resin using cobalt octoate (OK-1) as a hardening accelerator and a hardening initiator – cyclohexanone peroxide (PCON-2).

The possibility of using optimal compositions of compositions as protective coatings for building structures and durable polymer concrete floors at enterprises of the textile industry is shown.

Ключевые слова: полиэфиракрилатная смола, композиционные полимерные материалы, эпоксидный композит, механические свойства, вяжущее, отвердитель, ускоритель отверждения, степень отверждения, прочностные характеристики.

Keywords: polyester acrylate resin, composite polymer materials, epoxy composite, mechanical properties, binder, hardener, hardening accelerator, degree of hardening, strength characteristics.

Введение

Повышение долговечности строительных конструкций и технологического оборудования во всех отраслях промышленности, в том числе и в текстильной, приобретает особую актуальность в современных условиях развития экономических отношений. С развитием химических и биологических технологий традиционные строительные материалы, используемые для изготовления строительных конструкций, полов, защитных покрытий, не удовлетворяют требованиям долговечности. Наиболее целесообразным в этом случае является использование армополимербетонных конструкций, полимерных защитных покрытий, клеев, герметиков. Для предприятий текстильной промышленности характерны высокие нагрузки на полы, эксплуатация строительных конструкций и материалов в условиях агрессивного воздействия производственной среды, поэтому необходимо использование особого типа покрытий для конструкций и полов, которые способны

выдерживать такого вида воздействия и нагрузки.

Строительные материалы и изделия на основе синтетических смол весьма эффективны при эксплуатации в агрессивных средах. При сравнении их с композитами на других связующих, выделяются их повышенные физико-механические свойства, износ- и химическая стойкость [1...4], электрическое сопротивление. Такие строительные материалы обычно наносят в виде тонкослойных лакокрасочных защитных покрытий и мастик.

Экспериментальные исследования механических свойств полиэфиракрилатной смолы МДФ-9 и композитов, полученных на ее основе, с добавлением кварцевого песка, проводились авторами ранее [5] с целью оптимизации состава и технологии получения этих материалов. В настоящей статье эти и полученные позже экспериментальные данные анализируются для получения дополнительной информации о меха-

низмах, формирующих механические свойства данного класса материалов.

Материалы и методы

Для получения композиционного материала использованы: вяжущее – олигоэфир-акрилат марки МГФ-9, отвердитель – пероксид циклогексанона (ПЦОН-2) и ускоритель отверждения – октоат кобальта (ОК-1). Образцы изготавливались в металлических формах, предварительно смазанных парафином. Для исследования механических свойств использовали образцы прямоугольного сечения с размерами 10×10×30 мм.

Определение прочности образцов проводили на универсальной испытательной машине Shimadzu Autograph AG-X Series (Япония). Управление процессом испытаний и предварительная обработка данных, получаемых на этой машине, производятся с помощью программного обеспечения TRAPEZIUM X*1. Измерения проводились с различной скоростью перемещения активного захвата – от 1 до 10 мм/мин. Усилие растяжения и сжатия было направлено вдоль длинной оси образца.

Кроме того, проводились испытания методом вдавливания индентора [6]. При этом

определялись твердость и модули упругости и деформации.

Все измерения осуществлялись при нормальных условиях.

Определение оптимальных условий для получения заданных свойств отвержденной смолы и композитов на ее основе проводилось с использованием метода математического планирования эксперимента (ММПЭ). Основным результатом этого метода – регрессионное уравнение, связывающее исследуемое свойство с влияющими на него факторами. Рассмотрим использование ММПЭ на примере определения прочности (при испытании на сжатие и изгиб) отвержденной смолы в зависимости от количества инициатора (ПЦОН-2) и ускорителя отверждения (ОК-1) [4]. Массовые доли: отвердителя – 1,6; 2,8 и 4,0; ускорителя отверждения – 3,2; 4,4 и 5,6.

Матрица планирования эксперимента содержит девять вариантов сочетания трех разных уровней двух факторов (план Коно). Соответственно, обработка экспериментальных данных позволяет получить регрессионное уравнение, содержащее девять коэффициентов:

$$Y_1 = A_0 + A_1 \cdot X_1 + A_2 \cdot X_2 + A_{11} \cdot X_1^2 + A_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + A_{22} \cdot X_2^2 + A_{112} \cdot X_1^2 \cdot X_2 + A_{122} \cdot X_1 \cdot X_2^2 + A_{1122} \cdot X_1^2 \cdot X_2^2.$$

Результаты и обсуждения

Полученное для прочности при сжатии

$$Y_1 = 178,000 - 4,900 \cdot X_1 + 18,600 \cdot X_2 - 9,500 \cdot X_1^2 + 8,725 \cdot X_1 \cdot X_2 - 24,200 \cdot X_2^2 - 10,425 \cdot X_1^2 \cdot X_2 + 11,025 \cdot X_1 \cdot X_2^2 + 5,675 \cdot X_1^2 \cdot X_2^2.$$

Графически результаты вычислений по данному регрессионному уравнению представлены в виде изолиний уровней отклика на двумерной диаграмме (рис. 1 – зависимость изменения прочности композитов (МПа) на сжатие от содержания отверждающих компонентов ПЦОН-2 (%) и ОК-1 (%)).

Оптимальные значения факторов по этой диаграмме находятся визуально. Оптимальное для получения максимальной прочности на сжатие соотношение компонентов оказалось следующим: на 100 час-

уравнение регрессии имеет вид:

тей (по массе) смолы следует брать 3 части отвердителя и 4,6 частей ускорителя отверждения.

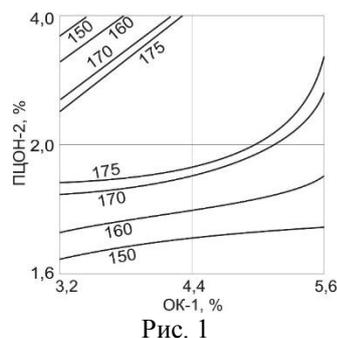


Рис. 1

Оптимальные значения факторов по этой диаграмме находятся визуально. Оптимальное для получения максимальной прочности на сжатие соотношение компонентов оказалось следующим: на 100 частей (по массе) смолы следует брать 3 части отвердителя и 4,6 частей ускорителя твердения. Стандартный анализ уравнения регрессии на экстремумы (через частные производные) дал, близкие к визуальным, значения: 3,03 части отвердителя и 4,24 части ускорителя твердения.

Регрессионное уравнение полезно для определения оптимальных соотношений

переменных факторов. Но для более детального анализа необходимо построение графиков однопараметрических зависимостей. На рис. 2 представлены зависимости четырех характеристик отвержденной смолы от содержания отвердителя (слева) и ускорителя твердения (справа) в исходной смеси (сверху – вниз: степень отверждения; твердость (МПа); прочность на сжатие (МПа); прочность на изгиб (МПа). Содержание фактора: максимальное значение – \bullet —, среднее значение – \blacktriangle —, минимальное – \blacksquare —).

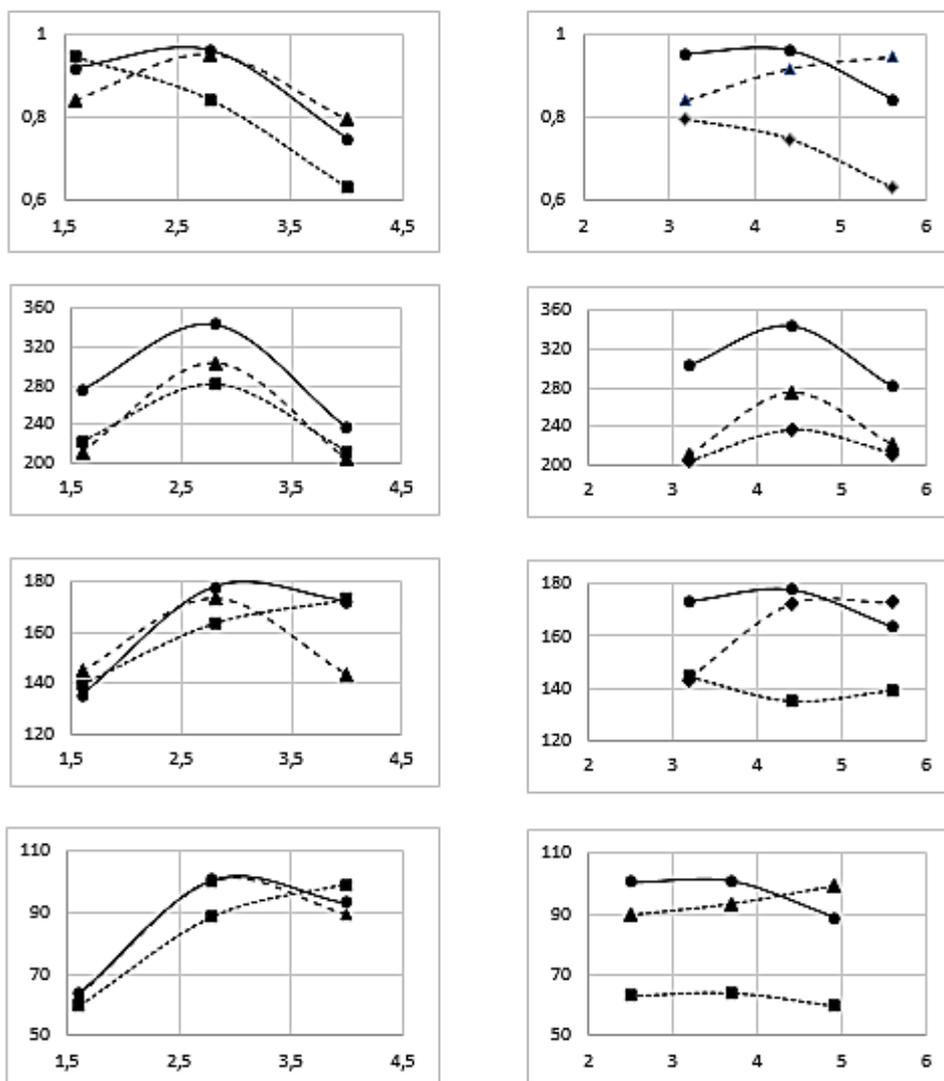


Рис. 2

Как видно из рис. 2, степень отверждения смолы в проведенных экспериментах никогда не достигает значения 1,0, откуда следует, что смола никогда не отвердевает

полностью. В связи с этим имеет смысл обратиться к определению термина "твердое состояние".

Известно, что в физике "твердым" называют агрегатное состояние вещества, в котором оно способно противостоять внешним воздействиям, стремящимся изменить его форму или размеры. Это определение макроскопическое, базирующееся фактически на видимых, относительно легко определяемых признаках – форма и размеры.

Второе определение – термодинамическое, фазовое. Признаком различия двух сосуществующих фаз является наличие физической (наблюдаемой так или иначе) границы раздела между ними. Фазы могут отличаться по составу, структуре (атомно-молекулярной) и свойствам. Макроскопически отвержденная смола находится в твердом агрегатном состоянии. Не полностью отвержденной смолу можно считать лишь в том случае, если из нее может быть легко выделена жидкая (текучая) компонента.

В микроскопическом понимании твердым называется такое состояние вещества, в котором тепловое движение молекул (атомов) сводится к колебаниям около некоторых положений равновесия, которые практически не меняются с течением времени. Разделение твердой и жидкой фаз в этом плане достаточно четко проводится лишь для веществ с относительно простым составом молекул – одноатомным или состоящим из небольшого числа атомов. Однако и в этом случае однозначное определение фазового состояния вещества (или исследуемого образца) не всегда возможно. Так, из-за образования гетерофазных флуктуаций состояние твердого (кристаллического) вещества в окрестности дефектов кристаллической структуры можно в определенном смысле (по степени упорядоченности) считать близким к жидкому [7...10].

Отвержденные синтетические смолы (олиго- или полимеры) – это вещества, состоящие из многоатомных молекул сложного строения. Большие размеры и разветвленность этих молекул затрудняют трансляционную компоненту их теплового движения даже в жидком состоянии и приводят к почти полному его прекращению при относительно низких температурах – отвер-

ждению. Таким образом, степень отверждения смолы с позиций молекулярно-кинетической теории сводится к степени свободы трансляционного теплового движения молекул.

В процессе отверждения смолы происходит генерация свободных радикалов из пероксида циклогексанона, взаимодействие их с CH_2 -группами метакрильного фрагмента смолы и сшиванием последних в макромолекулы. Укрупнение молекул обуславливает потерю ими способности к трансляционному тепловому движению и переходу вещества в макроскопически твердое состояние. В наших экспериментах со смолой степень отверждения определялась долей некоторых (избранных) фрагментов макромолекул, вступивших (или не вступивших) в реакцию определенного типа, то есть микроскопически. Такой способ определения степени отверждения по отношению к макроскопическому состоянию, конечно, является косвенным, но вполне допустим по отношению к состоянию микроскопическому (атомно-молекулярному).

Графики, приведенные на рис. 2, позволяют сопоставить степень отверждения смолы с ее механическими свойствами, определяющими прочность образцов [11]. Как видно, максимальной степени отверждения отвечают и максимальные значения твердости и прочности. Однако полного соответствия между ними не наблюдается. Особенно четко это видно на рис. 3 (зависимость между прочностными характеристиками и степенью отверждения смолы: слева – направо: твердость, прочность на сжатие, прочность на изгиб (МПа)), где показано соотношение между степенью отверждения и прочностными характеристиками. Разброс экспериментальных точек настолько велик, что линию тренда (сплошная линия на рисунках) можно провести лишь с очень малым значением коэффициента достоверности интерполяции R^2 .

Все механические свойства материалов определяются в ходе их деформации при различных схемах приложения механического напряжения. Естественно, при этом

могут действовать разные атомно-молекулярные механизмы деформирования, при-

водящие к разным результатам.

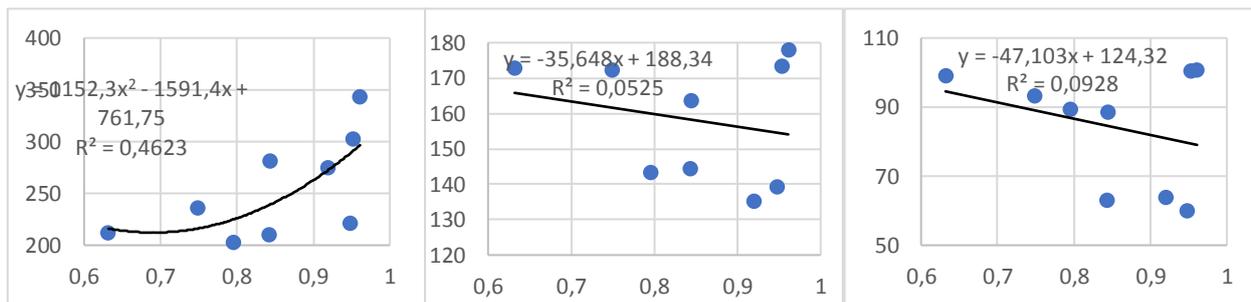


Рис. 3

Отметим, что в отличие от деформации веществ с простыми молекулами, когда молекулы остаются неизменными, при деформации полимерных материалов происходят изменения и в строении молекул, они делятся на части, которые затем соединяются в новые молекулы. Многообразие процессов приводит к тому, что описать процесс деформации отвержденного полимера какой-либо одной атомно-молекулярной моделью невозможно. Поэтому необходимо развитие обобщенных моделей, базирующихся на введении некоторых обобщенных параметров типа параметра беспорядка [12].

сжатие и изгиб, также не наблюдается (рис. 5). Лишь видно, что величина всех модулей уменьшается с увеличением времени выдержки, что свидетельствует о процессе ползучести [13].

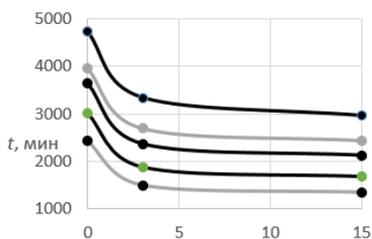


Рис. 4

Методом вдавливания индентора определялись твердость и упругие модули (условно-мгновенный E_0 , равновесный $E_{ув}$ и модуль деформации E_d) через отношение нагрузки на индентор (постоянной) к глубине погружения индентора (то есть деформации) спустя 1 с, 3 мин и 15 мин после начала приложения нагрузки. На рис. 4 результаты измерения модулей представлены как функция времени выдержки образца под нагрузкой. Однозначного соответствия между изменением модулей и степенью отверждения, как и при испытаниях на

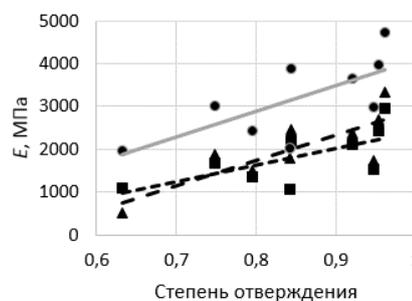


Рис. 5

Расчеты показали, что относительная деформация изменяется с течением времени по закону, близкому к логарифмическому, как это было показано в работах [14], [15] ранее.

Существенным в данном исследовании является то, что механические свойства, определенные методом вдавливания индентора (твердость и модули), демонстрируют тенденцию к росту с увеличением степени отверждения смолы (рис. 3 и рис. 5). Прочность при испытаниях на сжатие и изгиб, наоборот, уменьшается. Можно предположить, что это расхождение обусловлено особенностями напряженного состояния образцов. При испытаниях на сжатие и изгиб в напряженном состоянии находится (деформируется) материал образца по всему его сечению и, в конечном счете, образец разрушается. При

вдавливании индентора деформируется лишь небольшая часть образца около индентора, деформация в той или иной степени локализована, целостность образца не нарушается, образец до разрушения не доводится.

Отвержденные полимерные материалы обычно разрушаются хрупко. Процесс разрушения начинается с появления микротрещин, образование которых легче всего происходит на поверхности образца. Уменьшение прочности с увеличением степени отверждения означает, что наличие неполностью отвержденных участков (комплексов) затрудняет образование микротрещин.

Склонность к хрупкому разрушению практически у всех материалов, в том числе аморфных, усиливается с понижением температуры. Согласно теории гетерофазных флуктуаций [16] образование квазизжидких областей наиболее вероятно на поверхности материала и повышается с ростом температуры. Можно сказать, что при увеличении температуры состояние поверхности кристалла в некотором смысле приближается к жидкому – уменьшается степень его кристалличности. Отсюда можно сделать вывод о том, что чем больше кристаллической фазы, тем больше вероятность хрупкого разрушения и меньше прочность. Отверждение смолы приводит к уменьшению степени беспорядка в ее структуре, значит к охрупчиванию и уменьшению прочности.

При вдавливании индентора механические напряжения в значительной степени локализованы, до свободной поверхности образца не доходят, а образования микротрещин практически не происходит. Прочностные характеристики материала в этом случае определяются соотношением твердой и квазизжидкой составляющих и, естественно, растут с ростом степени отверждения. Именно так можно объяснить увеличение характеристик, определяемых методом вдавливания, с ростом степени отверждения.

Практическое применение результатов исследования заключалось в оптимизации состава защитного покрытия для метал-

лических конструкций в помещениях производственного назначения АО "Мордовспецстрой" и при изготовлении верхнего покрытия полов путем нанесения антикоррозионного полимерного покрытия МГФ-9. Это связующее характеризуется декоративными качествами и высокой прочностью и коррозионной стойкостью, поэтому может применяться для полимербетонов в цветных изделиях. Оптимальная толщина покрытия составляет от 3-х до 5...6 мм.

МГФ-9 входит в разработанный состав для изготовления лакокрасочных и мастичных композиций, высоконаполненных полимербетонов, которые могут использоваться в качестве антикоррозионной защиты строительных конструкций и полов в условиях высоких механических нагрузок и агрессивного воздействия среды путем нанесения слоя полимерного покрытия. При высоких нагрузках на покрытия полов на предприятиях текстильной промышленности и аналогичных производств рационально использование каркасных полимербетонов с зернами крупного заполнителя. В результате исследования прочностных показателей выявлен наиболее оптимальный защитный состав. При этом к приведенной выше рецептуре композита (на 100 частей по массе смолы – 3 части отвердителя и 4,6 частей ускорителя твердения) вводится при перемешивании гранитный щебень (фракция 2,5...5 мм) в количестве 2000 частей по массе, либо песок – 200 частей по массе.

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ экспериментальных данных по механическим свойствам отвержденной полиэфиракрилатной смолы МГФ-9.

2. Установлено, что максимальной степени отверждения смолы, как правило, отвечают максимальные значения прочностных характеристик, однако однозначного соответствия между величинами этих свойств не наблюдается, что связывается с

различием молекулярных механизмов деформации при разных способах деформирования образцов.

3. При испытании методом вдавливания индентора наблюдается увеличение твердости и упругих модулей с ростом степени отверждения. Обнаружены также признаки логарифмической ползучести.

4. Проведен анализ способов определения понятия "твердое состояние" и методов оценки степени отверждения.

5. Практическое применение результатов исследования заключается в разработке оптимального состава и применении полученного композиционного материала для защиты металлических конструкций и при изготовлении верхнего покрытия полов в помещениях производственного назначения АО "Мордовспецстрой" путем нанесения антикоррозионного полимерного покрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ерофеев В.Т., Ельчищева Т.Ф.* Исследование накопления солей в наружных ограждающих конструкциях зданий промышленных предприятий // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, № 2. С. 193...200.

2. *Желдаков Д.Ю., Гагарин В.Г.* Терминология и общая теория прогнозирования предельной долговечности конструкций // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, № 2. С.114...118.

3. *Ерофеев В.Т., Ельчищева Т.Ф.* Изменение влажности и теплопроводности строительных материалов при наличии в их составе солей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, № 4. С. 18...27.

4. *Прошкина О.Г.* Разработка полимерных композитов на основе наномодифицированных полиэфиракрилатных смол // Актуальные вопросы архитектуры и строительства, Саранск, 23–24 декабря 2020 года. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, 2020. С. 352...355.

5. *Ivlev V.I., Sigachyov A.F., Fomin N.E., Yudin V.A.* Relaxation in resins with low-frequency mechanical cycling // Materials Physics and Mechanics. – Vol. 32, 2017. P. 207...212. DOI:10.18720/MPM.3222017-13.

6. *Erofeev V.T., Smirnov V.F., Myshkin A.V.* The study of species composition of the microflora, selected surface samples proliferation composites in humid maritime climate // IOP Conference series: Materials Science and Engineering. – №698(2), 2019. P. 022082. DOI:10.1088/1757-899X/698/2/022082.

7. *Pargi M.N.F., Teh P.L., Hussiensyah S., Yeoh C.K., Ghani. S.A.* Recycled-copper-filled epoxy composites: the effect of mixed particle size // International Journal of Mechanical and Materials Engineering. – №10, 2015. 3. <https://doi.org/10.1186/s40712-015-0030-2>.

8. *Wong D.W.Y., Lin L., McGrail P.T., Peijs T., Hogg P.J.* Improved fracture toughness of carbon fibre/epoxy composite laminates using dissolvable thermoplastic fibres // Composites Part A // Applied Science and Manufacturing. – №41(6), 2010. P.759...767. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.02.008>.

9. *Луйв Э.Х., Машегуров А.Д., Роиз Л.Е.* Экспресс-метод определения реологических свойств полимерных материалов. – М.: Экспресс-информация ВНИИЭСМ 1983. Серия № 6.

10. *Qiu Y., Wu D., Xie W., Wang Z., Peng S.* Thermoplastic polyester elastomer composites containing two types of filler particles with different dimensions: Structure design and mechanical property control // Composite Structures. – №197(1), 2018. P. 21...27. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.035>.

11. *Erofeev V.T., Elchishcheva T.F., Preobrazhenskaya E.M., Makarchuk M.V., Afonin V.V.* Optimization of the Strength Characteristics of the Cellular Structure in Samples of Thermoplastic Polyester // International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures 21-22 May 2019, Ural Federal University, 19 Mira Street, Ekaterinburg, Russian Federation. Accepted papers received: 21 October 2020. Published online: 21 November 2020. SPCECI 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 972 (2020) 012056. doi:10.1088/1757-899X/972/1/012056.

12. *Erofeeva I.V., Emelyanov D.V., Fedortsov V.A., Moiseev V.V., Zotkina M.M., Afonin V.V., Podzhivotov N.Y.* Study of the Behavior of Cement Composites in the Conditions of Cyclic Exposure Positive and Negative Temperatures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 5th International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures, SPCECI 2019. 19 Mira Street, Ekaterinburg, – 2020. P. 012052. DOI 10.1088/1757-899X/972/1/012052.

13. *Afonin V.V., Erofeeva I.V., Emelyanov D.V., Fedortsov V.A., Kondrashchenko V.I.* Decision-making on quality composition materials exposed to temperature differences // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 8th International Scientific Conference on Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings, TRANSBUD. Feuerbach square 7, Kharkiv: Institute of Physics Publishing. – 2019. P. 012077. DOI 10.1088/1757-899X/708/1/012077.

14. *Петренко В.И., Макаrchuk М.В.* Исследование прочностных характеристик образцов из полилактида, выполненных по аддитивной технологии // Мат. XI Междунар. научн.-инновационной молодежной конф.: Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент. – Тамбов, 31 октября – 01 ноября 2019 г. – Тамбов. – 2019. С. 96...97.

15. Ivlev V.I., Sigachev A.F., Yudin V.A. Stress Relaxation and Creep of Materials Based on Epoxy Resin with a Filler from Hemp Fibers. *Inorganic Materials: Applied Research*. – Vol. 11, №4, 2020. P. 915...918. DOI:10.1134/S2075113320040152.

16. Bakai A.S. Heterophase fluctuations at the gas-liquid phase transition // *Condensed Matter Physics*. NSC Kharkiv Institute of Physics&Technology, Kharkiv. – 2015. P. 40.

REFERENCES

1. Erofeev V.T., Elchishcheva T.F. Investigation of salt accumulation in the external enclosing structures of buildings of industrial enterprises // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. - 2020, No. 2. S. 193 ... 200.

2. Zheldakov D.Yu., Gagarin V.G. Terminology and general theory of predicting the ultimate durability of structures // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. - 2017, No. 2. P. 114 ... 118.

3. Erofeev V.T., Elchishcheva T.F. Change in humidity and thermal conductivity of building materials in the presence of salts in their composition // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. - 2020, No. 4. S. 18 ... 27.

4. Proshkina O.G. Development of polymer composites based on nanomodified polyester acrylate resins // *Actual issues of architecture and construction, Saransk, December 23–24, 2020*. - Saransk: National Research Mordovian State University named after. N.P. Ogareva, 2020. S. 352...355.

5. Ivlev V.I., Sigachyov A.F., Fomin N.E., Yudin V.A. Relaxation in resins with low-frequency mechanical cycling // *Materials Physics and Mechanics*. – Vol. 32, 2017. P. 207...212. DOI:10.18720/MPM.3222017-13.

6. Erofeev V.T., Smirnov V.F., Myshkin A.V. The study of species composition of the microflora, selected surface samples proliferation composites in humid maritime climate // *IOP Conference series: Materials Science and Engineering*. – №698(2), 2019. P. 022082. DOI:10.1088/1757-899X/698/2/022082.

7. Pargi M.N.F., Teh P.L., Hussienyiah S., Yeoh C.K., Ghani. S.A. Recycled-copper-filled epoxy composites: the effect of mixed particle size // *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. – №10, 2015. 3. <https://doi.org/10.1186/s40712-015-0030-2>.

8. Wong D.W.Y., Lin L., McGrail P.T., Peijs T., Hogg P.J. Improved fracture toughness of carbon fibre/epoxy composite laminates using dissolvable thermoplastic fibres // *Composites Part A // Applied Science and Manufacturing*. – №41(6), 2010. P.759...767. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.02.008>.

9. Liiv E.Kh., Mashegirov A.D., Roiz L.E. Express method for determining the rheological properties of polymeric materials. - М.: Express information VNIIESM 1983. Series No. 6.

10. Qiu Y., Wu D., Xie W., Wang Z., Peng S. Thermoplastic polyester elastomer composites containing two types of filler particles with different dimensions: Structure design and mechanical property control // *Composite Structures*. – №197(1), 2018. P. 21...27. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.035>.

11. Erofeev V.T., Elchishcheva T.F., Preobrazhenskaya E.M., Makarchuk M.V., Afonin V.V. Optimization of the Strength Characteristics of the Cellular Structure in Samples of Thermoplastic Polyester // *International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures 21-22 May 2019, Ural Federal University, 19 Mira Street, Ekaterinburg, Russian Federation*. Accepted papers received: 21 October 2020. Published online: 21 November 2020. SPCECI 2019. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 972 (2020) 012056. doi:10.1088/1757-899X/972/1/012056.

12. Erofeeva I.V., Emelyanov D.V., Fedortsov V.A., Moiseev V.V., Zotkina M.M., Afonin V.V., Podzhivotov N.Y. Study of the Behavior of Cement Composites in the Conditions of Cyclic Exposure Positive and Negative Temperatures // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 5th International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures, SPCECI 2019. 19 Mira Street, Ekaterinburg, – 2020. P. 012052. DOI 10.1088/1757-899X/972/1/012052*.

13. Afonin V.V., Erofeeva I.V., Emelyanov D.V., Fedortsov V.A., Kondrashchenko V.I. Decision-making on quality composition materials exposed to temperature differences // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 8th International Scientific Conference on Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings, TRANSBUD. Feuerbach square 7, Kharkiv: Institute of Physics Publishing. – 2019. P. 012077. DOI 10.1088/1757-899X/708/1/012077*.

14. Petrenko V.I., Makarchuk M.V. Investigation of the strength characteristics of polylactide samples made using additive technology // *Mat. XI Intern. scientific-innovative youth conference: Modern solid-phase technologies: theory, practice and innovative management. - Tambov, October 31 - November 01, 2019 - Tambov. – 2019. S. 96...97*.

15. Ivlev V.I., Sigachev A.F., Yudin V.A. Stress Relaxation and Creep of Materials Based on Epoxy Resin with a Filler from Hemp Fibers. *Inorganic Materials: Applied Research*. – Vol. 11, №4, 2020. P. 915...918. DOI:10.1134/S2075113320040152.

16. Bakai A.S. Heterophase fluctuations at the gas-liquid phase transition // *Condensed Matter Physics*. NSC Kharkiv Institute of Physics&Technology, Kharkiv. – 2015. P. 40.

Рекомендована кафедрой строительных материалов и технологий архитектурно-строительного факультета МГУ им. Н.П. Огарева. Поступила 22.12.21.