



СТРОИТЕЛЬНАЯ НАУКА



Екатерина Румынская

ОГНЕЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ СТАЛЬНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ: СОСТАВ, СВОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 614.842.6:661.635.131

Аннотация. В статье рассматривается проблема огнезащиты стальных строительных конструкций, возможности ее решения путем производства огнезащитных покрытий из отечественного сырья, представлен разработан состав огнезащитного покрытия на основе магнийаммонийфосфатного связующего и результаты исследования его свойств, технологический процесс производства.

Abstract. The article discusses the problem of steel fireproofing for construction, the possibility of solving it by producing fireproof coatings from domestic raw materials, the developed composition of a fireproof coating based on a magnesium ammonium phosphate binder and the results of a study of its properties, the technological process of its production.

ВВЕДЕНИЕ

Материалы, используемые в настоящее время в строительном комплексе Республики Беларусь, либо не в полной мере обеспечивают требуемую для зданий I степени огнестойкости огнезащиту металлических несущих конструкций, либо отличаются высокой стоимостью. Поэтому проблема огнезащиты в масштабе страны остается актуальной и требует решения. Одной из основных причин сложившегося положения является отсутствие эффективных видов связующих для огнезащитных композиций [1].

Перспективным направлением решения проблемы может стать использование для огнезащиты конструкций фосфатных связующих холодного отверждения. Фосфатные связующие обладают целым рядом преимуществ перед традиционно используемыми материалами, в первую очередь высокой жаростойкостью, что позволяет выдерживать температурные нагрузки до 1300–1450 °С без потери своих физико-механических свойств. Они обеспечивают высокую прочность сцепления с основанием, обладают высоким пределом прочности при сжатии, износостойкостью, термостойкостью [2].

Наиболее перспективными из них являются магнийаммонийфосфатные связующие, часто именуемые более распространенным термином «вяжущие», но высокая стоимость сырьевых компонентов этих связующих препятствует их широкому применению.

Решением этой задачи может стать использование вместо дорогостоящих сырьевых материалов техногенных отходов, обеспечивающих отверждение в естественных условиях, т. е. без температурной обработки. Перспективными в этом отношении являются многотоннажные отходы отработанных и не используемых в настоящее время периклазохромитовых огнеупоров. Это выгодно не только с экономической, но и экологической точки зрения, так как позволит решить многолетнюю проблему утилизации отходов, которые ежегодно образуются на цементных и известковых заводах страны.

Настоящее исследование посвящено разработке состава и технологии получения фосфатного связующего (вяжущего) и состава жаростойкого покрытия на его основе из техногенных продуктов для огнезащиты стальных несущих конструкций.

Этот продукт будет изготовлен из доступного отечественного сырья и станет импортозамещающим. Реализация его производства в промышленном масштабе позволит снизить долю импортных огнезащитных покрытий на рынке, что, как никогда, актуально в настоящее время.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Целью исследования является разработка состава и технологии получения и применения жаростойкого покрытия холодного отверждения из техногенных продуктов.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- разработать состав и исследовать физико-технические свойства фосфатного связующего и жаростойкого покрытия на его основе и влияние технологических параметров;

- разработать технологический процесс производства защитного жаростойкого покрытия на основе фосфатного связующего и его нанесения;
- разработать проекты научно-технической документации;
- провести опытно-промышленные испытания разработанного защитного жаростойкого покрытия и технико-экономические расчеты.

Для разработки концентрационных пределов состава жаростойкого покрытия стальных строительных конструкций требовалось проведение системных лабораторных исследований материаловедческого характера с привлечением современных физико-химических методов.

При разработке состава фосфатного связующего для жаростойкой композиции варьировали содержание сырьевых компонентов, водотвердое соотношение (В/Т), гранулометрический состав компонентов, содержание регулятора срока схватывания.

На первом этапе была проведена предварительная серия опытов по получению магнийаммонийфосфатного связующего на основе аммофоса и тонкоизмельченных отработанных периклазохромитовых огнеупоров. В ходе работ выявились наиболее значимые технологические

параметры и их диапазоны, что позволило в дальнейшем сократить количество экспериментов.

В результате ряда экспериментов было установлено, что наилучшие свойства, которые определяли в 2-суточном возрасте, проявляет состав связующего с содержанием 42 масс. % аммофоса: при В/Т = 0,37 и подвижности Пк4 адгезия составила 0,9 МПа, прочность на сжатие – 12 МПа, при В/Т = 0,2 и подвижности Пк2 адгезия – 1,3 МПа, прочность на сжатие – 25 МПа.

Далее были получены результаты по изучению свойств состава при воздействии температурных нагрузок до 1060 ± 5 °С (рис. 1) и по разработке жаростойкого покрытия.

В процессе испытания жаростойких покрытий в печах, согласно требованиям ГОСТ 30247.0, должен быть создан температурный режим «стандартного пожара», температура которого при нагревании покрытия в печи в течение 150 мин достигает 1060 ± 5 °С. При этом оценивались прочность на сжатие, адгезия и теплоизолирующая способность, которая зависит от целостности сохранения вышеуказанных свойств при воздействии температуры.

Знание вышеизложенных требований необходимо для того, чтобы при исследовании влияния технологических

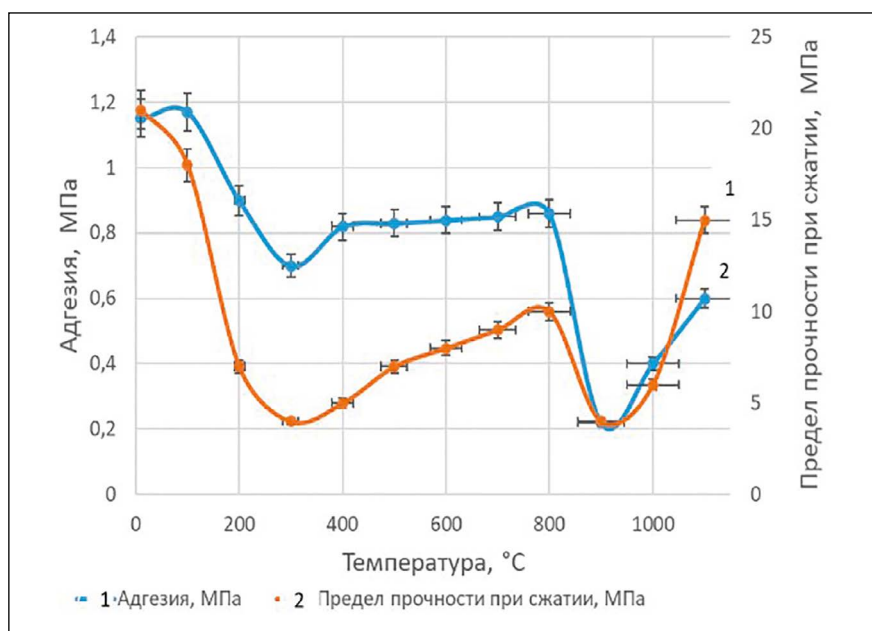


Рис. 1. Зависимость адгезии (1) и прочности на сжатие (2) от температуры

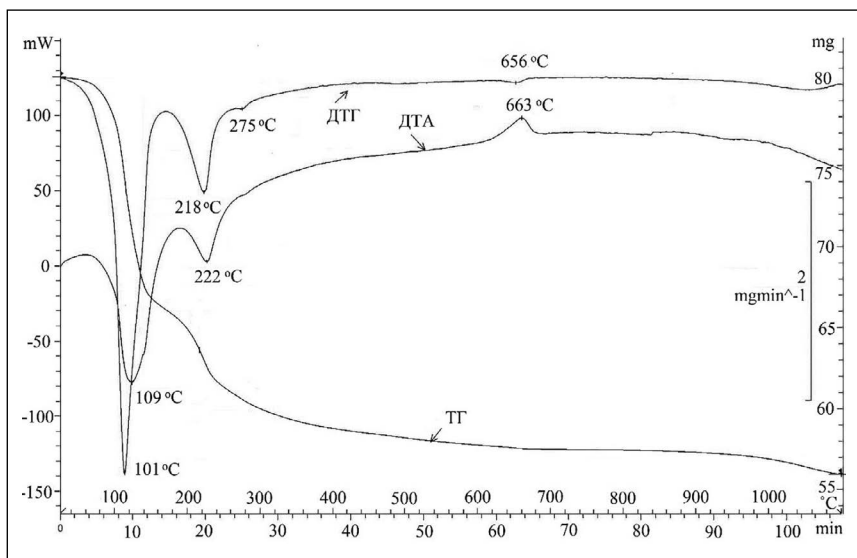


Рис. 2. Дериватограмма состава с содержанием 42 масс. % аммофоса

параметров на свойства жаростойких покрытий учитывать не только их значения в момент нанесения, но и их сохранность в процессе нагревания, т. е. при пожаре.

С этой целью были проведены термографические (рис. 2) и рентгенографические исследования влияния температуры на адгезию и прочность на сжатие при температурных нагрузках до 1100 °С.

На кривой ДТА регистрируются два эндотермических эффекта. Первый из них с минимумом при 109 °С носит кооперативный характер и связан с удалением адсорбционной воды и части кристаллизационной. Это согласуется с ходом кривой ТГ, из которого видно, что убыль массы соответствует расчетному количеству воды, внесенной при затворении.

Для установления природы выявленных термических эффектов с экстремумами при 109 °С, 222 °С и 663 °С были сняты рентгенограммы композиции после температурного воздействия.

Вид кривых (рис. 1) свидетельствует о том, что как прочность на сжатие, так и адгезия изменяются симбатно в процессе повышения температуры.

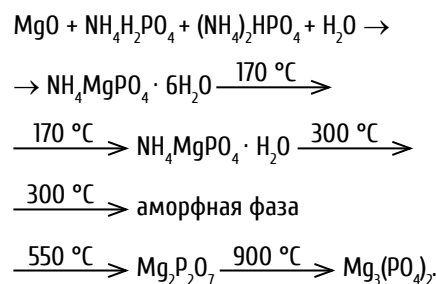
По данным ДТА (рис. 2) и РФА установлено, что причиной падения свойств – адгезии и прочности на сжатие – при температурах 300 °С является превращение исходного

струвита $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ в дитмарит $(\text{NH}_4)_2\text{MgPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ и далее при 900 °С с переходом пирофосфата магния $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ в кристаллический ортофосфат магния $\text{Mg}_2(\text{PO}_4)_3$.

Для ликвидации последствий разупрочняющего эффекта, обусловленного процессом аморфизации, были опробованы разные наполнители. Но наибольшую эффективность продемонстрировал вспученный вермикулит, вводимый в количестве 20 масс. %. Он вводился в качестве минерального, а значит, негорючего жаростойкого, химически инертного, легкого наполнителя для повышения способности покрытия препятствовать тепловому потоку, а также облегчения веса.

Для подтверждения его инертного поведения в составе покрытия были сняты инфракрасные спектры и рентгенограммы, анализ которых подтвердил отсутствие его химического взаимодействия. Из этого вытекает, что роль вермикулита в данной композиции, по существу, свелась к его демпфирующему действию, оказывающему влияние на структуру композиции.

Установлена схема фазовых превращений, происходящих в жаростойком покрытии при воздействии температурных нагрузок во время пожара, протекающих по упрощенной схеме



Таким образом, настоящая материаловедческая задача, включающая влияние многих физических, физико-химических свойств требуемого уровня, привела к разработке многокомпонентного состава. Решение этой задачи является непростым, с привлечением множества физических и физико-химических методов исследования и длительным по времени процессом. Это потребовало привлечения соответствующих программ и их математического обеспечения. Такой подход обеспечил сокращение времени решения данной задачи в последующем, опираясь на разработанный состав жаростойкого покрытия стальных строительных конструкций. Это позволит оперативно вносить коррективы с учетом специфических требований при решении материаловедческих задач.

Полученные экспериментальные результаты по разработке многокомпонентного композиционного материала послужили исходными данными для исследования свойств жаростойкого покрытия с использованием теории фракталов.

Сведения о применении данной теории для описания структуры и свойств композиционных материалов на неорганических связующих носят отрывочный характер. Фрактальная механика, в частности, применялась для исследования древесно-полимерных композитов, оксидной керамики и других материалов в отношении их структуры агрегации, расчета прочностных свойств, их фрактальных кластеров, размерности и некоторых других характеристик.

Однако среди перечня материалов, исследуемых с помощью фрактальной механики, материалы на магнийаммонийфосфатной связке и их свойства до сих пор не были изучены. Наше исследование призвано показать возможности этого метода для определения свойств композиционного

материала расчетным способом. В данном случае ставилась задача определить дополнительные свойства композиционного материала, не изученные экспериментальным образом.

В результате проведенного расчета [3] и ряда математических преобразований было разработано выражение (1) уточненной регрессионной модели, описывающей изменение прочности на сжатие покрытия от содержания наполнителя:

$$\sigma(x) = \exp(2,917 - 0,094 \cdot x) \quad (1)$$

Далее выражение разработанной регрессионной модели (1) было приравнено к ряду математических выражений – зависимостей изменения прочности на сжатие композитов по теории фракталов, применяемых для данного вида композита. После чего путем ряда математических преобразований были рассчитаны все неизвестные величины и коэффициенты из используемых выражений. По полученным данным с использованием программы Mathcad был рассчитан модуль упругости покрытия E_n с содержанием вспученного вермикулита 20 масс. %, который составил $E_n = 1,74 \cdot 10^3$ МПа, и модуль упругости связующего E_m , равный $21,70 \cdot 10^3$ МПа.

Затем был разработан технологический процесс производства и применения защитных жаростойких покрытий. Огнезащитный состав жаростойкого покрытия рекомендуется производить на заводах по производству сухих

строительных смесей. Продукт представляет собой сухую строительную смесь, изготавливаемую в заводских условиях, и поставляется на строительные объекты для использования. Произведен подбор необходимого оборудования для производства жаростойких покрытий.

Нанесение покрытия производится ручным или механизированным способом в соответствии с разработанной и утвержденной 30.12.2020 в УО «Белорусский государственный технологический университет» технологической инструкцией «Применение жаростойких составов для огнезащиты строительных конструкций».

Приготовление огнезащитного состава производится на строительном объекте. Технологический процесс включает следующие стадии:

- прием и распаковка тары с сухой смесью;
- подача ее в расчетном количестве в смеситель;
- подача в смеситель воды в расчетном количестве;
- смешивание с получением рабочего раствора;
- подача раствора в торкрет-машину.

Огнезащитный состав наносится послойно. На первой стадии – слой толщиной 1–10 мм. После схватывания и отвердения первого слоя наносится второй и при необходимости каждый последующий толщиной 1–10 мм. Допускается использование арматурной сетки для повышения толщины нанесения раствора за один раз.

Проведены пожарные испытания разработанного жаростойкого покрытия в аккредитованной лаборатории ИЦ «НИИ ПБ и ЧС МЧС Беларуси» (протоколы № 04-52/1679П от 26.12.2019 и № 04-52/1680П от 26.12.2019), которые показали, что после нагрева по температурному режиму стандартного пожара в течение 150 мин температуры на термопарах, присоединенных к стальным защищаемым подложкам с нанесенным покрытием толщиной 25 и 35 мм, соответственно составили 400 °С и 300 °С. Что значительно ниже критической температуры обрушения стальных конструкций в 500 °С и доказывает эффективность огнезащитного покрытия, соответствующую требованиям, предъявляемым к материалам I степени огнестойкости.

Проведены испытания разработанного жаростойкого покрытия в аккредитованной лаборатории в государственном предприятии «Институт жилища – НИПТИС им. Атаева С.С.» (протокол № 6/н от 04.08.2011), которые подтвердили заявленные свойства.

Разработаны и утверждены технологическая инструкция «Применение жаростойких составов для огнезащиты строительных конструкций» (в УО «Белорусский государственный технологический университет», от 30.12.2020) и проект технических условий на производство жаростойкого покрытия ТУ ВУ 100926738.001-2023 «СМЕСИ СУХИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ ОГНЕЗАЩИТНЫЕ «ФОСФИКС». Технические условия» (в ЗАО «Парад», от 07.06.2023). Опытная партия жаростойкого покрытия «ФОСФИКС» в количестве 1000 кг изготовлена на заводе по производству строительных материалов ЗАО «Парад» (акт от 07.05.2020) и успешно апробирована на строительном объекте в ЗАО «Стройэлектросфера» при выполнении огнезащитных работ (акт от 07.07.2020).

Получен патент Республики Беларусь № 19113 «Огнезащитный состав для стальных строительных конструкций», опубл. 30.06.2014.

Произведены экономические расчеты на производство жаростойкого покрытия, свидетельствующие, что за счет снижения стоимости затрат по сравнению с аналогами прибыль

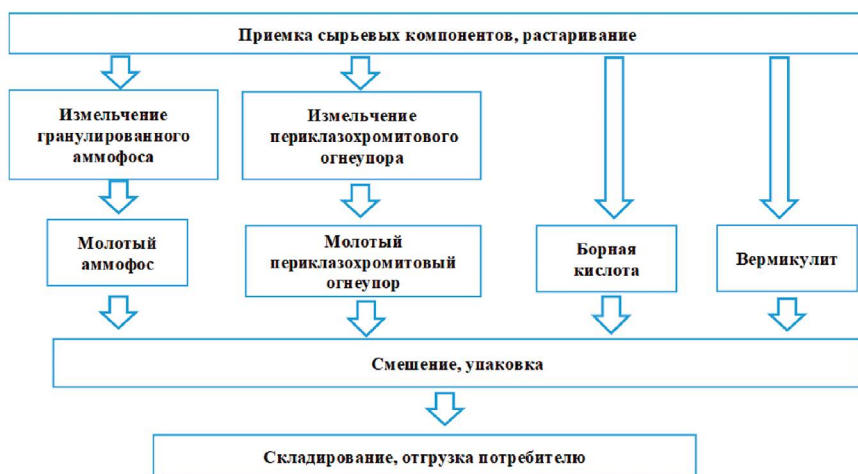


Рис. 3. Блок-схема производства жаростойкого покрытия

составит в эквиваленте 1880 тыс. долларов США при производстве его в Республике Беларусь в объеме 1000 т в год. Разработанное покрытие не только не уступает, но по некоторым огнезащитным, физическим, технологическим и экономическим показателям превосходит аналогичные свойства жаростойких составов на других связующих.

Результаты работы внедрены в курс лекций УО «Белорусский государственный технологический университет» по дисциплине «Основы архитектуры, строительного производства, строительные материалы и изделия» для студентов специальностей «1-26 02 02-04 Менеджмент (недвижимости)»; «1-26 02 02-05 Менеджмент (международный)» (справка УО «Белорусский государственный технологический университет» от 16.12.2020).

На основании вышеизложенного можно заключить, что покрытие продемонстрировало высокие свойства, не только не уступающие аналогичным штукатурным огнезащитным составам, но и превосходящие их по пожарно-техническим и экономическим показателям.

Реализация в Республике Беларусь технологии производства и применения новых эффективных огнезащитных материалов на основе фосфатных связующих с использованием вторичных периклазохромитовых огнеупоров технологически и технически целесообразна, так как:

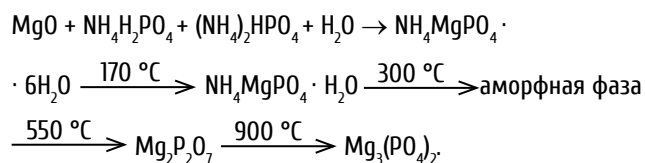
- снизит ущерб, наносимый пожарами;
- позволит обеспечить огнезащиту зданий и сооружений из стальных несущих конструкций с пределами огнестойкости не менее 150 мин;
- снизит стоимость огнезащиты по сравнению с используемой в настоящее время;
- позволит увеличить этажность возводимых зданий и сооружений I степени огнестойкости, выполненных из стальных каркасов;
- позволит существенно снизить вес конструктивной огнезащиты и конструкций в целом;
- расширит возможности архитектурно-строительных решений;
- улучшит экологическую ситуацию путем утилизации многотоннажных отходов периклазохромитовых огнеупоров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнение работ проводилось в несколько этапов. В ходе их осуществлено следующее:

1. Изучены свойства композиции, которые при $V/T = 0,2$ обеспечивают адгезию 1,1 МПа, прочность на сжатие – 23,5 МПа, подвижность – Пк2, сроки твердения – 2 сут.
2. Разработан состав жаростойкого покрытия стальных строительных конструкций, включающий, масс. %, фосфатное вяжущее – 80, наполнитель вермикулит – 20; и изучены его свойства (при подвижности Пк2): прочность на сжатие не менее 7,5 МПа в возрасте 2 сут., адгезия – не менее 0,8 МПа в возрасте 2 сут.; жизнеспособность не менее 60 мин; морозостойкость – не менее 75 циклов.
3. С помощью комплекса современных физико-химических методов исследования установлена термохимия

фазовых превращений, происходящих в жаростойком покрытии при воздействии температурных нагрузок во время пожара и протекающих по схеме



4. В результате проведенных расчетов на основе главных положений теории фракталов, используемых для исследования жаростойкого композиционного материала с дисперсным наполнителем вспученным вермикулитом, разработаны и определены [3]:
 - математическая зависимость описания прочности на сжатие покрытия от степени наполнения (содержания наполнителя в матрице связующего), которая представлена функцией $\sigma(x) = \exp(2,917 - 0,094 \cdot x)$;
 - модуль упругости фрактального кластера матрицы связующего E_m , который составил $21,70 \cdot 10^3$ МПа;
 - модуль упругости покрытия $E_n = 1,74 \cdot 10^3$ МПа.
5. Разработана технология производства защитного жаростойкого покрытия «ФОСМИКС», которая рекомендуется к реализации на заводах (цехах) по производству сухих строительных смесей.

Проведена опытно-промышленная апробация покрытия, в ходе которой наработано 1000 кг покрытия и проведены испытания в аккредитованных лабораториях, подтвердившие заявленные свойства. Результаты проведенных в ИЦ «НИИ ПБ и ЧС МЧС Беларуси» пожарных испытаний разработанного жаростойкого покрытия доказывают эффективность огнезащитного покрытия, соответствующую требованиям, предъявляемым к материалам I степени огнестойкости.

6. Разработанный материал является перспективным для практического использования для огнезащиты стальных строительных конструкций в строительном комплексе Республики Беларусь. Экономический эффект (прибыль) от использования защитного жаростойкого покрытия «ФОСМИКС» при защите металлических конструкций только за счет снижения стоимости продукта по сравнению с огнезащитными составами-аналогами составит 1880 тыс. долларов США при объеме потребления его в Республике Беларусь 1000 т в год. При этом производство и реализация в промышленном масштабе жаростойкого покрытия, изготовленного из доступного отечественного сырья, позволит снизить долю импортных защитных покрытий на рынке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Румынская, Е. И. Легкие жаростойкие бетоны для огнезащиты стальных строительных конструкций / Е. И. Румынская, М. И. Кузьменков // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2015. – Вып. 7. – С. 111–132.
2. Румынская, Е. И. Исследование термохимических превращений в огнезащитных покрытиях по стальным строительным конструкциям / Е. И. Румынская, М. И. Кузьменков // Труды БГТУ. – Минск: БГТУ, 2013. – № 3 (159). – С. 118–122.
3. Румынская, Е. И. Исследование свойств композиционного огнезащитного материала с использованием теории фракталов / Е. И. Румынская, М. И. Кузьменков, М. И. Кулак // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – Минск: БГТУ, 2017. – № 2 (199). – С. 176–182.