

**Неразрушающий акустический метод контроля
физико-механических свойств углеродных изделий,
используемых при производстве алюминия**

(Перевод статьи из журнала «Aluminium» - 66, 1990, №9 с. 854-857
(немецкий))

Гребенкин А.Ф., Крюковский В.А.,
ВАМИ, г. Ленинград

Глаговский Б.А., Лысанов В.С.,
Московенко И.Б.,

НПО ВНИИАШ, г. Ленинград

Как известно, углеродные изделия, используемые при производстве алюминия в качестве элементов как катодных, так и анодных устройств электролизеров должны обладать определённым комплексом физико-механических свойств, отвечающих требованиям, предъявляемым к подобным изделиям при их эксплуатации.

Для оценки физико-механических свойств углеродных изделий данного типа как в СССР, так и в других странах, изготавливающих и применяющих такие углеродные изделия, используется ряд характеристик, из которых наиболее распространёнными являются плотность кажущаяся и действительная, пористость, прочность на сжатие и изгиб, а также параметры, определяющие упругие свойства изделий, среди которых наиболее широкое распространение находит модуль нормальной упругости (модуль Юнга), который в настоящее время используется рядом фирм в качестве одной из основных характеристик, определяющих физико-механические свойства углеродных изделий.

Необходимо подчеркнуть, что одним из требований к подовой футеровке электролизеров является обеспечение низкого модуля упругости при высокой прочности на сжатие и

изгиб. Исходя из требований, предъявляемых к подовым блокам, ряд изготовителей углеродных изделий стремится иметь модуль упругости у подовых блоков не более 800 кгс/мм^2 ($7,84 \text{ ГПа}$) при достаточно высоких значениях прочности на сжатие $270\text{-}340 \text{ кгс/мм}^2$ ($26,5\text{-}83,3 \text{ МПа}$).

В последнее время для оценки физико-механических характеристик различного рода изделий все более широкое применение находят неразрушающие акустические методы контроля, обладающие рядом существенных преимуществ по сравнению с другими, используемыми в настоящее время, методами [1 - 10].

В результате наших исследований была установлена возможность использования для оценки физико-механических свойств углеродных изделий, применяемых в производстве алюминия, акустического метода, основанного на измерении частот собственных колебаний (ЧСК) изделий, подлежащих контролю. Были разработаны теоретические основы метода, позволяющие для углеродных изделий различных форм и размеров (подовые, боковые и анодные блоки, графитированные электроды, образцы для испытаний по действующей нормативно-технической документации и др.) разрабатывать методики и градуировочные таблицы, необходимые для проведения контроля с помощью выпускаемых в СССР измерителей ЧСК типа "Звук" или приборов аналогичного типа.

Ранее проведенные нами исследования [6 - 8] показали возможность и целесообразность использования для оценки физико-механических свойств различного рода изделий единого физического параметра, определяемого с помощью акустического метода. В качестве такого параметра может быть выбран параметр C_l , имеющий физический смысл скорости

распространения продольных упругих колебаний в бесконечно длинном стержне, изготовленном из того же материала, что и материал контролируемого изделия, и связанный с модулем нормальной упругости E и плотностью материала изделия ρ известным соотношением:

$$C_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Параметр C_l , в дальнейшем называемый скоростью распространения акустических волн или скоростью звука, связан с ЧСК изделий следующим соотношением:

$$f_i = F_i C_l,$$

где:

f_i - ЧСК изделия, соответствующая определенному виду колебаний (продольным, изгибным, плоским и т.д.);

F_i - коэффициент формы, определяемый размерами и формой контролируемого изделия, а также видом возбуждаемых в нем колебаний i .

Решение этого уравнения применительно к конкретным типоразмерам изделий позволяет, с одной стороны, производить расчет спектров их ЧСК и, с другой стороны, дает возможность получать инженерные формулы для решения задачи определения скорости звука C_l по измеренным значениям ЧСК.

Для решения подобных задач разрабатывается математическое обеспечение (алгоритмы и программы для ЭВМ), позволяющее на основе анализа спектра ЧСК изделия получать все необходимые для проведения измерений данные в виде, так называемых градуировочных таблиц.

Измерение ЧСК изделий может производиться с помощью специальных приборов - измерителей частот собственных

колебаний. Для этих целей в СССР разработан и широко используется в промышленности комплект приборов типа "Звук" различных модификаций, позволяющий производить измерение ЧСК изделий в диапазоне от 300 Гц до 500 кГц, что, в свою очередь, позволяет производить контроль изделий самых разнообразных форм и размеров, начиная с малогабаритных изделий размером 3 мм и менее и вплоть до самых больших изделий, выпускаемых электродной промышленностью, например, подовые блоки длиной 3800 мм.

Нашими исследованиями, а также исследованиями других авторов [7 - 10] убедительно показано, что в качестве меры физико-механических свойств различного рода изделий при проведении акустического контроля целесообразно принять параметр C_l , пронормированный в так называемых звуковых индексах (ЗИ). Указанная величина представляет собой двузначное целое число, равное среднему арифметическому значению параметра C_l в заданном диапазоне (C_{lmin} - C_{lmax}), выраженному в м/с и уменьшенному в 100 раз:

$$ЗИ = \frac{C_{lmax} + C_{lmin}}{2} \cdot 10^{-2}.$$

В таблице 1 приводятся значения параметра C_l , соответствующие звуковым индексам от 17 до 35, характеризующие физико-механические свойства основных видов углеродных изделий, используемых при производстве алюминия.

Таблица 1 - Соотношение между звуковыми индексами ЗИ и скоростью звука СІ

Звуковой индекс ЗИ	Диапазон значений СІ, м/с
17	от 1600 до 1800
19	свыше 1800 до 2000
21	свыше 2000 до 2200
23	свыше 2200 до 2400
25	свыше 2400 до 2600
27	свыше 2600 до 2800
29	свыше 2800 до 3000
31	свыше 3000 до 3200
33	свыше 3200 до 3400
35	свыше 3400 до 3600

Указанные ЗИ с достаточной степенью точности характеризуют физико-механические свойства углеродных изделий и могут быть использованы для подбора комплектов изделий со стабильными, заранее заданными свойствами.

При необходимости приведенная таблица может быть продлена как в сторону более высоких, так и в сторону более низких значений параметра СІ. Кроме того, при необходимости повышения точности контроля, диапазон, соответствующий одному звуковому индексу, может быть уменьшен до 100 м/с, что соответствует разрешающей способности современных измерителей ЧСК. При этом, соответственно будут внесены наряду с нечётными и четные значения ЗИ.

Следует отметить, что параметр СІ является высокоинформативным параметром и в ряде случаев позволяет достаточно полно судить о физико-механических свойствах, определяющих работоспособность изделий из различных материалов, начиная с полимерных и кончая твердыми и сверхтвердыми материалами [10], причем, для последних этот параметр позволяет получать более достоверную информацию

о такой важной характеристике подобных материалов как микротвердость, чем обычно используемый для оценки физико-механических свойств таких материалов модуль нормальной упругости E [8].

В таблице 2 приведены значения параметра Cl и $ЗИ$ для некоторых видов материалов, определенные акустическим методом с применением измерителей типа "Звук" или рассчитанные по известным значениям E и ρ . В этой же таблице для некоторых твердых и сверхтвёрдых материалов для сравнения приведены значения модуля упругости E и микротвердости H .

Таблица 2 - Физико-механические свойства некоторых материалов

Материал	Cl , м/с	$ЗИ$	E , ГПа•10,	H , ГПа •10 ⁻²
Алмаз	15700 - 15900	157 - 159	50,2 - 85,0	10000
Эльбор	12000 - 15600	125 -	62,0 - 95,0	9000
Карбид бора	10800	107 -	29,6	3700 - 4300
Термокорунд	9600-10200	97 - 101	35,5 - 41	2000 - 2400
Карбид вольфрама	6700	67	72,2	1730
Сталь	4900 - 5200	49 - 51	-	-
Алюминий	5100 - 5200	51	-	-
Чугун	3900 - 4300	39 - 43	-	-
Медь	3400 - 3850	35 - 39	-	-
Плавленый шпат	2140	21	-	-
Кальцит	1690	17	-	-
Графит	800 - 1100	9 - 11	-	-
Тефлон	430	5	-	-
Полиэтилен	390	3	-	-

Как следует из приведенной таблицы, с помощью скорости звука Cl могут оцениваться физико-механические свойства изделий из самых разнообразных материалов, причем для

твердых и сверхтвердых материалов с ростом их микротвердости значения Cl соответственно возрастают в отличие от обычного применяемого для оценки свойств подобных изделий модуля упругости E , для которого такая однозначная зависимость отсутствует.

Приведённые данные позволили предположить наличие аналогичных зависимостей между физико-механическими свойствами углеродных изделий и скоростью Cl . В результате выполненных нами исследований было установлено наличие тесной корреляционной связи скорости звука с кажущейся плотностью, прочностью и удельным электрическим сопротивлением, определяемыми по принятым в СССР методикам на специально вырезаемых из изделий цилиндрических образцах. Следует отметить, что аналогичные результаты получены и другими авторами при проведении исследований качества подовых и анодных блоков ультразвуковыми методами [3 - 5].

При проведении акустического контроля, в соответствии с заранее разработанными методиками, производят измерение с помощью измерителей ЧСК частоты собственных колебаний, указанного в методике вида, а затем по полученному значению частоты с помощью приводимых в методике градуировочных таблиц для конкретного типоразмера изделия определяют значения $ЗИ$.

Для изделий типа подовые блоки и обожженные аноды, для которых в настоящее время акустический метод находит наиболее широкое распространение, как правило, производится измерение частоты собственных продольных колебаний с помощью прибора «Звук 203» или ранее выпускавшейся его модификации «Звук 202». Общий вид прибора «Звук 203» приведен на рисунке 1. Действие прибора основано на

использовании метода свободных колебаний, возбуждаемых в изделии ударом. Возникающие в изделии колебания принимаются микрофоном и после усиления поступают на



Рисунок 1 – Прибор «Звук 203».

систему электрических фильтров, выделяющих из частотного спектра частоту, соответствующую выбранному виду колебаний, значение которой измеряется и высвечивается на цифровом табло прибора. В приборе «Звук 203» предусмотрено введение в устройство при измерении коэффициента формы, при этом на табло прибора будет получено непосредственно значение скорости звука C_I или $3I$. Прибор снабжён также специальным выходом для подачи сигналов для управления устройствами автоматического контроля и маркировки.

С помощью неразрушающего акустического метода контроля с применением приборов «Звук» нами было проведено

исследование физико-механических свойств подовых блоков, поставленных в СССР различными изготовителями для футеровки некоторых типов алюминиевых электролизеров. Результаты акустических испытаний приведены в таблице 3. Там же приведены значения модуля Юнга, рассчитанные по результатам контроля и усредненным значениям кажущейся плотности, ранее определенным на аналогичных блоках этих изготовителей.

Как следует из приведённых в таблице 3 данных, значения звуковых индексов блоков, поставленных различными изготовителями, лежат в интервале от ЗИ23 до ЗИ29, причем отличие физико-механических свойств подовых блоков, поставленных одним изготовителем, находится в пределах 2 - 3 звуковых индексов.

Несколько пониженные значения ЗИ блоков, поставленных изготовителем А (в основном ЗИ25), согласуются с отмеченной при эксплуатации в промышленных условиях пониженной механической прочностью этих блоков по сравнению с прочностью блоков, поставленных изготовителями В и С.

Акустическому контролю были также подвергнуты подовые блоки длиной 3800 мм, поставленные изготовителем Д, общим количеством 75 шт. В результате испытаний было установлено, что 16 блоков имели ЗИ25, 56 блоков - ЗИ27 и 3 блока - ЗИ29.

Таблица 3 - Результаты испытаний подовых блоков различных фирм-изготовителей

№ п/п	Фирма-изготовитель	Длина блока, мм	Частота собственных колебаний, кГц	Скорость звука СI, м/с	Звуковой индекс ЗИ	Усредненное значение кажущейся плотности ρ , г/см ³	Модуль Юнга $E=1,02 \cdot c^2 \cdot \rho \cdot 10^{-4}$, ГПа
1	А	1600	0,79	2530	25	1,55	1010 (9,9)
2			0,82	2620	27		1090 (10,7)
3			0,76	2430	25		935 (9,2)
4			0,80	2560	25		1040 (10,2)
5			0,77	2460	25		960 (9,4)
6			0,76	2430	25		935 (9,2)
7			0,72	2300	23		840 (8,2)
8			0,77	2460	25		960 (9,4)
9			0,79	2530	25		1010 (9,9)
10			0,82	2620	27		1090 (10,7)
11			0,80	2560	25		1040 (10,2)
12			0,82	2620	27		1090 (10,7)
13			0,85	2720	27		1170 (11,5)
14			0,77	2460	25		960 (9,4)
15			0,77	2460	25		960 (9,4)
16			0,79	2530	25		1010 (9,9)
1	В	1600	0,82	2620	27	1,57	1100 (10,8)
2		1600	0,79	2530	25		1025 (10,1)
3		1600	0,84	2690	27		1160 (11,4)
4		1600	0,82	2620	27		1100 (10,8)
5		1600	0,89	2850	29		1300
6		1600	0,92	2940	29		
7		1600	0,90	2880	29		
8		1600	0,90	2880	29		
9		1600	0,87	2780	27		

10		2200	0,62	2730	27		(12,7)
11		2200	0,59	2600	25		1385
							(13,6)
							1330
							(13,0)
							1330
							(13,0)
							1240
							(12,2)
							1195
							(11,7)
							1080
							(10,6)
1	С	2200	0,62	2730	27	1,55	1130
2			0,59	2600	25		(11,6)
3			0,59	2600	25		1070
4			0,60	2640	27		(10,5)
							1070
							(10,5)
							1100
							(10,8)

Кроме того, были проведены испытания обожженных анодных блоков, изготавливаемых в условиях Саянского алюминиевого завода. В результате испытаний было установлено, что значения звуковых индексов подобных блоков лежат, в основном, в пределах ЗИ19 – ЗИ25.

С целью определения возможности применения акустического метода для технологического контроля при производстве обожженных анодов были проведены испытания необожженных («зеленых») анодов, изготавливаемых на Саянском алюминиевом заводе по технологии фирмы КХД. Испытания проводились с участием специалистов фирмы как на специально изготовленных анодных блоках с различными значениями плотности, так и на блоках, отобранных из пуско-наладочного брака. Акустический контроль проводился с применением прибора «Звук 203». Плотность анодных блоков ρ определялась методом

гидростатического взвешивания по методике фирмы КХД. Значения модуля Юнга E рассчитывались по результатам определения скорости звука C_l и плотности ρ . С целью исключения влияния на результаты испытаний остаточных процессов, происходивших в блоках по мере их остывания, измерения проводились не ранее, чем через 24 часа после их изготовления.

Полученные результаты представлены на рисунках 2 и 3. Как следует из представленных данных существует надёжная связь между скоростью звука C_l , плотностью и модулем Юнга «зеленых» анодных блоков.

Дополнительно проводился акустический контроль «зеленых» анодных блоков из различных технологических партий, находящихся на складе «зеленых» анодов. Значения звуковых индексов ЗИ «зеленых» анодов лежат в пределах ЗИ27-29.

Проведенные испытания показали, что акустический метод контроля с использованием приборов "Звук" может быть успешно применён для получения оперативной информации о физико-механических свойствах не только обожженных, но и «зелёных» углеродных изделий, что может быть использовано для контроля за соблюдением и стабильностью технологического процесса их производства.

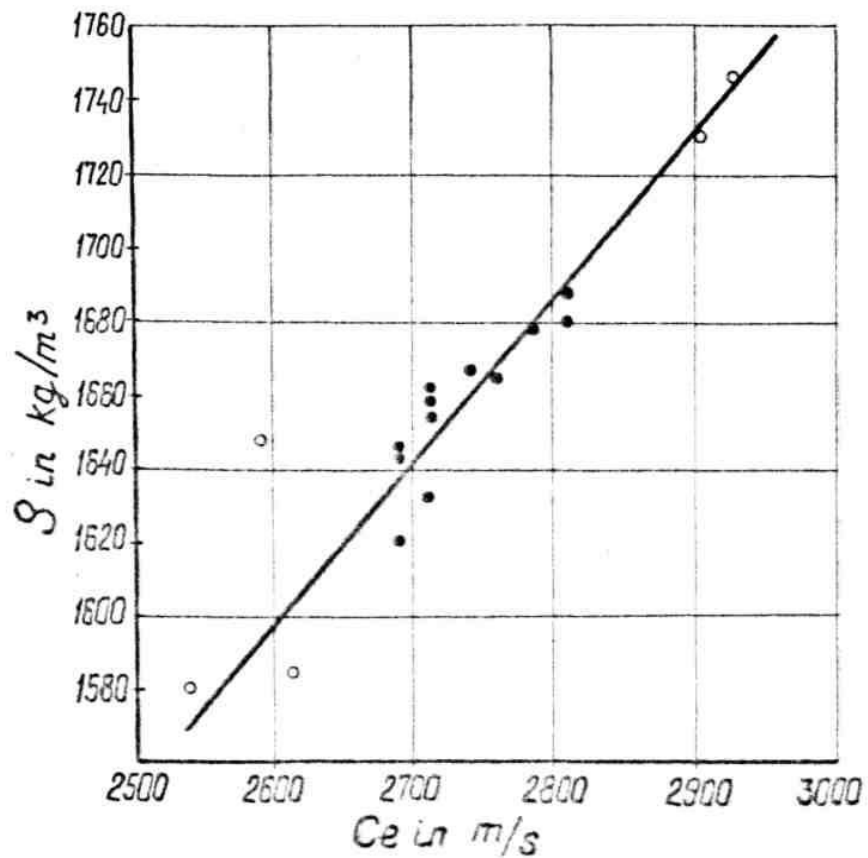


Рисунок 2 - Зависимость между плотностью ρ «зеленых» анодов и скоростью звука C :

- - изготовлены специально,
- - отобраны из пуско-наладочного брака

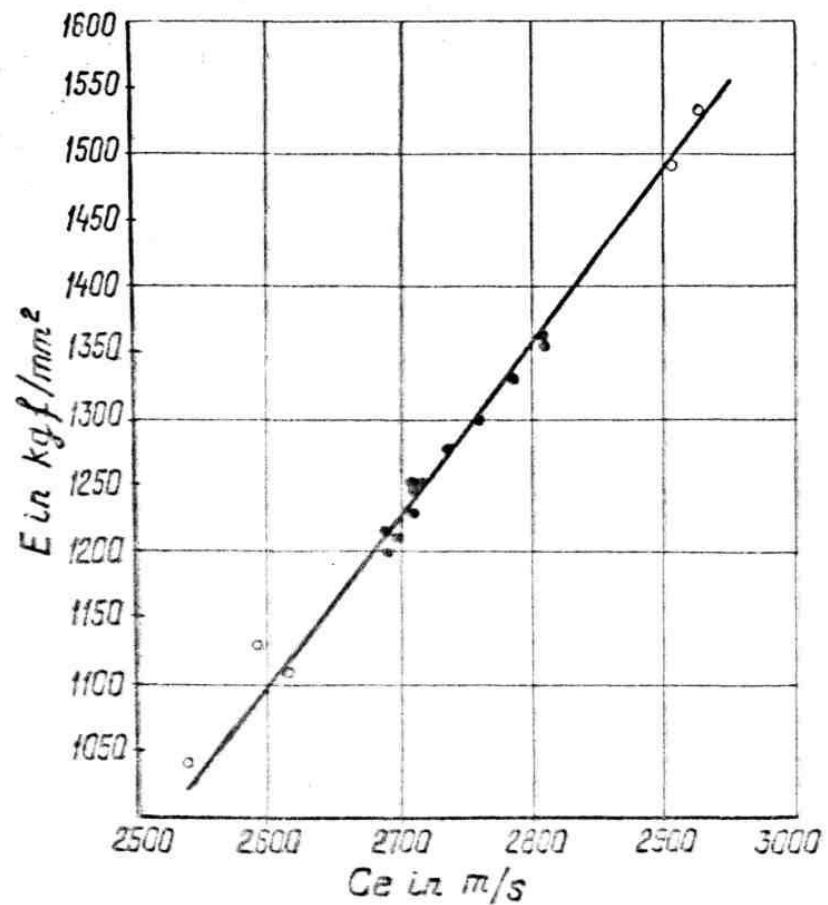


Рисунок 3 - Зависимость между модулем Юнга E «зеленых» анодов и скоростью звука C :

- - изготовлены специально,
- - отобраны из пуско-наладочного брака

Литература

1. Неразрушающие испытания: Справочник (Под ред. Р.Мак-Мастера.- М.-Л. Энергия 1965).
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник (Под ред. В. В. Ключева) - М.: Машиностроение, 1986.
3. T. Weng, "Quality Evaluation of Carbonaceous Materials by Ultrasonic Techniques", Light Metals 1981, AIME, pp.517-528.
4. T. Weng and V.M.Vera. "Effect of Butt Particle Size and Butt Fraction on Prebake Anode Properties", Light Metals 1984, AIME, pp.1005-1013.
5. T.Weng, "Quality Inspection Procedures for Prebake Cathode Blocks", Light Metals, 1985, AIME, pp.975-989.
6. Глаговский Б.А., Московенко И.Б. Низкочастотные акустические методы контроля в машиностроении -Л.: Машиностроение, 1977.
7. Blankenburg S., Mockel R., Clausnitzer M., Glagowskij B.A., Moskowenko I.B. Akustische Harteproofung zur Schleifkorperauswahl //Werkstatt und Betrieb.- 118 (5). s. 398-400.
8. Глаговский, Б.А., Московенко И.Б. Звуковой индекс - критерий оценки характеристик абразивных инструментов. - Труды Международной конференции по шлифованию; материалам и процессам "Интергринд 88", Будапешт, 15-17 ноября 1988 г.
9. Voronko J. Abraziv szerszamok akusztikai vizsgalata. Epitoanyag - XXVII, evfolyam. - 1985. - 6 szam. pp. 178-184.
10. Forrai T. Kemenysegvizsgalat akusztikai modszerral. Gepgyartash-technologia. XXУШ п. 10,1988-p.459-462.

Авторы:

Анатолии Филиппович Гребенкин (1941) учился в Ташкентском Политехническом институте с окончанием в 1963 году как инженер. Кандидат технических наук. На сегодняшний день является научным сотрудником Всесоюзного научно-исследовательского и проектного института алюминиевой, магниевой и электродной промышленности (ВАМИ), Ленинград (СССР).

Василий Андреевич Крюковский (1942) учился в Красноярском институте цветных металлов с окончанием в 1967 году как инженер – металлург. Кандидат технических наук. На сегодняшний день является заместителем директора Всесоюзного научно-исследовательского и проектного института алюминиевой, магниевой и электродной промышленности (ВАМИ), Ленинград (СССР).

Борис Аронович Глаговский (1926) учился в Ленинградском институте точной механики и оптики с окончанием в 1950 году как инженер и электромеханик. Профессор и доктор технических наук. На сегодняшний день является заведующим отделом "Контрольно-измерительная техника и процессы автоматизации" Всесоюзного научно-исследовательского института абразивов и шлифования (НПО ВНИИАШ) , Ленинград (СССР) .

Владислав Сергеевич Лысанов (1935) учился в ленинградском Технологическом институте с окончанием в 1958 году как химик-технолог. Доктор технических наук. На сегодняшний день является генеральным директором и заведующим отделом "Шлифовальных, сверхтвердых и керамических материалов" Всесоюзного научно-исследовательского института абразивов и шлифования (НПО ВНИИАШ) , Ленинград (СССР) .

Игорь Борисович Московенко (1939) учился в Ленинградском Электротехническом институте с окончанием в 1962 году как инженер и электрофизик. Кандидат технических наук. На сегодняшний день является заведующим лаборатории "Контрольно-измерительные приборы" Всесоюзного научно-исследовательского института абразивов и шлифования (НПО ВНИИАШ) , Ленинград (СССР) .