

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И КАЧЕСТВА РАЗЛИЧНОГО РОДА МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ АЛЮМИНИЯ

Е.З. Коварская, И.Б. Московенко

ООО «ЗВУК», Санкт-Петербург, Россия

От качества углеродных изделий, используемых при производстве алюминия, в значительной мере зависит как продолжительность работы электролизера, так и его основные технико-экономические показатели. На работоспособность углеродных блоков существенное влияние оказывает их пористость. Пористость прессованных и обожженных углеродных изделий, в том числе подовых блоков и обожженных анодов, определенным образом связана с механической прочностью этих изделий: с увеличением пористости механическая прочность падает (за счет ослабления сцепления между частицами углеродного материала), а уменьшение пористости влечет за собой повышение механической прочности блока. На первый взгляд кажется, что при сильном уменьшении пористости блока возрастающая механическая прочность должна способствовать его большей стойкости и работоспособности. Однако при уменьшении пористости будут в большей степени проявляться внутренние напряжения, возникающие в теле блока при пропитывании его расплавленными солями. Эти напряжения, пропорциональные капиллярному давлению пропитывающих солей и направленные изнутри блока, будут ослаблять сцепление углеродных частиц между собой, что, в свою очередь, будет приводить к значительному увеличению объема блока и нарушению его цельности. В сильной степени пропитывание углеродных изделий электролитом зависит от их пористости и, следовательно, от среднего размера радиуса пор, который увеличивается по мере возрастания общей пористости углеродного блока [1]. В Таблице 1 приведены величины капиллярного давления расплавов (для 1000°C), рассчитанные в зависимости от радиуса пор. Из этих данных следует, что внутренние напряжения, возникающие в катодных блоках алюминиевых ванн при проникновении в их толщу расплавленных солей, должны возрастать по мере уменьшения их пористости или радиуса пор. Необходимо отметить, что эти данные рассчитаны для условий, не учитывающих влияния алюминия, растворенного в электролите, что еще в большей степени повышает капиллярное давление, а, следовательно, усиливает проникновение расплавленной соли в поры углеродного материала.

Таблица 1.

Средний радиус пор в катодных блоках с различной пористостью и капиллярное давление для фторида натрия и криолитоглиноземных расплавов.

| Пористость, % | Средний радиус пор, мм | Капиллярное давление, Па | |
|---------------|------------------------|--------------------------|--|
| | | NaF | Na ₃ AlF ₆ +12,5% Al ₂ O ₃ |
| 12,6 | 0,0201 | 14130 | 1770 |
| 13,8 | 0,0228 | 12900 | 1560 |
| 14,8 | 0,0330 | 8500 | 1075 |
| 15,5 | 0,0398 | 7200 | 890 |
| 17,2 | 0,0457 | 6195 | 725 |

Таким образом, работоспособность углеродных изделий, используемых при производстве алюминия, в значительной мере определяется их пористостью. Как известно, для контроля

физико-механических свойств различного рода материалов и изделий, на которые пористость оказывает существенное влияние, находят акустические методы контроля, в том числе основанные на измерении частот собственных колебаний (ЧСК) изделий [2]. Это связано с существенной разницей условий распространения акустических колебаний в материале изделия и воздухе, заполняющем поры (скорость звука C_1 в материале углеродного блока 2000—3000 м/с, а в воздухе около 300 м/с). При использовании метода, основанного на измерении ЧСК, был введен показатель — звуковой индекс (ЗИ), являющийся комплексной характеристикой физико-механических свойств и в значительной степени определяемый пористостью контролируемых изделий. Звуковой индекс — это интервал приведенной скорости распространения акустических волн (скорости звука) в материале изделия. Звуковой индекс обозначается целым нечетным числом, равным среднему в данной градации значению параметра Cl , выраженному в м/с и умноженному на 10^{-2} . Скорость распространения акустических волн связана известным соотношением (1) с важными параметрами, характеризующими физико-механические свойства материала изделия, — модулем нормальной упругости (модуль Юнга) E и плотностью материала ρ .

$$C_1 = \sqrt{E/\rho} \quad (1)$$

В свою очередь, скорость звука в углеродных изделиях связана корреляционной зависимостью с его прочностными, структурными и другими физико-механическими и электрофизическими характеристиками. В частности, установлена тесная корреляционная связь между скоростью распространения ультразвуковых колебаний и прочностью, пористостью, объемной плотностью и удельным электросопротивлением углеродных изделий [3]. Необходимо отметить, что модуль нормальной упругости, в значительной степени определяющий скорость звука, сам по себе является весьма важным параметром, влияющим на деформацию блоков под действием статических и динамических нагрузок, которым подвергаются блоки в процессе их эксплуатации. Рядом зарубежных фирм этот параметр включается в число основных показателей, характеризующих физико-механические свойства углеродных блоков.

В настоящее время в алюминиевой промышленности, как правило, реализуются следующие принципы комплектации углеродных изделий, используемых при производстве алюминия. В качестве базовых параметров комплектации углеродных изделий выбраны величины удельного электросопротивления (УЭС) и механической прочности на сжатие. Оценка показателей производится на основании результатов измерений на образцах (кернах), отобранных от обожженных заготовок, а также по результатам измерений УЭС товарных катодных и анодных блоков. Исходя из градации УЭС и механической прочности, сформулированы требования к комплектам углеродных блоков, на основании которых изготовителем формируются комплекты с близкими электрическими и прочностными свойствами, которые затем отгружаются на предприятия, производящие алюминий, для проведения монтажа и капитального ремонта электролизеров. Такие требования юридически закреплены, т. е. внесены в контракты на поставку продукции. Как было указано выше, рядом зарубежных фирм в число основных показателей, характеризующих физико-механические свойства изделий, используемых при производстве алюминия, дополнительно включается модуль нормальной упругости, определяемый, как правило, с использованием акустических методов контроля.

В свое время при производстве углеродных изделий был разработан и освоен акустический метод контроля, основанный на измерении ЧСК [4], а также был налажен выпуск блоков подовых с нормированными физико-механическими свойствами в соответствии со специально разработанными ТУ 48-4804-27-91, предусматривающими маркировку на блоках результатов акустического контроля в виде звуковых индексов ЗИ. Такие блоки поставлялись по запросу заводов, производящих алюминий, и результаты

акустического контроля, замаркированные на блоках, учитывались при подборе комплектов, используемых для монтажа электролизеров. Была показана технико-экономическая целесообразность использования акустического метода, основанного на измерении ЧСК, при производстве и применении углеродных подовых блоков и обожженных анодов с нормированными в виде ЗИ физико-механическими свойствами. В дальнейшем, по причинам в основном организационного характера, эти работы применительно к контролю подобных углеродных изделий были практически прекращены. Однако, применительно к другим видам изделий, в первую очередь различного рода абразивным инструментам, аналогичные работы продолжались, и в 2007г. был разработан и введен в действие ГОСТ Р 52710 – 2007 «Инструмент абразивный. Акустический метод определения твердости и звуковых индексов по скорости распространения акустических волн», в соответствии с которым в настоящее время производится подобный контроль на ряде фирм производителей и потребителей абразивной продукции. Этот ГОСТ может быть положен в основу нормативно-технической документации или стандарта, обеспечивающих возможность аналогичного акустического контроля углеродной продукции. За прошедшее время сменилось, по крайней мере, два поколения приборов типа «Звук», реализующих акустический метод контроля, основанный на измерении ЧСК. В настоящее время выпускаемые ООО «ЗВУК» приборы «Звук-203М» и «Звук-130» прошли государственные испытания, сертифицированы, включены в Государственный реестр средств измерений, достаточно широко используются в нашей стране и поставляются на экспорт в развитые зарубежные страны.

По нашему мнению, представленные материалы свидетельствуют о возможности и целесообразности продолжения ранее выполненных работ по разработке и освоению акустического метода контроля физико-механических свойств и качества подовых блоков и обожженных анодов алюминиевых электролизеров на новом современном уровне, что в свою очередь, может способствовать повышению эффективности использования углеродной продукции, применяемой при производстве алюминия.

В течение 2015-2018 годов проводились инициативные работы [5], которые показали, что современные сертифицированные приборы акустического контроля типа «Звук» различных модификаций могут быть использованы непосредственно в производственных условиях для оперативного экспресс-контроля углеродной продукции, используемой в настоящее время при производстве алюминия. Кроме того, в последнее время работами канадских специалистов [6] применительно к неразрушающему контролю обожженных углеродных анодов предложено использовать быстрый неразрушающий метод контроля качества анодов, основанный на вибромодальном анализе их спектра ЧСК. Показано, что предложенный подход позволяет обнаруживать и различать различные типы внутренних дефектов анода. Обнаружено, что некоторые моды (виды) акустических колебаний чувствительны к присутствию и ориентации трещин в анодном блоке, в то время как другие виды колебаний связаны в основном с изменением физических и механических свойств анодов. Исходя из этих, по мнению канадских специалистов, многообещающих результатов, модальный анализ будет еще более усовершенствован и специализирован в дальнейшей работе.

Принимая во внимание, что измерители частот собственных колебаний типа «Звук-203М» (Рисунок 1), реализующие метод свободных колебаний, и «Звук-130» (Рисунок 2), реализующие метод вынужденных колебаний, могут быть непосредственно использованы для проведения измерений ЧСК как подовых блоков, так и обожженных анодов в условиях их производства и эксплуатации, могут быть сформулированы основные направления дальнейшего освоения неразрушающего акустического метода контроля, основанного на измерении и анализе спектра ЧСК контролируемых изделий.



Рис. 1.



Рис. 2.

На первом этапе целесообразно приступить к накоплению статистических данных по определению физико-механических свойств углеродных подовых блоков и обожженных анодов, поступающих для монтажа и капитального ремонта электролизеров, с целью определения и фиксации реальной картины распределения физико-механических свойств изделий в конкретном электролизере по акустическим характеристикам (паспортизация объекта контроля). Это позволит, с одной стороны, установить наличие связи результатов акустического контроля с прочностными характеристиками и УЭС этих изделий и, с другой стороны, исключит попадание в комплекты изделий с существенно отличающимися свойствами от заданных. Результаты такой паспортизации углеродных блоков, используемых в конкретном электролизере, могут оказаться полезны при принятии решения о его капитальном ремонте или выводе из эксплуатации. Производственный экспресс-контроль таким методом с использованием прибора «Звук-203М» и получением усредненных по всему изделию результатов контроля занимает не более 3-5 минут, при этом не требуется существенной подготовки и специального позиционирования изделий при контроле. На рисунках 3 и 4 приведены примеры использования прибора «Звук-203М» для контроля изделий из других материалов: огнеупорных изделий и чугунных отливок. На Рисунке 3 приведен контроль крупногабаритных огнеупорных блоков, используемых в металлургии, в условиях действующего производства. На Рисунке 4 приведена таблица-методика акустического контроля физико-механических свойств чугунных отливок изделия типа «оконцеватель», которая позволяет производить с помощью прибора «Звук-203М» не только определение физико-механических свойств материала изделия, но и, за счет усложнения методики контроля, позволяет выявлять трещины и другие нарушения структуры материала контролируемого изделия. Использование подобной усложненной методики применительно к углеродным блокам позволяет проводить контроль нескольких составляющих спектра ЧСК с целью выявления изделий с существенными отклонениями частот в спектре ЧСК, что позволит выявлять изделия с крупными дефектами и неоднородностью структуры аналогично вибромодальному анализу, предложенному канадскими специалистами [6].



Рис. 3.

В случае разработки нормативной документации аналогичной упомянутому выше ГОСТ Р 52710-2007 [7] с условным названием “Изделия углеродные. Акустический метод определения физико-механических свойств и звуковых индексов по скорости распространения акустических волн” установленные оптимальные значения акустических характеристик могут быть включены в технические требования к углеродным изделиям, которые отгружаются на предприятия, производящие алюминий, для проведения монтажа и капитального ремонта электролизеров. Такие требования могут быть в дальнейшем внесены в контракты на поставку продукции.

В заключении следует отметить, что использование акустического неразрушающего контроля, основанного на измерении ЧСК, позволяет производить оперативную, надежную и воспроизводимую оценку физико-механических свойств реальных изделий в условиях действующего производства, что должно способствовать максимально эффективному использованию проконтролированных изделий, а также лучшему взаимопониманию между изготовителями и потребителями углеродной продукции, используемой при производстве алюминия.

Таблица – методика

акустического контроля физико-механических свойств чугунных отливок изделий "Оконцеватель" с помощью прибора «Звук-203М» по результатам измерения частот типа f_d

Входные данные для контроля в режиме измерения частоты.

| Номер чертежа (типоразмер) | Основные размеры, мм Dx xd | Номер поддиа- пазона | Время измерения, | Время задержки, | Кoeffи- циент формы, F, 10 ³ 1/м |
|-------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|--|---|--|
| | | | мс, (пункт "↘") | мс (пункт "↙") | |
| A | 134 x x 110 | 10 | 50 (70) | 100 | - |
| | | | или 10 (23) – при контакте через слой поролона | или 50 – при контакте через слой поролона | |
| B | 116 x x 95 | 11 | 50 (70) | 100 | - |
| | | | или 10 (23) – при контакте через слой поролона | или 50 – при контакте через слой поролона | |

Схема расположения изделий при контроле

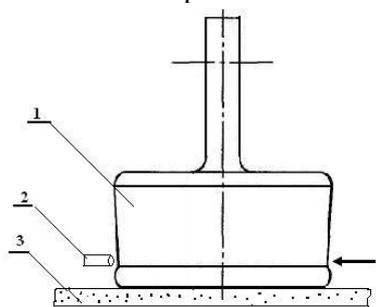


Рис. 1а

- 1 – изделие
- 2 – микрофон
- 3 – поролоновая прокладка
толщиной не менее 20 мм,
превосходящая по площади
размеры отливки
- ↓ - направление и место удара

Вид сверху

Измерение fd_1

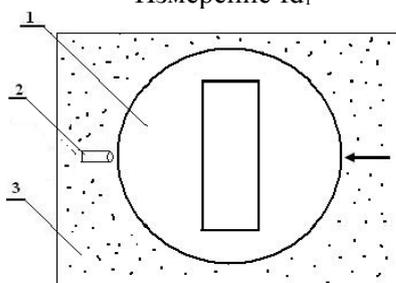


Рис. 1б

Измерение fd_2

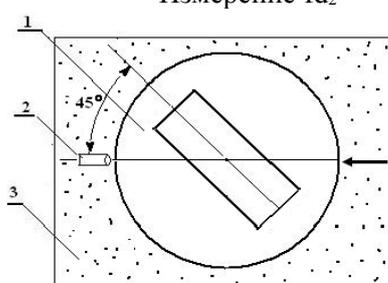


Рис. 1в

Браковочные показатели

| Типоразмер | A | B |
|--|----------|----------|
| Граничное значение браковочной частоты fd_1 , Гц | 1740 | 2110 |
| Допустимое значение $(fd_1 - fd_2)$, менее, Гц | 90 | 100 |

Рис. 4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гребенкин А.Ф., Крюковский В.А., Московенко И.Б. Исследование физико-механических свойств углеродных блоков различных изготовителей с помощью акустического метода. *Решение экологических проблем в производстве алюминия: Сб. Науч. тр. ВАМИ*, Л.: ВАМИ, 1990,62-72 [Grebyonkin A. F., Kryukovskiy V.A., Moskovenko I.B. Research of physico-mechanical properties of carbon blocks of various manufacturers by means of an acoustic method. *The solution of environmental problems in aluminum production: Collection of scientific papers VAMI*, Leningrad: VAMI, 1990,62-72 (in Russian)]

2. Коварская Е.З., Московенко И.Б. Использование частот собственных колебаний при неразрушающем контроле физико-механических свойств материалов и изделий. *В мире неразрушающего контроля*. 2012. № 4 (58). С. 5-8.

3. Гребенкин А.Ф., Московенко И.Б., Савинов В.И., Ломоносов Л.В., Кузнецов Г.П., Глаговский Б.А. Неразрушающие методы контроля для оценки качества крупногабаритных углеродных изделий. *Повышение эффективности и надежности работы алюминиевых электролизёров : Сб. Науч. тр. ВАМИ*, Л.: ВАМИ, 1988,26-31.

[Grebyonkin A. F., Moskovenko I.B., Savinov V.I., Lomonosov L.V., Kuznetsov G.P., Glagovskiy B.A. Nondestructive control methods for evaluation of quality of large-size carbon products. *Increase in efficiency and reliability of operation of aluminum electrolyzers: Collection of scientific papers VAMI*, Leningrad: VAMI, 1988,26-31 (in Russian)]

4. [Grebjonkin A. F., Krjukowskij W.A., Glagowskij B.A., Lyssanow W.S. und Moskowenko I.B. Zerstörungsfreie akustische Materialprüfung an Kohlenstoffanoden. Aluminium-66. Jahrgang.-1990, \(9\), 854-857](#)

5. Московенко И. Б., Коварская Е.З., Шадрина М.С. Неразрушающий контроль физико-механических свойств и качества углеграфитовых изделий (статья) / // журнал *Сибирского федерального университета «Техника и технологии»* т.11, №4, 2018, С. 443-452(*Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2018, 11(4), 443-452)

6. Boubaker M.B. et al. Non-Destructive Testing of Baked Anodes Based on Modal Analysis and Principal Component Analysis *Light Metals 2017, The Minerals, Metals & Materials Series*, DOI 10.1007/978-3-319-51541-0_154

7. ГОСТ Р 52710 – 2007 «Инструмент абразивный. Акустический метод определения твердости и звуковых индексов по скорости распространения акустических волн»