

Р. Х. Мухаметрахимов, В. С. Изотов

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АВТОКЛАВНОЙ ОБРАБОТКИ ФИБРОЦЕМЕНТНЫХ ПЛИТ*Ключевые слова: фиброцементные плиты, дисперсное армирование, автоклавная обработка.*

В работе изложены результаты экспериментальных исследований по оптимизации параметров автоклавной обработки фиброцементных плит на основе целлюлозных волокон. Путем реализации трехфакторного плана второго порядка установлены зависимости предела прочности при изгибе фиброцементных плит от скорости нагрева, времени изотермической выдержки и скорости охлаждения автоклава.

Keywords: fiber cement slabs, fiber reinforcement, autoclaving.

In this article you can see results of experimental research on the optimization parameters autoclaving fiber cement slabs based on cellulose fibers. By implementing a three-factor plan set according to the second-order flexural strength of fiber-cement slabs heating rate of isothermal holding time and cooling rate of the autoclave.

Введение

Исследованием процессов происходящих при автоклавной обработке различных материалов занимались многие ученые (П.И. Боженков, П.П. Будников, А.В. Волженский, П.Г. Комохов, О.П. Мchedlov-Петросян и др.).

А.В. Волженским [1] разработаны основные положения теории запаривания известково-кремниземистых материалов, которые приемлемы для всех материалов автоклавного твердения.

Первая стадия включает тот период запаривания, который начинается с момента выпуска пара в автоклав и заканчивается при достижении равенства температур теплоносителя и обрабатываемых изделий.

Вторая стадия характеризуется постоянством температуры и давления в автоклаве. При этом максимальное развитие получают все те химические и физико-химические процессы, которые обуславливают возникновение цементирующих новообразований и твердение бетонных изделий.

Третья стадия начинается с момента прекращения доступа пара в автоклав и включает время остывания изделий в нем до момента их извлечения.

На первой стадии обработки из-за разницы температуры пара и запариваемого изделия в последнем возникают значительные термические напряжения. Они проявляются тем сильнее, чем выше скорость подъема температуры. Термические напряжения могут не только нарушать структуру материала и вызывать понижение прочности изделий, но и приводить к полному разрушению.

Поэтому, как известно время выдержки сырьевой смеси перед автоклавной обработкой, в период которой протекают физико-химические процессы гидратации вяжущего и формирования структуры, оказывает существенное влияние на качественные характеристики автоклавных материалов. Для каждого состава сырьевой смеси существует определенный оптимум времени выдерживания перед автоклавной обработкой [2].

В процессе изготовления, фиброцементные изделия после прессования подвергаются пропариванию при температуре 55-60 °С по режиму

3+6+3 ч. При этом образцы набирают начальную прочность, что позволяет бездефектно снимать их с форм и подготавливать к автоклавированию.

При пропаривании протекают физико-химические процессы гидратации вяжущего и формирования структуры фиброцементных плит (ФЦП), при этом, по нашему мнению, не требуется дополнительная выдержка перед автоклавной обработкой, а скорость набора температуры можно увеличить.

На второй стадии максимальное развитие получают процессы, которые ведут к образованию монолита. Процессом, определяющим скорость образования цементирующих веществ, следует считать переход аморфного кремнезема в раствор и образование поликремниевой кислоты. Поэтому, чем выше активность минеральных компонентов, тем быстрее происходит рост новообразований.

Прочность затвердевшего вяжущего определяется степенью гидратации, количеством новообразований, их качественными характеристиками, и в частности степенью дисперсности, видом вяжущего, а также условиями и длительностью твердения [3].

Большое влияние на продолжительность изотермической выдержки оказывает толщина запариваемых изделий. Известно [2], что для всех видов бетона с увеличением толщины запариваемых изделий продолжительность изотермической выдержки возрастает.

Вышесказанное позволяет предположить, что ФЦП малой толщины (8-10мм), имеющие в своем составе тонкомолотую высокоактивную минеральную добавку и тонкомолотый минеральный наполнитель для достижения полной гидратации потребует меньшей продолжительности изотермической выдержки.

На третьей стадии запаривания с прекращением подачи пара происходит снижение температуры и давления в автоклаве. При этом происходит снижение температуры воды, находящейся в порах материала с последующим испарением.

При охлаждении автоклава с применением выпуска пара в теле изделия возникают интенсивные токи воды и пара, которые при

чрезмерно быстром сбросе давления могут в значительной мере нарушить структуру цементирующих веществ и понизить прочность изделий.

Особенностью третьей стадии запаривания являются процессы высыхания изделий и цементирующих новообразований, что оказывает влияние на ряд свойств материала и в первую очередь на прочность.

Для различных по химическому и минералогическому составу материалов и изделий требуется дифференцированный подход к выбору режима автоклавной обработки на всех стадиях [4].

Экспериментальная часть

В процессе исследований были использованы следующие материалы:

а) вяжущее:

- портландцемент марки ПЦ500-Д0-Н ГОСТ 10178-85 ОАО «Вольскцемент».

б) заполнитель:

- молотый кварцевый песок камского месторождения удельной поверхностью $310 \text{ м}^2/\text{кг}$.

в) волокна:

- целлюлозные волокна марки НСК СТО 00279189-2-2007 ОАО «Соломбальский ЦБК».

г) модифицирующие добавки:

- полиакриламид «Besfloc K4045» ТУ 6-01-1049-92 «KOLON LIFE SCIENCE, INC.» (ионный заряд – анионный, степень ионного заряда – высокая, вязкость 0,2% раствора при 25°C – 550 спз, рН 0,1% раствора – 6,9%);

- полифенилэтоксисилоксан марки ФЭС-50 ТУ 2257-441-05763441-2005 ОАО «Химпром» г.Новочебоксарск;

- каолин по ТУ 5729-016-48174985-2003 ООО НПП «Промышленные минералы» г. Тольятти;

д) вода:

- водопроводная питьевая вода, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732.

Образцы изготавливали по мокрому способу производства фиброцементных изделий следующим образом. Распушивали волокна целлюлозы до получения степени помола 30-35° ШР, смешивали их с кварцевым песком, предварительно измельченным до степени помола $310 \text{ м}^2/\text{кг}$, добавляли термически обработанный каолин, предварительно измельченный до степени помола $1300 \text{ м}^2/\text{кг}$, портландцемент, полиакриламид, полифенилэтоксисилоксан и воду.

Далее осуществляли формование изделий, отфильтровывая воду из фиброцементной смеси до необходимого уплотнения, придавая им заданную форму и размеры, после чего изделия (плиты) подвергали прессованию и тепловлажностной обработке в пропарочной камере. Окончательное твердение изделий производили в автоклаве.

Для управления режимами автоклавной обработки использовали терморегулятор ТРМ-200 производства фирмы «ОВЕН» снабженный пускателем и термпарой установленной в специальное гнездо в автоклаве.

Прочность образцов на изгиб после автоклавной обработки ($R_{\text{изг}}$), водопоглощение (W) и морозостойкость (F) определяли в соответствии с ГОСТ 8747-88 [4].

Измерение усадочных деформаций проводили на образцах-плитках $220 \times 100 \times 8 \text{ мм}$, при помощи автоматического регистратора усадочных деформаций «Автограф». Прибор оснащен датчиками линейной деформации, температуры и влажности окружающей среды.

Воздухостойкость ФЦП определяли по известной методике, основанной на определении прочности образца после попеременных циклов увлажнения и высушивания. В качестве критерия оценки был принят коэффициент воздухостойкости равный отношению предела прочности при изгибе ФЦП подвергнутого увлажнению и высушиванию к контрольному.

Результаты исследований

Для подтверждения наших предположений и с целью определения оптимальных параметров автоклавной обработки модифицированных ФЦП нами выполнены экспериментальные исследования влияния скорости подъема температуры и давления до требуемой величины, длительности выдерживания при максимальной температуре и условия спуска давления от максимального до атмосферного на физико-механические свойства ФЦП.

Оптимизация режима автоклавной обработки фиброцементной смеси [6] на основе модифицированного смешанного вяжущего [7] выполнялась путем реализации трехфакторного плана второго порядка на гиперкубе. В качестве исходных независимых переменных определены такие факторы, как скорость подъема температуры (X_1) ($87,5-116,7^\circ\text{C}/\text{ч}$); длительность изотермической выдержки (X_2) (4-8 ч); скорость охлаждения (X_3) ($87,5-116,7^\circ\text{C}/\text{ч}$).

Уровни варьирования независимых переменных приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Уровни варьирования независимых переменных

Факторы	Наименование факторов	Уровни варьирования		
		-I	0	+I
X_1	Скорость подъема температуры	116,7	87,5	116,7
X_2	Длительность изотермической выдержки	4	6	8
X_3	Скорость охлаждения	116,7	87,5	58,3

В качестве отклика выбраны прочность на изгиб автоклавированных фиброцементных плит (ФЦП). Произведенная обработка результатов математического планирования, позволила получить следующую математическую зависимость:

$$R_{авт} = -79,796 + 0,6035X_1 + 11,33X_2 + 0,81X_3 + 0,00489X_1X_2 + 0,00089X_1X_3 - 0,0236X_2X_3 - 0,0037X_1^2 - 0,68529X_2^2 - 0,0036X_3^2; (1)$$

Для определения адекватности полученных уравнений регрессий произведена оценка их статистической значимости с табличным значением (критерий Фишера). Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2 - Статистическая оценка полученных зависимостей

№ формулы	Критерий Фишера	
	Табличное значение	Расчетное значение
1	5,05	4,36

На рис. 1-3 приведена графическая интерпретация результатов обработки математической модели (1). Как следует из уравнения регрессии (1) и данных, приведенных на рис. 1-3, с увеличением времени изотермической выдержки и уменьшении скорости охлаждения наблюдается рост прочности ФЦП. Сокращение режима автоклавной обработки, а именно совместного снижения времени изотермической выдержки до 5 ч и увеличения скорости подъема температуры в автоклаве до 87,5°С/ч не оказывает существенного влияния на физико-механические свойства ФЦП. Дальнейшее снижение времени изотермии, и увеличение скорости нагрева приводит к снижению прочности ФЦП.

Понижение прочности ФЦП при увеличении скорости охлаждения, по-видимому, объясняется тем, что при чрезмерно быстром сбросе давления в теле ФЦП возникают значительные термические напряжения, интенсивные токи воды и пара, которые в значительной мере нарушают структуру цементирующих веществ.

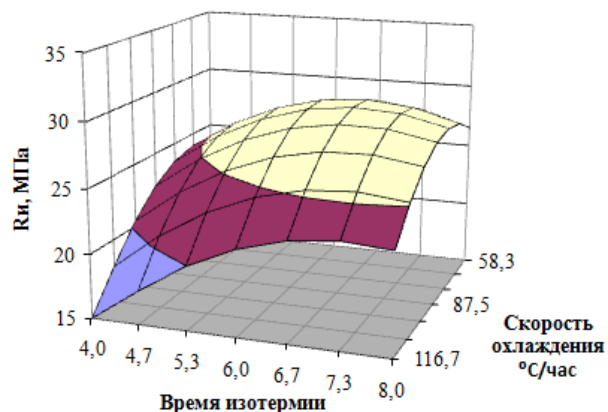


Рис. 1 – Влияние режима автоклавной обработки на предел прочности при изгибе ФЦП: $X_1 - \text{const}$

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что увеличение скорости нагрева с 58 до 88°С/ч не оказывает существенного влияния на прочностные характеристики ФЦП.

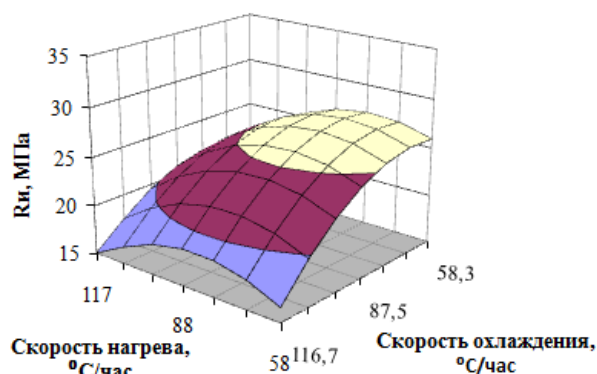


Рис. 2 – Влияние режима автоклавной обработки на предел прочности при изгибе ФЦП: $X_2 - \text{const}$

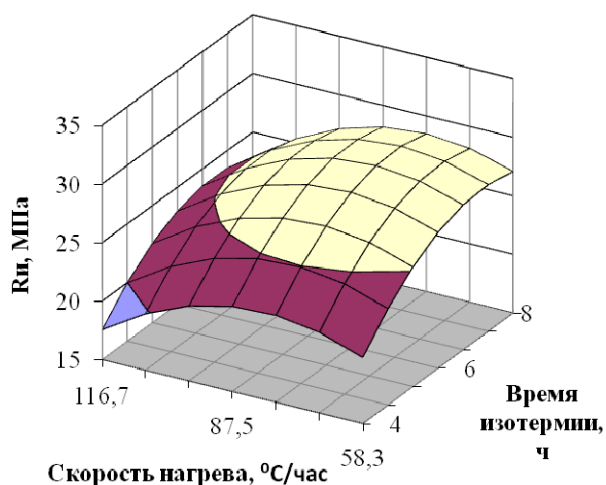


Рис. 3 – Влияние режима автоклавной обработки на предел прочности при изгибе ФЦП: $X_3 - \text{const}$

Увеличение скорости нагрева свыше 88°С/ч и увеличение скорости охлаждения свыше 88°С/ч приводит к заметному снижению прочности ФЦП.

Образцы ФЦП полученные по оптимальному режиму автоклавной обработки подвергали испытаниям на водопоглощение, морозостойкость, деформации усадки/набухания, воздухоустойкость, водостойкость и теплопроводность. Установлено, что сокращение продолжительности автоклавной обработки не приводит к снижению исследуемых эксплуатационных свойств ФЦП.

Заключение

1. Выполненные исследования показали, что оптимальным параметром автоклавной обработки ФЦП повышенной долговечности является: скорость нагрева – 88°С/ч, время изотермической выдержки при $t=175^\circ\text{C}$ и $P=1$ МПа – 5 ч, скорость охлаждения – 88°С/ч. Оптимизация параметров автоклавной обработки, позволила сократить ее продолжительность на 4 часа.

2. Получены ФЦП со следующими удельными характеристиками: предел прочности при изгибе – 27,5 МПа, теплопроводность – 0,22 Вт/м °С, усадка – 0,2 мм/м, морозостойкость – 250 циклов, воздухоустойкость – 300 циклов, ударная

вязкость – 2,5 кДж/м², водопоглощение – 3 %, коэффициент водостойкости – 0,95.

Литература

1. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества. Стройиздат, Москва, 1986. 464 с.
2. Боженов П.И. Технология автоклавных материалов. Стройиздат, Ленинград, 1978. 368 с.
3. Воробьев, Х.С. Вяжущие материалы для автоклавных изделий / Х.С. Воробьев. – М. 1972.
4. Ю.В. Хомченко. Повышение эффективности автоклавных материалов на основе модификации

- вяжущего: дисс. канд. техн. наук, БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 2008. 167 с.
5. ГОСТ 8747-88 (СТ СЭВ5851-86). Изделия асбестоцементные листовые. Методы испытаний. М.: Издательство стандартов, 1988. – 17 с.
 6. Пат. РФ 2486150, С 04 В 28/04. Фиброцементная смесь [Текст] / В. С. Изотов, Р. Х. Мухаметрахимов; опубл. 27.06.13, Бюл. № 18. - 6 с.
 7. Пат. РФ 2500633, С04В 22/00. Органоминеральный модификатор для фиброцементных композиций / В.С. Изотов, Р.Х. Мухаметрахимов; опубл. 10.12.2013, – 5 с.

© **Р. Х. Мухаметрахимов** – канд. техн. наук, ст. препод. каф. технологии, организации и механизации строительства КГАСУ, muhametrahimov@mail.ru; **В. С. Изотов** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологии, организации и механизации строительства КГАСУ, v_s_izotov@mail.ru.

© **R. Kh. Mukhametrakhimov** - Ph.D. in Engineering, senior lecturer of Dept. of Technology, Organization and Mechanization of Construction, Kazan State University of Architecture and Engineering, muhametrahimov@mail.ru; **V. S. Izotov** - D. Sc. in Engineering, Prof., Head of Dept. of Technology, Organization and Mechanization of Construction, Kazan State University of Architecture and Engineering, v_s_izotov@mail.ru.