

Оценка влияния микроволнового воздействия на прочностные характеристики цементно-песчаной смеси М-150.

Т.О. Крапивницкая¹, С. А. Ананичева^{1А}, А.Б. Алыева¹, М. Ю. Глявин¹, Н. Ю. Песков¹,
С.В. Зеленцов^{1,2}, М.А. Селезнев², М.В. Каменский¹

¹Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, г. Нижний Новгород

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Аннотация: В данной работе представлены результаты экспериментального исследования влияния микроволнового излучения частотой 2.45 ГГц на прочностные характеристики цементно-песчаной смеси М-150. Установлено, что интенсивное микроволновое воздействие, приводящее к перегреву материала, негативно сказывается на его прочности. На основании полученных экспериментальных результатов предложено дальнейшее исследование влияния микроволнового излучения низкой средней мощности на процессы твердения и прочностные свойства цементно-песчаной смеси.

Ключевые слова: СВЧ-излучение, бетон, микроволновый комплекс, ЦПС, ЦПР.

1. Введение

Бетон – один из наиболее широко используемых строительных материалов в мире, играющий ключевую роль в современной инфраструктуре и гражданском строительстве [1]. Его универсальность, относительно низкая стоимость и возможность формования в различные конфигурации делают его незаменимым материалом для строительства зданий, мостов, дорог, дамб и других инженерных сооружений [2,3]. Бетон включает в свой состав цемент как основной компонент, выступающий в роли гидравлического вяжущего, обеспечивающего монолитность и прочность бетонной матрицы. Цементно-песчаная смесь (ЦПС), как порошкообразный материал, при взаимодействии с водой вступает в реакцию гидратации, формируя гидросиликаты кальция (C-S-H) и другие гидратные фазы, которые, затвердевая, связывают между собой заполнители (песок, щебень) в единый композитный материал – бетон. Маркировка "М-150" указывает на гарантированную прочность затвердевшего раствора на сжатие, составляющую не менее 15 МПа после 28 суток твердения в стандартных условиях [4,5].

Влажность исходных компонентов ЦПР марки М-150, в частности песка, оказывает определяющее влияние на реологические свойства свежеприготовленного раствора и, как следствие, на характеристики затвердевшего материала. Точный контроль влажности песка является критически важным для достижения оптимального водоцементного отношения, которое, в свою очередь, напрямую влияет на прочность, долговечность и другие эксплуатационные свойства цементно-песчаный раствор (ЦПР). Интенсивная сушка ЦПР в процессе твердения оказывает крайне негативное влияние на формирование структуры цементного камня и развитие прочностных характеристик, особенно при высоком перепаде температуры от стенок опалубки внутрь в центр материала. Быстрое испарение влаги с поверхности ЦПР приводит к быстрому исчерпанию запаса воды, необходимой для продолжения процесса гидратации цемента. Это приводит к незавершенности формирования гидросиликатов кальция ответственных за прочность материала.

Кроме того, при неравномерной потере влаги увеличивается усадочная

деформация и трещинообразование, что вызывает возникновение внутренних напряжений. Трещины снижают прочность, водонепроницаемость и морозостойкость ЦПР, а также ухудшают ее эстетические характеристики.

Применение технологии термообработки в бетоне может эффективно повысить его эксплуатационные характеристики и расширить область его применения. Традиционные методы термообработки в основном включают в себя паровое нагревание и электрическое сопротивление [6,7]. Паровое нагревание позволяет эффективно повысить механическую прочность бетона за более короткий срок за счёт ускорения реакции гидратации цементной матрицы. В последние годы микроволновый нагрев как новая технология термообработки постепенно внедряется в бетонное строительство [8,9]. Принцип нагрева заключается в том, что при передаче микроволнового излучения различные фазы в бетоне поглощают микроволновую энергию и преобразуют её в тепловую энергию для непосредственного нагрева. По сравнению с традиционными методами микроволновый нагрев может напрямую воздействовать на внутренние компоненты бетона, что эффективно снижает теплопотери и минимизирует эффект запаздывания, связанный с инерционностью пристеночного нагрева, тем самым обеспечивая ускорение процесса [10]. Благодаря своей способности обеспечивать необходимую температуру за относительно короткое время, микроволновый нагрев обладает более высокой энергоэффективностью и позволяет экономить электроэнергию. Кроме того, этот способ нагрева является экологически чистым и не приводит к образованию вторичных отходов.

В качестве обрабатываемого материала выбран ЦПР как альтернатива полноценному бетону ввиду меньшего размера контрольных образцов по ГОСТ - 70,7*70,7*70,7мм против 100*100*100мм.

Таким образом, в данной работе предлагается в качестве начальной сушки использовать микроволновое излучение для обеспечения равномерного нагрева в объеме образца. Данная обработка исключает трещины, осуществляет контроль усадочной деформации и способствует уменьшению общего времени сушки бетона.

2. Методика обработки материала микроволновым излучением.

В ИПФ РАН внедрен комплекс для микроволновой обработки органических материалов, который, после некоторой модернизации, использовался в данной серии экспериментов по предварительной сушке ЦПР (рис.1). В качестве опалубки для раствора использовался напечатанный с применением аддитивных технологий полимерной 3D печати куб размером 70,7×70,7×70,7 мм с толщиной стенок 2,5 мм. Данная опалубка изготовлена методом послойного наложения SBS-пластика, который мало поглощает микроволновое излучение.

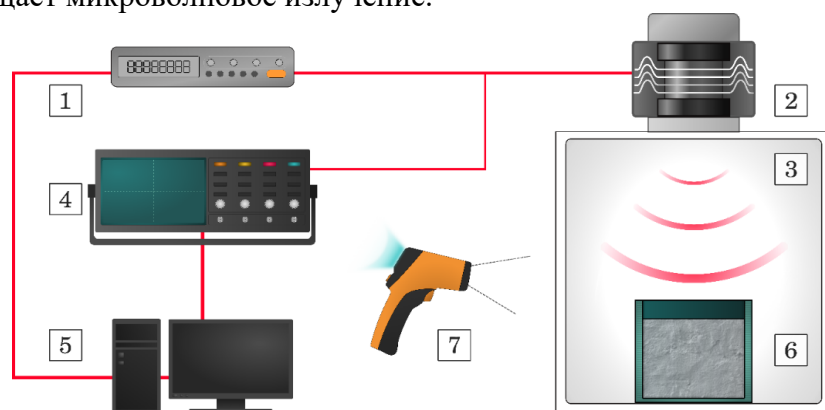


Рисунок 1. Технологическая схема установки по микроволновой обработке ЦПР: 1 - высоковольтный источник, 2 - магнетрон, 3 – изолирующая камера, 4 - осциллограф, 5 - компьютерная система управления, 6 - образец цементно-песчаного раствора.

Микроволновый комплекс в основном состоит из изолирующей камеры (3) в которую помещается ранее подготовленный раствор ЦПР заданного состава [5] в пластиковой опалубке (6). Используемый промышленный магнетрон (2) имел управляемый высоковольтный источник питания (1) для контроля мощности и дополнительное водяное охлаждение для длительной работы. Контроль параметров магнетрона и его выходного сигнала осуществлялся с помощью осциллографа (4). Параметры облучения цементно-песчаного раствора указаны в таблице 1. После облучения в заданных режимах смесь твердела на протяжении 28 суток. Затем проводилось измерение прочностных характеристик на сжатие полученных образцов бетона.

Таблица 1. Параметры микроволнового облучения ЦПР

Параметры	Образец		
	1	2	3
Мощность, Ватт	50	50	100
Время, мин	30	60	30
Конечная температура, °C	25.1	25.8	42.0
Прочность, МПа	20.0	20.6	12.8

Температура контролировалась погружным щупом в контрольных точках измерения, а именно в центре, в углах кубической опалубки и непосредственно на поверхности материала (Рис.3). На графике показана скорость нарастания температуры при облучении мощностью 100 Вт. Данный режим не оптимален так как слишком быстрый нагрев даже во всем объеме образца ведет к трещинам и усадочной деформации. Иной характер процесса демонстрирует режим с более низкой мощностью облучения.

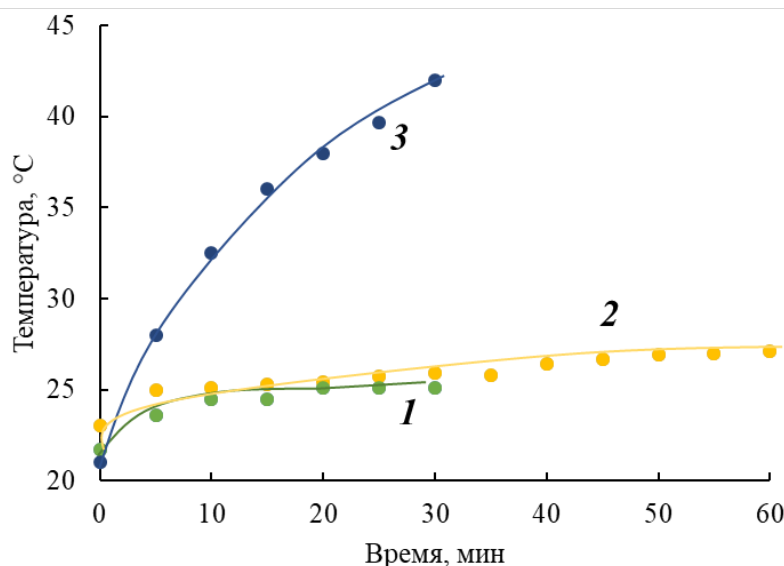


Рисунок 3. График изменения температуры цементно-бетонного раствора в процессе облучения: 1-облучение мощностью 50 Ватт в течение 30 мин; 2- облучение мощностью 50 Ватт в течение 60 мин; 3 - облучение мощностью 100 Ватт в течение 30 мин.

Для обеспечения оптимального набора прочности и предотвращения трещинообразования в стандартных условиях ЦПР М-150 следует твердеть во влажной среде, избегая интенсивной сушки из-за градиента температуры от стенок внутрь материала.

При применении режима микроволновой обработки при мощности 50 Вт и

времени воздействия 30 и 60 минут прочность на сжатие превышала требования ГОСТ (15 МПа) более, чем на 30% и демонстрировала незначительные вариации в зависимости от времени воздействия, составив 20.0 МПа и 20.6 МПа для экспозиций длительностью 30 и 60 минут, соответственно. В то же время, при мощности 100 Вт и времени воздействия 30 минут, прочность на сжатие снижалась до 12.8 МПа, что не соответствует нормативным требованиям.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о необходимости оптимизации параметров микроволновой обработки ЦПР М-150. Перспективным направлением для дальнейших исследований является изучение воздействия микроволнового излучения низкой средней мощности на процессы гидратации и твердения ЦПР, с целью выявления оптимальных режимов, обеспечивающих достижение требуемых прочностных характеристик без негативного влияния на микроструктуру материала. Дальнейшие исследования следует сосредоточить на изучении влияния параметров микроволнового воздействия, таких как мощность, частота и продолжительность, на физико-механические свойства ЦПР М-150.

3. Заключение

ЦПР М-150 является широко распространенным и востребованным строительным материалом, обладающим оптимальным соотношением цены и качества для выполнения широкого спектра строительных и ремонтных работ, не требующих высоких прочностных характеристик.

Экспериментальное исследование влияния микроволнового излучения частотой 2.45 ГГц на физико-механические свойства ЦПР марки М-150 выявило зависимость прочности затвердевшего материала от интенсивности облучения. Полученные данные свидетельствуют о том, что избыточный нагрев, индуцированный микроволновым воздействием, оказывает негативное влияние на прочность ЦПР М-150. При более низких мощностях удалось добиться повышения прочности бетона более, чем на 30%. Тем самым можно сделать вывод о том, что в сушке бетона можно применять низкие мощности, что означает низкое энергопотребление.

Для повышения эксплуатационных характеристик ЦПР М-150 могут использоваться различные модифицирующие добавки, такие как пластификаторы, ускорители твердения, гидрофобизаторы и другие, позволяющие улучшить прочность, морозостойкость и водонепроницаемость раствора [11].

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИФ РАН FFUF-2024-0027.

Список литературы

1. Fonseka, I.; Mohotti, D.; Wijesooriya, K.; Lee, C.-K.; Mendis, P. Evaluating the Performance of Cement-Reduced Concrete Using Graphene Oxide: Synergistic Effects on Mechanical Properties. *Results in Engineering* **2025**, *26*, 104742, doi:10.1016/j.rineng.2025.104742.
2. Yang, Y.; Lu, P.; Shao, R.; Zhao, Q.; Yang, T.; Wu, C. A Comprehensive Review of Multisource Solid Wastes in Sustainable Concrete: From Material Properties to Engineering Application. *Constr Build Mater* **2024**, *435*, 136775, doi:10.1016/j.conbuildmat.2024.136775.
3. Chen, J.; Jia, J.; Zhu, M. Research and Application of Aggregate Interlocking Concrete: A Review. *J Clean Prod* **2024**, *449*, 141746, doi:10.1016/j.jclepro.2024.141746.
4. ГОСТ 7473-2010 Смеси Бетонные. Технические Условия;
5. ГОСТ 27006-2019 Бетоны. Правила Подбора Состава;
6. Mohammed, A.G.; Ozgur, G.; Sevkati, E. Electrical Resistance Heating for Deicing and Snow Melting Applications: Experimental Study. *Cold Reg Sci Technol* **2019**, *160*, 128–138, doi:10.1016/j.coldregions.2019.02.004.

7. Yao, X.; Lyu, X.; Sun, J.; Wang, B.; Wang, Y.; Yang, M.; Wei, Y.; Elchalakani, M.; Li, D.; Wang, X. AI-Based Performance Prediction for 3D-Printed Concrete Considering Anisotropy and Steam Curing Condition. *Constr Build Mater* **2023**, *375*, 130898, doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.130898.
8. Xiao, Y.; Xue, Y. A Review on Application of Microwave in Cement Life Cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2024**, *199*, 114498, doi:10.1016/j.rser.2024.114498.
9. Hamada, H.; Alattar, A.; Tayeh, B.; Yahaya, F.; Almeshal, I. Influence of Different Curing Methods on the Compressive Strength of Ultra-High-Performance Concrete: A Comprehensive Review. *Case Studies in Construction Materials* **2022**, *17*, e01390, doi:10.1016/j.cscm.2022.e01390.
10. Makul, N.; Rattanadecho, P.; Agrawal, D.K. Applications of Microwave Energy in Cement and Concrete – A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2014**, *37*, 715–733, doi:10.1016/j.rser.2014.05.054.
11. Ahmed, K.U.; Geremew, A.; Jemal, A. The Comparative Study on the Performance of Bamboo Fiber and Sugarcane Bagasse Fiber as Modifiers in Asphalt Concrete Production. *Heliyon* **2022**, *8*, e09842, doi:10.1016/j.heliyon.2022.e09842.