

Результаты опробования возможности применения низкочастотного акустического метода для определения марочности кирпича по частотам собственных колебаний

Сотрудники
ООО «ЗВУК»,
Санкт-Петербург



**Коварская
Елена Зеликовна**

Зам. генерального директора. Окончила в 1974 г. ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности электроакустика и ультразвуковая техника.



**Московенко
Игорь Борисович**

Генеральный директор, д. т. н. Окончил в 1962 г. ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности электроакустика и ультразвуковая техника.

Введение

В основу применения низкочастотных методов акустического контроля, основанных на измерении частот собственных колебаний, положено наличие корреляционных зависимостей между упругими константами материала изделия и такими физико-механическими свойствами, как твердость, пористость, плотность, прочность и т. п., а также их связи с эксплуатационными характеристиками изделий и технологией их изготовления [1, 2].

В процессе контроля методом собственных колебаний измеряется частота собственных колебаний (ЧСК) изделия, соответствующая определенному виду колебаний, затем рассчитывается приведенная скорость распространения акустических волн (стержневая скорость звука, C_i) по известной формуле

$$f_i = F_i C_i \quad (1)$$

где f_i — ЧСК определенного вида i ; F_i — коэффициент формы, зависящий от формы и размеров изделий, коэффициента Пуассона, а также от вида колебаний; $C_i = (E/\rho)^{1/2}$ — скорость распространения упругих колебаний в бесконечно длинном стержне, изготовленном из такого же материала, что и материал контролируемого изделия, — физическая величина, которая используется как выходной параметр контроля (здесь E — модуль Юнга; ρ — плотность материала изделия. Параметр C_i — приведенная скорость распространения акустических волн (определение по ГОСТ 25961 и ГОСТ Р 52710–2007), связанная с тех-

нологическими и эксплуатационными свойствами контролируемого изделия.

По предварительно установленным корреляционным зависимостям определяются необходимые физико-механические свойства. Параметр C_{ϵ} является весьма информативным и в ряде случаев достаточно полно характеризует физико-механические свойства изделий, определяющие их поведение при эксплуатации.

Для удобства использования параметр C_{ϵ} может быть пронормирован в виде звуковых индексов ЗИ (условное обозначение интервалов C_{ϵ} по ГОСТ 25961 и ГОСТ Р 52710–2007).

Определение приведенной скорости распространения акустических волн C_{ϵ} производится путем расчета по формуле (1) с учетом формы и геометрических размеров изделия.

Для изделий стержневого типа, к которым можно отнести кирпич, как правило, подлежат измерению частоты продольных ($f_{\text{пр}}$) или изгибных ($f_{\text{изг}}$) колебаний, формы которых

представлены на рис. 1. Акустический метод позволяет с помощью, например, сертифицированных измерителей ЧСК типа «Звук» различных модификаций вести сплошной (100%-й) неразрушающий контроль изделий из различных технологических партий, а также дальнейший подбор комплектов изделий с близкими или заданными свойствами. Акустический контроль качества осуществляется по значению одного из перечисленных параметров: $f_{\text{пр}}$, C_{ϵ} или ЗИ.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований, выполненных на одном из ведущих предприятий по выпуску строительного кирпича с целью отработки методики измерений ЧСК кирпича и установления наличия связи акустических характеристик с прочностью (маркой) кирпича. Для всех предоставленных образцов кирпича с применением измерителя частот собственных колебаний «Звук-203М» были проведены измерения трех частот: изгибных колебаний в двух направлениях — $f_{\text{изг}}$ (а) по толщине, $f_{\text{изг}}$ (б) по ширине кирпича и продольных колебаний — $f_{\text{пр}}$.

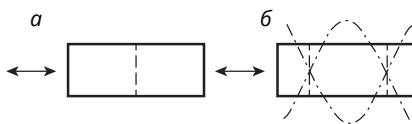


Рис. 1. Формы продольных (а) и изгибных (б) колебаний изделий в виде стержней. Пунктиром показаны узловые линии данного типа колебаний (линии, на которых колебания отсутствуют)

Метод измерения ЧСК с использованием прибора «Звук-203М» основан на возбуждении свободных колебаний в контролируемом изделии с помощью удара с последующим выделением отдельных составляющих спектра частот собственных колебаний.

Измерения выполнены на полнотелых и пустотных кирпичах различных типов и размеров, заранее отобранных из различных технологических партий с учетом различного расположения кирпича при обжиге с целью представления в выборке из партии образцов с наибольшим различием в свойствах. Примеры типов пустотного кирпича приведены на рис. 2.



Рис. 2. Кирпич керамический с квадратными и прямоугольными отверстиями

Перечень проконтролированных изделий приведен в табл. 1. Там же указаны полученные для представленных образцов изделий средние значения размеров и полученные по результатам испытаний интервалы предела прочности на сжатие $\sigma_{пр}$.

Порядок проведения исследований рассмотрим на примере измерений полнотелого красного кирпича.

Предварительно были произведены теоретический расчет коэффициентов формы F_i , выбор поддиапазонов для измерения ЧСК указанных типов кирпича с номинальными размерами, отработка экспериментальной методики выполнения измерений. С помощью прибора «Звук-203М» проведены измерения ЧСК на всех представленных кирпичах (14 шт.). Результаты измерений ЧСК, результаты расчета F_i , расчетные соотношения между частотами и соответствующие значения для экспериментальных данных приведены в табл. 2.

Существенное отличие экспериментальных соотношений частот от расчетных может быть связано с наличием крупных неоднородностей (дефектов, трещин), а систематическое для средних значений — с наличием анизотропии свойств. Кроме того, на этих соотношениях при проведении исследований на пустотных кирпичах должно отразиться влияние формы пустот.

Для определения наличия и характера зависимости между акустическими и прочностными характеристиками (предел прочности на сжатие

Табл. 1. Проконтролированные типы кирпичей

Тип пустот	Пустотность	Вид кирпича	Размеры, мм $a \times b \times L$	Кол-во	$\sigma_{пр}$, кгс/см ²
Щелевые	39%	Лицевой одинарный коричневый	65 × 115 × 245	20	145–197
		Лицевой одинарный красный	65 × 120 × 254	20	118–221
		Лицевой одинарный желтый	65 × 120 × 254	16	60–128
		Лицевой одинарный белый	65 × 120 × 254	8	150–165
		Лицевой утолщенный красный	88 × 115 × 250	32	163–187
Квадратные	33%	Лицевой утолщенный	82 × 88 × 245	16	248–359
Круглые отверстия (3 шт)	9%	Полнотелый с технологическими пустотами; красный	65 × 115 × 250	16	280–425
		Полнотелый с технологическими пустотами; белый	65 × 115 × 245	16	Более 440
Полнотелый	0%	Рядовой полнотелый одинарный красный	68 × 118 × 250	14	144–195
Квадратные пустоты	29%	Рядовой пустотелый одинарный красный	–	13	159–219

в соответствии с ГОСТ 8462–85 «Материалы стеновые») по результатам акустических измерений подобраны пары кирпичей с максимально близкими значениями ЧСК, на которых проведены разрушающие испытания на прочность. Пары кирпича подобраны с максимальными, минимальными и средними значениями ЧСК для проконтролированной выборки изделий.

Из рассматриваемой выборки (14 кирпичей) первоначально были отобраны 3 пары кирпичей для определения предела прочности на сжатие. Затем для некоторого увеличения статистических данных из оставшихся кирпичей были скомплектованы еще 4 пары кирпичей, на которых были определены значения $\sigma_{пр}$. Результаты испытаний приведены в табл. 2. На рис. 3 представлены результаты измерений и их обработки.

Полученные результаты показывают наличие достаточно тесной корреляционной связи между исследуемыми параметрами, что позволяет сделать вывод о возможности использования результатов акустического контроля для оценки прочности кирпича. При этом для сравнитель-

Табл. 2. Результаты измерений и расчетов

Номер	Частота, Гц			$f_{изг}(b)/f_{изг}(a)$	$f_{пр}/f_{изг}(b)$	$f_{пр}/f_{изг}(a)$	Предел прочности, кгс/см ²
	$f_{изг}(a)$	$f_{изг}(b)$	$f_{пр}$				
4	1488	2083	3085	1,40	1,48	2,07	144
12	1491	2256	3295	1,51	1,46	2,21	
2	1528	2314	3272	1,51	1,41	2,14	161
6	1533	2309	3383	1,51	1,47	2,21	
1	1623	2540	3458	1,57	1,36	2,13	195
8	1689	2488	3605	1,47	1,45	2,13	
7	1514	2271	3176	1,50	1,40	2,10	165
3	1510	2192	3009	1,45	1,37	1,99	
9	1628	1973	3876	1,21	1,96	2,38	218
10	1702	2492	3942	1,46	1,58	2,32	
11	1343	2241	3139	1,67	1,40	2,34	161
5	1516	2369	3440	1,56	1,45	2,27	
13	1431	2086	2723	1,46	1,31	1,90	110
14	1125	2012	2736	1,79	1,36	2,43	
Средние значения	–	–	–	1,50	1,46	2,19	–
Коэфф. формы, $F_p, м^{-1}$ (расчет)	0,000893	0,001263	0,002000	1,41	1,58	2,24	–

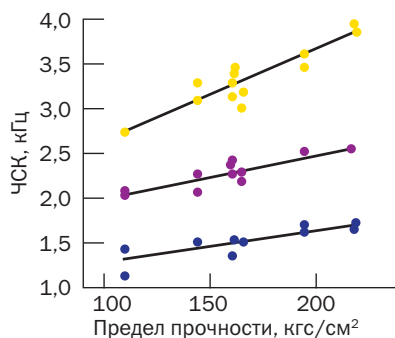


Рис. 3. Зависимость частоты свободных колебаний от предела прочности для трех нижних частот спектра кирпича керамического красного полнотелого (R — коэффициент корреляции):

- $f_{пр} = 10,107\sigma_{пр} + 1629,5$; $R = 0,93$;
- $f_{изг}(b) = 4,8302\sigma_{пр} + 1504,5$; $R = 0,90$;
- $f_{изг}(a) = 3,611\sigma_{пр} + 913,34$; $R = 0,82$

ных испытаний кирпича одинаковых типов можно использовать непосредственно измеренные значения ЧСК, а при необходимости установления общей для каждого состава шихты градуировочной зависимости $C_t - \sigma_{пр}$ при разработке методики и определения значений C_t потребуется уточнение коэффициента формы для каждой формы и размеров изделий.

Дополнительно на кирпичах с максимальными и минимальными значениями ЧСК в выборке проведены ультразвуковые измерения с помощью прибо-

ра «Пульсар-1.2» аналогично измерениям по ГОСТ 24332–88 «Кирпич и камни силикатные. Ультразвуковой метод определения прочности при сжатии». Измерения скорости распространения ультразвуковых колебаний выполнены в различных направлениях для оценки возможной анизотропии свойств. Полученные результаты подтверждают наличие определенной анизотропии, хорошо совпадают с результатами измерений ЧСК и подтверждают возможность использования акустического контроля для оценки прочности.

Зависимости между ЧСК и пределом прочности практически для всех видов кирпича имеют одинаковый характер. Для типов кирпича с достаточно большим диапазоном ЧСК и количеством пар образцов для определения прочности построены предварительные градуировочные зависимости, которые имеют достаточно высокий коэффициент корреляции, что позволяет предположить наличие устойчивой связи акустических и прочностных свойств и, соответственно, возможность оперативного неразрушающего контроля прочности по результатам измерения ЧСК.

Следует обратить внимание на то, что наличие некоторых характерных дефектов, например, нарушение сплошности (отсутствие соединения в межпустотных перегородках), в зависимости от их расположения может по-разному повлиять на значения разных видов ЧСК и изменить соотношение ЧСК в спектре. При этом наличие некоторых дефектов не всегда ведет к снижению предела прочности. Таким образом, при построении градуировочных зависимостей для определения марочности кирпича следует выбирать изделия без видимых дефектов, поскольку включение в обработку таких данных приводит к искажению градуировочной зависимости и снижению коэффициента корреляции. В процессе разработки методики контроля при накоплении статистических данных влияние различных видов дефектов и их расположения следует специально анализировать и учитывать

Выводы

1. Имеется возможность измерения акустических характеристик (ЧСК, C_p) полнотелых и пустотных кирпичей как при штучном (индивидуальном) контроле, так и в условиях производства непосредственно на печных вагонетках и поддонах.
2. Имеются корреляционные зависимости между результатами измерения ЧСК (C_p) и пределом прочности на сжатие.

3. Имеется возможность измерения ЧСК кирпича после сушки до обжига.

Таким образом, имеется возможность применения оперативного неразрушающего акустического контроля кирпича различных типов и размеров по ЧСК как на готовых изделиях, так и перед их постановкой на обжиг. По результатам акустического контроля готового кирпича с использованием градуировочных зависимостей может быть определен предел прочности и, соответственно, марка кирпича.

Для реализации такого контроля рекомендуется выполнить следующие работы:

- разработать методику измерения ЧСК (в т. ч. определить оптимальные условия измерения и коэффициенты формы, оценить влияние типовых дефектов) для различных типов кирпича;
- по результатам накопления и обработки статистических данных по совместным измерениям ЧСК и предела прочности по методике, принятой на предприятии, установить градуировочные зависимости для различных видов изделий (до и после обжига);
- провести опытную эксплуатацию методики с целью отработки методики в производственных условиях, проверки и уточнения градуировочных зависимостей с дополнительной маркировкой акустических характеристик;
- при необходимости провести аттестацию методики и введение акустического контроля параллельно (далее — взамен) разрушающим испытаниям.

Литература

1. Московенко И. Б. Низкочастотный акустический контроль физико-механических свойств строительных и огнеупорных изделий. — В мире НК. 2002. № 2 (16). С. 26–28.
2. Коварская Е. З., Московенко И. Б. Использование частот собственных колебаний при неразрушающем контроле физико-механических свойств материалов и изделий. — В мире НК. 2012. № 4 (58). С. 5–8.