

ОТЗЫВ

официального оппонента, к.т.н., доцента, Сергеевой Ирины Владимировна
на диссертационную работу Коринчука Михаила Александровича «Разработка
адаптивных технологий производства строительных изделий из арболита
методами цифровизации регулирования режимов термовлажностной обработки»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.1.5 - Строительные материалы и изделия

Актуальность темы диссертации

Арболит представляет собой сложный двухфазный органоминеральный композит, эксплуатационные характеристики которого в том числе зависят от качества формирования микроструктуры на ранних стадиях твердения. Основной научной и технологической проблемой при производстве таких материалов является обеспечение прочной и долговечной адгезии на границе раздела фаз «древесный наполнитель – цементная матрица». Наличие в древесине водорастворимых экстрактивных веществ (сахаров, лигнинов и др.) выступает ингибитором процессов гидратации портландцемента, замедляя структурообразование и формируя ослабленную переходную зону. В связи с этим, термовлажностная обработка (ТВО) выступает не просто как технологическая операция удаления влаги, а как важнейший фактор управления кинетикой физико-химических реакций, направленный на интенсификацию твердения, нейтрализацию негативного влияния органики и стабилизацию структуры композита.

Однако применение в современной производственной практике традиционных, эмпирически заданных режимов ТВО не учитывает сложной сопряженности процессов тепломассопереноса и экзотермических эффектов гидратации в гетерогенной среде. Форсированный или неравномерный нагрев приводит к возникновению резких внутренних градиентов температуры и влажности, что провоцирует развитие усадочных напряжений, трещинообразование в цементном камне и деструкцию межфазных связей еще на стадии набора прочности. В современных условиях развития строительного материаловедения преодоление данного противоречия невозможно без перехода к адаптивным, научно обоснованным технологиям. Создание математических моделей и алгоритмов цифрового управления (концепция «цифрового двойника»), позволяющих предиктивно регулировать параметры ТВО с учетом нелинейной зависимости теплофизических свойств от текущей влажности и температуры, является высокоактуальной задачей. Это обеспечит не только снижение энергозатрат, но и гарантированное формирование плотной, дефектоустойчивой микроструктуры арболита, что полностью соответствует приоритетам Стратегии научно-технологического развития РФ в части создания ресурсосберегающих, энергоэффективных и экологически безопасных строительных материалов.

Общая характеристика работы

Диссертация объемом 221 страница состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 258 наименований и четырех приложений. Работа иллюстрирована 42 рисунками и 27 таблицами.

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель, задачи, научная гипотеза и положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен комплексный анализ научно-технической литературы в области технологии производства и теплофизики древесно-цементных композитов. Арболит рассмотрен как двухфазный органоминеральный капиллярно-пористый композит, гетерогенная структура которого предопределяет его уникальные эксплуатационные свойства, но одновременно формирует риски неустойчивости геометрических размеров и трещинообразования. Показано, что существующие эмпирические режимы ТВО не учитывают сопряженный характер нестационарных процессов тепло-массопереноса и экзотермические эффекты гидратации. Обоснована необходимость перехода к научно обоснованным адаптивным технологиям на основе математического моделирования и концепции «цифрового двойника».

Во второй главе описаны материалы и методики экспериментальных исследований. Обоснован выбор сырьевых компонентов и описана технология изготовления лабораторных образцов арболита в стальной опалубке. Детально рассмотрены экспериментальные методики и аппаратное оформление для непрерывного мониторинга нестационарных полей температуры и влажности в теле блока с использованием термоэлектрических преобразователей и игольчатого влагомера. Сформирована математическая постановка задачи взаимосвязанного нестационарного тепло-массопереноса с учетом физико-химических факторов структурообразования. Обосновано применение численно-аналитического метода микропроцессов для решения нелинейных краевых задач с переменными коэффициентами переноса.

В третьей главе приведены результаты натурных экспериментов по идентификации нестационарных параметров тепло-массопереноса и кинетики структурообразования арболита при термовлажностной обработке. На основе длительного мониторинга установлены пространственно-временные закономерности распределения температуры и влажности по толщине блока-сырца, выявлена существенная асимметрия профилей, обусловленная паронепроницаемостью стальной опалубки. Выполнена количественная идентификация коэффициентов переноса (температуро- и массопроводности, теплопроводности, удельной теплоемкости) и получены их функциональные зависимости от текущего влагосодержания композита. Впервые для арболита рассчитаны мощности внутренних физико-химических источников и стоков: экзотермического тепловыделения при гидратации портландцементных минералов и поглощения влаги, что сформировало необходимую информационно-параметрическую базу для последующего цифрового моделирования.

В четвертой главе выполнено цифровое моделирование сопряженных процессов тепло-массопереноса и разработаны адаптивные режимы термовлажностной обработки. Сформулированы и аналитически решены

краевые задачи нестационарного тепло- и влагопереноса как для этапа твердения в металлической опалубке, так и для различных технологических схем сушки после распалубки (на проницаемых, непроницаемых и частично проницаемых основаниях). Проведена верификация разработанной цифровой модели по критерию согласия Пирсона, подтвердившая ее высокую адекватность независимым экспериментальным данным. На основе полученных решений предложен циклический алгоритм адаптивного цифрового управления режимами ТВО на базе концепции «цифрового двойника».

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечена системой проведенных исследований с использованием сертифицированного и метрологически поверенного современного лабораторного оборудования, а также стандартных средств измерений и методов научных исследований. Полученные результаты не противоречат общепризнанным научным фактам и работам других авторских коллективов.

В целом, все главы диссертации имеют логические выводы и рекомендации, которые обобщены в разделе «Заключение», имеют научную новизну, сформулированы достаточно четко и конкретно. Все выше изложенное позволяет констатировать, что основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, в достаточной мере обоснованы.

Научная новизна наиболее существенных результатов диссертационного исследования

Соискатель лично или в соавторстве получил следующие научно обоснованные результаты:

- Проведённым теоретико-экспериментальным анализом установлено, что на кинетику твердения и структурную целостность изделий из арболита при термовлажностной обработке определяющее влияние оказывают нестационарные градиенты температуры и влагосодержания, инициирующие встречные потоки теплоты и влаги, а также суперпозиция тепловыделения и влагопоглощения вследствие гидратации портландцементных минералов.
- На основе математического аппарата численно-аналитического метода микропроцессов сформулирована и решена полная нестационарная задача сопряжённого тепломассопереноса при ТВО арболита как двухфазного органоминерального капиллярно-пористого композита. В отличие от существующих моделей, в математической постановке одновременно учтены: экзотермическое тепловыделение при гидратации, нелинейная зависимость коэффициентов тепло- и массопроводности от текущих значений влажности, а также реальные граничные условия технологических схем сушки в заводских условиях (в металлической опалубке и на настилах с различной проницаемостью).

- Разработана и реализована оригинальная методика экспериментального исследования нестационарного температурно-влажностного поля при ТВО блока арболита-сырца в металлической опалубке. На основе длительных натурных измерений установлены пространственно-временные закономерности изменения полей температуры и влажности по толщине блока при тепловой обработке до $+40^{\circ}\text{C}$. Получены функциональные зависимости коэффициентов температуро- и массопроводности, теплопроводности, удельной теплоёмкости, плотностей потоков тепла и влаги, а также мощностей объёмного тепловыделения и влагопоглощения при гидратации от текущей влажности образца в диапазоне 49...20%.
- Теоретически обоснована и количественно подтверждена взаимосвязь между кинетикой нестационарного тепломассопереноса, асимметрией профиля влажности и риском усадочного трещинообразования арболитовых изделий. На основе аналитического решения задачи нестационарной массопроводности с применением безразмерных критериев Фурье и Кирпичёва доказано, что сушка на непроницаемом основании формирует максимум влажности в придонной зоне, увеличивая градиенты усадочных напряжений, тогда как применение частично проницаемых настилов обеспечивает снижение времени сушки на 25...30% при сохранении структурной однородности.
- Предложен метод адаптивного цифрового управления режимами ТВО на основе концепции «цифрового двойника», отличающийся тем, что в реальном времени на основе предиктивной модели оцениваются внутренние градиенты температуры и влажности, и при их приближении к критическим порогам автоматически формируются корректирующие воздействия, предотвращающие скрытое трещинообразование в контактной зоне «древесная щепка – цементная матрица».

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в существенном развитии научных представлений о физике сопряженных нестационарных процессов тепломассопереноса в двухфазных органоминеральных капиллярно-пористых композитах. Впервые для арболита экспериментально идентифицированы и математически описаны функциональные зависимости феноменологических коэффициентов переноса (температуро- и массопроводности, теплопроводности), а также мощностей внутренних физико-химических источников тепла и влаги от текущей влажности и температуры композита. Адаптирован численно-аналитический метод микропроцессов для решения нелинейных краевых задач тепло- и влагопроводности с переменными коэффициентами и асимметричными граничными условиями, что позволяет сводить сложные нестационарные задачи к последовательности линейных подзадач с минимальной погрешностью накопления. Теоретически обоснована и количественно подтверждена взаимосвязь между кинетикой нестационарного тепломассопереноса, асимметрией профилей влажности и риском усадочного трещинообразования в переходной зоне «древесная щепка – цементная матрица».

Практическая значимость определяется возможностью принципиального перехода от эмпирического управления режимами ТВО к научно обоснованному адаптивному цифровому регулированию. Разработан и реализован алгоритм адаптивного цифрового управления режимами ТВО на основе концепции «цифрового двойника», позволяющий в реальном времени прогнозировать внутренние градиенты и предотвращать трещинообразование. Сформулированы конкретные технологические рекомендации по организации сушки изделий после распалубки: доказано, что применение частично проницаемых решетчатых настилов вместо сплошных непроницаемых поддонов обеспечивает снижение времени сушки на 25...30% при сохранении структурной однородности. Разработанный математический аппарат обладает универсальностью и может быть масштабирован для оптимизации режимов сушки и твердения других капиллярно-пористых строительных композитов на основе органических заполнителей. Внедрение предложенных технологий на предприятии ООО «Арбоград» позволило полностью исключить видимый брак и повысить предел прочности при сжатии на 34% (с 1,3 до 1,75 МПа) за счет сохранения микроструктурной целостности композита.

Достоверность положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

В работе проанализирован отечественный и мировой опыт научно-исследовательских работ в области технологии производства, термовлажностной обработке и сушки строительных изделий из арболита. Изучены теоретические вопросы теплофизики древесно-цементных композитов для выявления закономерностей структурообразования арболита, оценки существующих методов моделирования процессов ТВО и обоснования необходимости цифровизации их режимов.

При решении поставленных задач применялся метод математического планирования эксперимента, достоверность полученных результатов оценивалась с применением методов математической статистики, подтверждается большим объемом экспериментальных результатов, которые согласованы с известными научными теориями процессов твердения цементных композитов.

Исследования проводились с применением современных физико-механических методов, позволяющих получать достоверные экспериментальные данные.

Научные положения опираются на фундаментальные законы термодинамики и теории тепломассопереноса. Достоверность подтверждается использованием сертифицированного оборудования, строгим соответствием методик требованиям ГОСТ, репрезентативностью массивов натурных данных, а также высокой сходимостью расчетных и экспериментальных данных (оценка по критерию согласия Пирсона).

Следует так же отметить четкость и логичность при изложении материала диссертационной работы.

Все это свидетельствует о высоком уровне проведенных автором

теоретических и экспериментальных исследований и достоверности полученных результатов.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научных изданиях

Результаты исследований, отражающие основные положения диссертационной работы, изложены в 16 научных публикациях, в том числе: 4 статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ, из которых 1 статья в научных журналах, индексируемых в международных реферативных базах данных Scopus, 1 статья в журнале, входящем в Russian Science Citation Index.

Соответствие оформления автореферата и диссертации предъявляемым требованиям

Диссертационная работа написана грамотным научным языком, оформление отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Текст диссертации изложен в логической последовательности с применением соответствующих технических терминов, таблиц, графиков и схем. Автореферат полностью отражает содержание работы, по объему и оформлению отвечает необходимым требованиям.

Замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе возникло несколько вопросов и замечаний.

1. В работе не приведены данные рентгенофазового или дифференциально-термического анализа, подтверждающие, как именно снижение температуры ТВО влияет на минералогический состав продуктов гидратации (в частности, на формирование высокоосновных гидросиликатов кальция) в присутствии экстрактивных веществ древесины и сульфата алюминия;

2. Арболит является ярко выраженной гетерогенной средой, где древесная щепа и цементный камень обладают различными электрофизическими свойствами. При измерении влажности игольчатым влагомером AQ-M20SO1 электроды могут попадать как в цементную матрицу, так и в древесный наполнитель. Каким образом в рамках диссертационного исследования минимизировалась погрешность измерений, связанная с локальной неоднородностью композита, и проводилась ли статистическая калибровка показаний влагомера относительно весового метода сушки для конкретных зон?

3. Разработанная математическая модель и «цифровой двойник» опираются на функциональные зависимости коэффициента массопроводности от текущей влажности. Однако в процессе ТВО и гидратации цемента происходит не только удаление влаги, но и непрерывное изменение самой капиллярно-пористой структуры: поры заполняются новообразованиями гидросиликатов (C-S-H), а древесная щепа претерпевает усадочные деформации. Не ясно как в предложенных моделях учитывать динамическое изменение эффективного

радиуса капилляров и капиллярного давления по мере нарастания степени гидратации.

Отмеченные замечания носят большей частью рекомендательный характер, не снижают ценности выполненного исследования и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение

Диссертация Коринчука Михаила Александровича является самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой, на актуальную тему, содержащей научные результаты, выводы и рекомендации, отличающейся новизной, теоретической и практической значимостью. Диссертационная работа на тему: «Разработка адаптивных технологий производства строительных изделий из арболита методами цифровизации регулирования режимов термовлажностной обработки» полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, соответствует пункту 9-11, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. для диссертаций, представленных на соискание ученой степени кандидата технических наук, в которой на основании исследований, выполненных автором, решена задача разработки адаптивных технологий производства строительных изделий из арболита методами цифровизации регулирования режимов термовлажностной обработки. Автор диссертационной работы Коринчук Михаил Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия.

Официальный оппонент:

Доцент кафедры «Основы архитектуры и художественных коммуникаций» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», кандидат технических наук по специальности 05.23.05 - Строительные материалы и изделия, доцент



Сергеева Ирина Владимировна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

Тел.: +7(495) 781-80-07, e-mail: kanz@mgsu.ru

Подпись Сергеевой И.В. заверяю:

НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА
КАДРОВОГО ДЕЛОПРОИЗ-
ВОДСТВА УРП
А.В. ЛИНЕГИН

01.09.2016

