

УДК 666.965

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ДЛЯ КОНТРОЛЯ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА ПРОЧНОСТИ СИЛИКАТНОГО КИРПИЧА, ПОЛУЧАЕМОГО ИЗ ОТХОДОВ ЛИТЕЙНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

канд. техн. наук **Д.Н. ШАБАНОВ**, канд. техн. наук, доц. **А.М. ИВАНЕНКО**
(Полоцкий государственный университет)

Рассматриваются физико-механические свойства силикатного автоклавированного материала, получаемого с использованием отходов литейного производства, такие как прочность на сжатие, изгиб, деформативность, скорость ультразвука. В качестве отходов литейного производства используются отработанная формовочная смесь, гранулированный ваграночный шлак. Изучено влияние состава сырьевой смеси и технологических параметров производства на изменение прочности на изгиб, скорости распространения в материале ультразвука. Определена взаимосвязь между прочностью материала, скоростью ультразвука, производным параметром, включающим плотность материала и скорость ультразвука. Сделан вывод о возможности контроля прочности изделий на основе неразрушающих методов контроля. Получены зависимости, позволяющие прогнозировать прочностные свойства изделий на основе неразрушающих методов контроля.

Введение. Силикатные автоклавные материалы обладают рядом преимуществ: меньше капиталовложения на организацию производства; ниже материалоемкость и затраты топливно-энергетических ресурсов; доступное сырьё; возможность использования отходов промышленности, что позволяет широко внедрять ресурсосберегающие, энергосберегающие и безотходные технологии [1 – 4].

Однако в силу объективных и субъективных причин при производстве силикатных автоклавных материалов вынуждены применять сырьевые материалы с большой изменчивостью состава и свойств. Это касается как природного, так и техногенного сырья. Известно, что отходы производства обладают высокой нестабильностью качества, выражающейся в статистических колебаниях ее свойств по показателям активности, скорости гидратации, экзотермическому эффекту, непосредственно влияющим на протекание гетерогенной реакции гидротермального синтеза цементирующих веществ. Это приводит к значительным издержкам по качеству получаемых силикатных автоклавных материалов и изделий.

Силикатный бетон представляет собой сложную многофазную систему, состоящую из зерен песка, его тонкоизмельченных частиц и связующего их в прочный монолит цементирующего вещества, пронизанного замкнутыми и сообщающимися между собой порами. Все цементирующее вещество силикатного бетона состоит из новообразований, в общем сходных с теми, которые возникают при безавтоклавном твердении бетона. Но процесс их формирования завершается к концу автоклавной обработки, в то время как в цементном камне обычного бетона сохраняются частицы клинкера, продукты гидратации которых длительное время обеспечивают процесс формирования новообразований. Таким образом, важное значение приобретает степень взаимодействия частиц исходной сырьевой смеси между собой. При этом в мелкозернистом силикатном бетоне отсутствуют крупные каменные включения, что приводит, с одной стороны, к увеличению относительного объема цементирующих новообразований, а с другой – к снижению концентрации напряжений, возникающих из-за различия деформативных свойств цементного камня и зерен включений. Более надежная, чем в обычном бетоне, связь зерен песка с цементирующими новообразованиями, отсутствие крупных включений в виде гравия или щебня, больший объем цементирующих новообразований, законченность процесса формирования определяют основные особенности прочностных и деформативных свойств силикатного бетона.

Как показали исследования [5], ультразвуковой импульсный метод может быть с успехом применен для экспресс-контроля прочности на сжатие, изгиб и установления марки кирпича. При массовом контроле марки кирпича ультразвуковой импульсный метод оказался более эффективным, чем при контроле бетона, из-за выявленной опытами большей чувствительности его к изменениям прочности керамики, чем бетона. Если при испытании бетонов изменению прочности на 1 кг/см^2 соответствует изменение скорости ультразвука на $3 - 4 \text{ м/с}$, то при контроле прочности кирпича на 1 кг/см^2 прочности приходится $15 - 20 \text{ м/с}$ скорости, т.е. чувствительность метода при использовании его в испытаниях кирпича в $5 - 6$ раз выше, чем при испытаниях бетона.

Использование ультразвукового импульсного метода определения марки кирпича экономически выгодно для заводов-изготовителей, так как быстрая оценка качества дает возможность отгрузить заказчику партию с незаниженной прочностью, т.е. по более высокой цене. Следует отметить, что использование ультразвукового метода способствует более глубокому изучению связей акустических показателей (скорость распространения продольной, поперечной и поверхностной волн, логарифмического декремента затухания, полного времени реверберации) с прочностными и деформативными свойствами строительных мелкоштучных изделий.

Деформативные свойства бетона определяются свойствами его компонентов и условиями их взаимодействия. Нарушение сцепления цементного камня с заполнителем – одна из наиболее важных причин разрушения силикатного бетона при различных видах силового воздействия. Поэтому важное значение приобретает возможность проведения экспресс-оценки основных свойств получаемых изделий, прогнозирование эксплуатационных качеств на стадии производства и при необходимости корректировка состава исходной шихты. Такую оценку возможно провести с использованием неразрушающих методов контроля качества изделий, в частности ультразвукового метода.

Мелкоштучные строительные материалы на основе силикатного автоклавированного бетона характеризуются прочностью на сжатие и на изгиб. Прочность на изгиб характеризует полноту реакции гидратации, величину адгезии между «цементным камнем» и заполнителем. Также монолитность материала можно оценить по скорости распространения ультразвука. Кроме того, скорость ультразвука является косвенной характеристикой прочности материала, что позволяет проводить экспресс-оценку марки материала на основании неразрушающих методов определения свойств материалов.

Исследовательская часть. Данная работа является продолжением цикла исследований [6 – 8]. Ранее было установлено, что с использованием отходов литейного производства – отработанной формовочной смеси и гранулированного ваграночного шлака – можно получать силикатный кирпич марок по прочности 125, 150, 175 при соответствии требованиям по морозостойкости, предъявляемым к рядовым стеновым изделиям. Согласно действующим нормативным документам [9] марка силикатного кирпича устанавливается на основании сочетания прочности на сжатие и изгиб.

Цель данной работы – определение прочности на изгиб, скорости распространения ультразвука в материале, оценка деформативных свойств материала, определение зависимостей между прочностными характеристиками и скоростью ультразвука.

Исследование включало в себя подготовку образцов-балочек размерами 40×40×160 мм из составов по 6-факторному эксперименту по плану Рехтшафнера [6 – 8]. На первом этапе проводились исследования скорости ультразвука на образцах-балочках в четырех точках: три поперек балочки и одна вдоль, после чего вычислялась средняя скорость распространения ультразвука. Затем определяли прочность образцов на изгиб с оценкой их деформативности. Исследования выполнялись на образцах-балочках стандартных размеров с наклейкой тензодатчиков на нижнюю поверхность в зоне чистого изгиба, обработку полученных результатов проводили с использованием аналогово-цифрового преобразователя, позволяющего в режиме реального времени получать фактические деформации образцов. Полученные половинки балочек впоследствии были испытаны на прочность при сжатии. Анализ результатов показал, что полученная прочность половинок балочек на сжатие и определенная ранее [6; 8] коррелируют, при этом коэффициент линейной корреляции равняется 0,99.

На основании полученных результатов были построены адекватные математические зависимости при доверительной вероятности $P = 0,95$. Ниже приведены зависимости влияния технологических факторов для показателей:

- прочность на изгиб (МПа)

$$R_{изг} = 6,4 + 1,9 \cdot X_1 - 0,69 \cdot X_2 + 0,58 \cdot X_4 - 0,46 \cdot X_1 \cdot X_3; \quad (1)$$

- скорость распространения ультразвука в материале, м/с

$$V_{36} = 1976 + 290 \cdot X_1 - 397 \cdot X_1^2 + 479 \cdot X_2^2 - 69 \cdot X_1 \cdot X_3 + 62 \cdot X_2 \cdot X_3 - 87 \cdot X_2 \cdot X_5. \quad (2)$$

Полученные результаты прочности на изгиб от состава исходного сырья свидетельствуют, что наибольшее влияние на изменение прочности на изгиб оказывает расход вяжущего (рис. 1) в результате более полного заполнения пор между зёрнами заполнителя, увеличения площади контакта между заполнителем и цементирующим веществом. При этом увеличение доли ваграночного шлака в составе вяжущего приводит к снижению прочности на изгиб, причиной чего может служить недостаточная активность ваграночного шлака при автоклавной обработке. Из технологических параметров наибольшее влияние на прочность оказывает удельное давление прессования сырца, что связано с более плотной упаковкой частиц материала и, как результат, с повышением зоны контакта. Следует отметить, что содержание вяжущего в интервале от среднего до максимального значения обеспечивает минимально требуемую прочность на изгиб согласно действующим нормативным документам [9].

После оцифровки сигналов, полученных с тензодатчиков, и их обработки были построены графики зависимости деформаций от напряжения в балочках. Анализ зависимости деформаций при чистом изгибе от действующих напряжений показал, что для образцов, характеризующихся более полным протеканием реакции гидратации, большим количеством вяжущего, значение предельных деформаций увеличивается. При этом кривые зависимости деформаций от напряжения для наиболее прочных образцов характеризуются наличием горизонтальной ветви деформаций при постоянных нагрузках, косвенно сви-

детельствующей о наличии пластической составляющей деформаций. График зависимости деформаций от напряжений в образцах, обладающих малой прочностью, свидетельствовал о том, что зависимость является более прямолинейной и характерна для хрупких материалов.

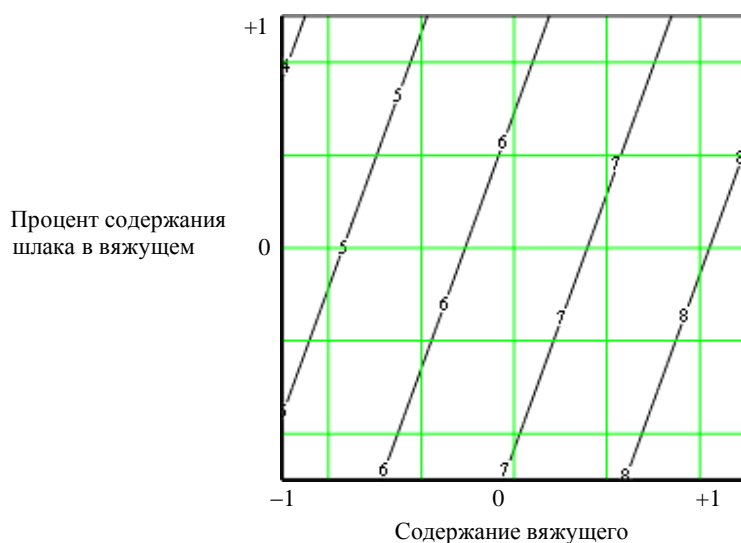


Рис. 1. Влияние содержания вяжущего, расхода шлака от веса извести на прочность образцов-балочек при изгибе

Скорость распространения ультразвука в материале свидетельствует о совершенстве его внутренней структуры, прочности контакта частиц материала между собой. Для оценки влияния технологических параметров на основании полученного уравнения (2) были построены зависимости влияния расхода вяжущего и содержания в нем шлака на скорость распространения ультразвука. Полученные модели представлены на рисунках 2, 3.

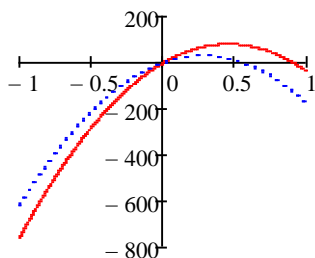


Рис. 2. Влияние количества вяжущего на скорость распространения ультразвука

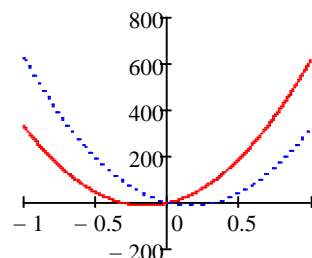


Рис. 3. Влияние процента содержания шлака в вяжущем на скорость распространения ультразвука

Проведенный анализ позволил установить, что наиболее оптимальное содержание вяжущего находится в пределах от среднего до максимального значения варьирования данного фактора, что соответствует области максимальных прочностных и эксплуатационных свойств материала. Использование ультразвукового метода позволяет оценивать прочностные свойства материала и в случае необходимости корректировать производственный процесс. При оценке прочности строительных конструкций с помощью ультразвуковой диагностики находят прямую зависимость между скоростью распространения ультразвука и прочностью образцов. Определение зависимости между прочностью силикатных материалов и скоростью ультразвука выполнялось согласно методике, представленной в [10]. На основании полученных результатов были построены зависимости прочности образцов на сжатие и изгиб от скорости ультразвука.

Зависимость прочности на сжатие от скорости ультразвука:

$$R_{сж} = -0,71 + 0,0086 \cdot V_{зв} \quad (3)$$

Зависимость прочности на изгиб от скорости ультразвука:

$$R_{изг} = -1,7027 + 0,004 \cdot V_{зв} \quad (4)$$

Полученные зависимости имеют коэффициент корреляции, равный 0,55 – 0,57. После набора статистики на готовых изделиях возможно уточнение данных зависимостей с учетом изменений состава.

Как уже отмечалось, скорость распространения ультразвука является параметром прочности контактов между частицами материала и не учитывает пористость материала, в связи с этим выявлен большой разброс между скоростью ультразвука и прочностью материала в целом. Структурная неоднородность материала оказывает влияние на прочность по той причине, что на границах смежных зон с различными деформативными свойствами при нагружении материала происходит концентрация напряжений. Еще задолго до достижения предельной нагрузки внутри материала в областях концентрации напряжений напряжения могут достигать предела прочности, и происходит образование трещин. Эти трещины в свою очередь являются очагами разрушения всего материала. В случае когда минералогический скелет приобрел высокую прочность, его деформативные и прочностные показатели приблизились по своему значению к соответствующим показателям частиц инертного заполнителя, появляются условия для совместной работы минералогического скелета и заполнителя под нагрузкой.

Известно, что для оценки деформативных свойств материала, косвенной оценки совершенства структуры материала, его прочности применяют динамический модуль упругости, определяемый по значению скорости распространения ультразвука с учетом объемного веса материала и коэффициента Пуассона.

Учитывая сложность определения коэффициента Пуассона на малых образцах, в данной работе предложено использовать условный коэффициент структуры, включающий произведение скорости ультразвука и объемного веса образцов. При определении зависимости между условным коэффициентом структуры и прочностными параметрами установлено, что коэффициент корреляции составляет 0,86 для зависимости прочности на сжатие от предлагаемого коэффициента и 0,91 – для зависимости прочности на изгиб от условного коэффициента структуры. Графики зависимости прочности на сжатие и прочности на изгиб от условного коэффициента структуры представлены на рисунках 4 и 5.

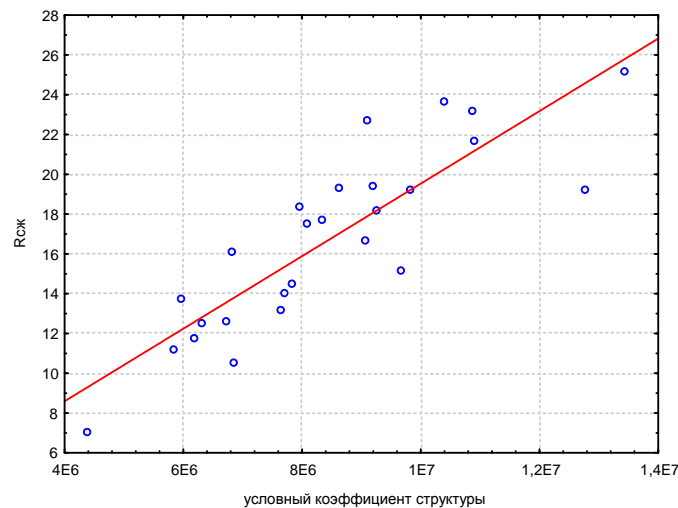


Рис. 4. Зависимость прочности на сжатие от условного коэффициента структуры

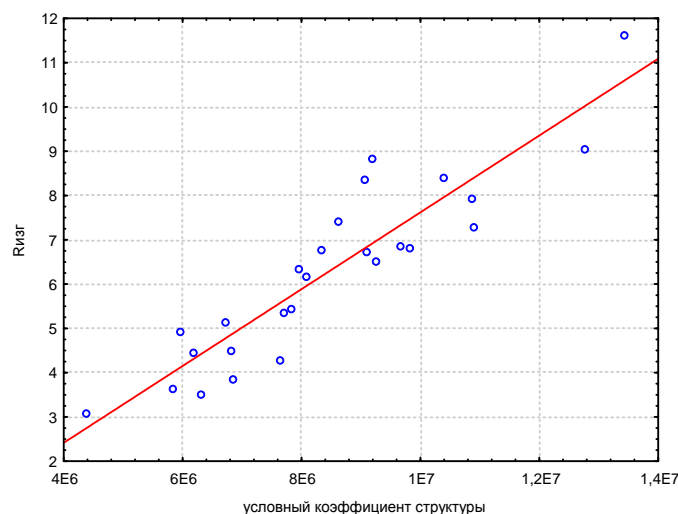


Рис. 5. Зависимость прочности на изгиб от условного коэффициента структуры

Анализ взаимосвязи между прочностными показателями и условным коэффициентом структуры показал, что данный коэффициент для силикатных материалов на основе отходов литейного производства более полно учитывает свойства структуры материала при сравнении с использованием одной скорости распространения ультразвука. Однако, как известно, при насыщении зрелых строительных материалов водой или при наличии адсорбционного размягчения (снижения прочности) скорость распространения ультразвука увеличивается. Вследствие чего оценку прочности силикатных материалов на основе ультразвуковых неразрушающих методов возможно применять только при постоянных параметрах окружающей среды (например, при производстве изделий).

Выводы. Подтверждено, что с использованием отходов литейного производства можно получать силикатный кирпич, обладающий требуемой прочностью на изгиб. Получены зависимости прочности на сжатие и изгиб от скорости распространения ультразвука, условного коэффициента структуры, являющегося произведением скорости ультразвука и плотности материала, которые позволяют прогнозировать свойства силикатного кирпича при производстве. После набора большого числа статистических данных, получения коэффициента Пуассона для силикатного кирпича, получаемого на основе отходов литейного производства, возможен переход на использование при оценке параметров прочности на производстве динамического модуля упругости как величины, более полно учитывающей внутреннюю структуру материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котов, М.И. Направления технического прогресса в производстве автоклавных материалов / М.И. Котов, В.Р. Клаусон, П.В. Эвинг // Строительные материалы. – 1985. – № 12. – С. 4 – 6.
2. Домбровский, А.В. Опыт производства, проектирования и применения ячеистобетонных изделий в жилищном, промышленном и сельскохозяйственном строительстве / А.В. Домбровский, Я.М. Паплавскис // Строительные материалы. – 1983. – № 6. – С. 1618.
3. Эвинг, П.В. Экономическая эффективность применения и перспективы развития производства изделий из ячеистых бетонов / П.В. Эвинг // Производство и применение силикатных бетонов: сб. тр. НИПСиликатобетона. – Таллин, 1981. – Вып. 15. – С. 162 – 178.
4. Воронин, А.И. Разработка системы управления параметрами технологии силикатных автоклавных бетонов в условиях нестабильности свойств применяемой известки: автореф. дис. ... канд. техн. наук по спец. 05.23.05: Строительные материалы и изделия / А.И. Воронин, 2003. – Воронеж. – 25 с.
5. Столярова, Е.А. Исследование ультраакустического метода контроля качества строительной керамики с учетом ее структурных особенностей: дис. ... канд. техн. наук / Е.А. Столярова, 1970. – Фрунзе. – 222 с.
6. Шабанов, Д.Н. Формирование структуры силикатного кирпича, получаемого из отходов литейного производства / Д.Н. Шабанов, А.М. Иваненко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2011. – № 8. – С. 73 – 76.
7. Шабанов, Д.Н. Исследование структурно-механических свойств отходов литейного производства / Д.Н. Шабанов, А.М. Иваненко // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. – 2006. – № 3. – С. 20 – 22.
8. Шабанов, Д.Н. Физико-механические свойства силикатного кирпича, получаемого на базе отходов литейного производства / Д.Н. Шабанов, В.И. Никитин, А.М. Иваненко // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. – 2006. – № 4. – С. 20 – 22.
9. Кирпич и камни силикатные: СТБ 1228-2000 / М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск, 2000. – 14 с.
10. Кирпич и камни силикатные. Ультразвуковой метод определения прочности при сжатии: ГОСТ 24332-88. – М., 1988. – 17 с.

Поступила 04.05.2012

ULTRASOUND USE IN PRODUCTION PROCESS TO CONTROL DURABILITY OF SILICATE BRICK MADE FROM FOUNDRY INDUSTRY WASTE

D. SHABANOV, A. IVANENKO

This paper deals with the physical and mechanical properties of autoclaved silica material obtained with the use of foundry waste, such as compressive strength, flexural strength, deformability, the speed of ultrasound. As a foundry waste using worked-out molding sand, granulated cupola furnace slag. The effect of raw mix and technological parameters of production to changes in flexural strength, the velocity of propagation of ultrasound in the material. Determined the relationship between the strength of the material, the speed of ultrasound derived parameters include the density of the material and the velocity of ultrasound. It is concluded that the possibility of controlling the strength of products based on non-destructive methods of control-ing. The dependences of predicting the strength properties of products based on non-destructive methods of control.