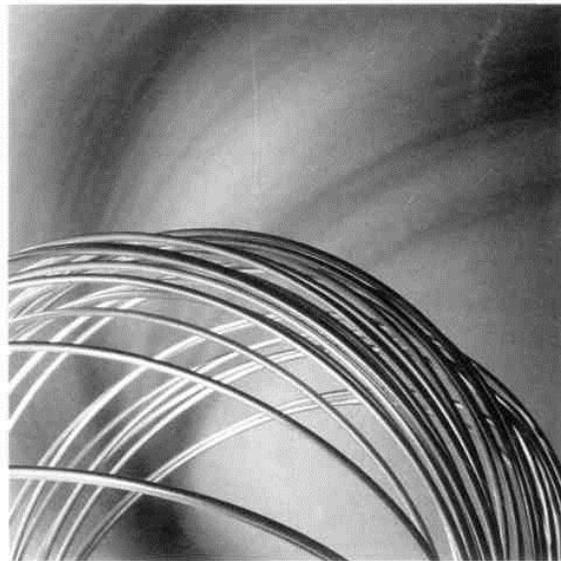


ALUMINIUM

Interview:
Robert Ehrlich,
Austria Metall AG



Forschung:
Aluminium-air
fuel cells in
a road vehicle

Technik:
Stranggepreßte
Bauteile mit
hochwertiger
Oberfläche

66. Jahrgang **9** September 1990

Internationales Magazin für Industrie, Forschung und Praxis

Zerstörungsfreie akustische Materialprüfung an Kohlenstoffanoden

A. F. Grebjonkin, W. A. Krjukowskij, B. A. Glagowskij, W. S. Lyssanow und I. B. Moskowenko, Leningrad

Die Qualität der bei elektrolytischem Verfahren der Herstellung des Aluminiums verwendeten kohlenstoffhaltigen Erzeugnisse besitzt wesentlichen Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit des Elektrolyseprozesses (Stromverbrauch, Metallqualität, Selbstkosten des hergestellten Metalls, Anodenverbrauch usw.) Im vorliegenden Bericht sind die Prüfergebnisse der mechanischen Eigenschaften der Bodenkohlen und der Anoden für die Aluminiumelektrolyseöfen nach einem zerstörungsfreien akustischen Verfahren angegeben, das für die vollständige (100%) schnelle Qualitätskontrolle der kohlenstoffhaltigen Erzeugnisse verschiedener Typengrößen effektiv verwendet werden kann.

Die zur Schmelzflußelektrolyse eingesetzten kohlenstoffhaltigen Erzeugnisse sollen einen bestimmten Bereich physikalisch-mechanischer Eigenschaften aufweisen, die den Anforderungen ihres Betriebes entsprechen. Für die Beurteilung wird eine Reihe von Kenndaten verwendet, von denen die verbreitetsten Rohdichte, Dichte, Porosität, Druck- und Biegefestigkeit sind sowie der Elastizitätsmodul als eine der charakteristischen mechanischen Eigenschaften.

Eine der Anforderungen an die Bodenauskleidung der Öfen ist die Sicherung des niedrigen Elastizitätsmoduls bei hoher Druck- und Biegefestigkeit. Ausgehend von den Anforderungen an die Bodenkohlen strebt eine Reihe von Herstellern an, den Elastizitätsmodul nicht über 7,8 GPa bei genügend hohen Werten der Druckfestigkeit (26,5 bis 33,5 MPa) einzustellen. Zur Überprüfung finden die zerstörungsfreien akustischen Kontrollmethoden, die über eine Reihe von wesentlichen Vorteilen im Vergleich zu anderen verwendeten Verfahren^{1) bis 10)} verfügen, in letzter Zeit immer breitere Anwendung.

Maßprinzip

Das Verfahren basiert auf der Messung der Eigenfrequenz der Prüflinge. Theoretische Grundlagenuntersuchungen ermöglichten die Erstellung von Methoden und Eich tabellen sowie die Konstruktion von Eigenfrequenzmeßgeräten der Baureihe »Swuk« oder ähnlicher Geräte. Für kohlenstoffhaltige Erzeugnisse verschiedener Gestalt und Abmessungen (Boden-, Seiten- und Anodenelektroden, graphitierte Elektroden, Prüfmuster nach geltender normativ-technischer Dokumentation u. a.). In früheren Untersuchungen^{6) bis 8)} wurde ein einheitlicher physikalischer Parameter C_e festgelegt. Diese Meßgröße ist gleichbedeutend mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Längsschwingungen in einem endlos langen, aus demselben Werkstoff wie das zu prüfende Erzeugnis, angefertigter Stab und ist mit dem normalen Elastizitätsmodul E und der Werkstoffdichte des Erzeugnisses ρ durch die bekannte Beziehung

$$C_e = \sqrt{E/\rho}$$

verknüpft.

Der Parameter C_e , hinfort als Ausbreitungsgeschwindigkeit der akustischen Wellen oder Schallgeschwindigkeit bezeichnet, ist mit der Frequenz der Eigenschwingungen (FES) der Erzeugnisse durch folgendes Verhältnis verbunden

$$\bar{f}_i = F_i \cdot C_e$$

\bar{f}_i FES des Erzeugnisses, entspricht einer bestimmten Schwingungsart (Längs-, Biege-, Flachschrägungen usw.),

F_i Formkoeffizient, der durch Abmessungen der Gestalt des zu prüfenden Erzeugnisses sowie durch die darin erregende Schwingungsart i ermittelt wird.

Einerseits ermöglicht die Lösung dieser Beziehung bezüglich der konkreten Typengrößen der Erzeugnisse die Berechnung der FES-Spektren, andererseits bietet sich die Möglichkeit, die Schallgeschwindigkeit C_e nach gemessenen FES anhand von empirischen Beziehungen zu bestimmen.

Meßgeräte

Für die Lösung derartiger Aufgaben wurde eine geeignete Software entwickelt. Die Messung kann mit Hilfe von FES-Sondermeßgeräten vorgenommen werden. In der UdSSR ist der Gerätesatz der Baureihe »Swuk« in verschiedener Modifikation entwickelt worden und weitgehend in der Industrie eingesetzt. Dieser Gerätesatz verwirklicht die FES-Messungen im Bereich von 300 Hz bis 500 Hz, wodurch sich einerseits die Möglichkeit ergibt, die Kontrolle der Erzeugnisse verschiedenartiger Gestalt und Abmessungen – von den kleinen Erzeugnissen mit Abmessungen von 3 mm und noch kleineren bis zu den größten von der Elektroindustrie hergestellten Erzeugnissen, wie zum Beispiel Bodenelektroden mit einer Länge von 3800 mm – durchzuführen.

Bei der Durchführung der akustischen Kontrolle wäre es zweckmäßig, als Maß der physikalisch-mechanischen Eigenschaften verschiedenartiger Erzeugnisse den in Form der sogenannten Schallindizes (SI)^{7) bis 10)} genormten Parameter C_e

Tafel 1: Relation zwischen den Schallindizes SI und der Schallgeschwindigkeit C_e

Table 1: Relation between sound index SI and the speed of sound C_e

Schallindex SI	Wertebereich C_e in m/s	Schallindex SI	Wertebereich C_e in m/s
17	von 1600 bis 1800	27	über 2600 bis 2800
19	über 1800 bis 2000	29	über 2800 bis 3000
21	über 2000 bis 2200	31	über 3000 bis 3200
23	über 2200 bis 2400	33	über 3200 bis 3400
25	über 2400 bis 2600	35	über 3400 bis 3600

Tafel 2: Physikalisch-mechanische Eigenschaften einiger Werkstoffe
Table 2: Physical and mechanical properties of various materials

Werkstoff	Ce in m/s	SI	E in GPa · 10	HV in GPa · 10 ⁻²
Diamant	15700 bis 15900	157 bis 159	50,2 bis 85,0	10000
Elbor	12000 bis 15600	125 bis 157	62,0 bis 95,0	9000
Borkarbid	10800	107 bis 109	29,6	3700 bis 4300
Thermokorund	9600 bis 10200	97 bis 101	35,5 bis 41,0	2000 bis 2400
Wolframkarbid	6700	67	72,2	1730
Stahl	4900 bis 5200	49 bis 51	-	-
Aluminium	5100 bis 5200	51	-	-
Gußeisen	3900 bis 4300	39 bis 43	-	-
Kupfer	3400 bis 3850	35 bis 39	-	-
Flußspat	2140	21	-	-
Kalzit	1690	17	-	-
Graphit	800 bis 1100	9 bis 11	-	-
Teflon	430	5	-	-
Polyäthylen	390	3	-	-

anzunehmen. Die angegebene Größe stellt eine zweideutige ganze Zahl dar, die dem arithmetischen Mittel des Parameters Ce im Bereich (Ce_{min} - Ce_{max}) entspricht:

$$SI = \frac{Ce_{min} + Ce_{max}}{2} \cdot 10^{-2}$$

In Tafel 1 sind die den Schallindizes von 17 bis 35 entsprechenden Werte angegeben, die die physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Hauptarten der kohlenstoffhaltigen Erzeugnisse bei der Herstellung des Aluminiums kennzeichnen.

Die angegebenen SI-Werte charakterisieren mit genügendem Genauigkeitsgrad die physikalisch-mechanischen Eigenschaften der kohlenstoffhaltigen Erzeugnisse und können für die Auswahl verwendet werden.

Ergebnisse

In Tafel 2 sind die Werte Ce und SI für einige Werkstoffarten angegeben, die durch das akustische Verfahren unter Anwendung der FES-Messer der Baureihe »Swuk« ermittelt oder nach gewonnenen Werten E und ρ berechnet sind. Außerdem sind da die Werte des Elastizitätsmoduls E und der Mikrohärte HV für einige Hart- und Superhartwerkstoffe angegeben.

Somit können die Eigenschaften der Erzeugnisse aus verschiedenartigsten Werkstoffen durch die Schallgeschwindigkeit Ce beurteilt werden, wobei sich die Werte Ce für Hart- und Superhartwerkstoffe mit wachsender Mikrohärte entsprechend vergrößern. Im Unterschied dazu fehlt bei der Beurteilung durch den Elastizitätsmodul E eine solche eindeutige Abhängigkeit.

Die angegebenen Daten legen es nahe, eine analoge Abhängigkeit zwischen den physikalisch-mechanischen Eigenschaften der kohlenstoffhaltigen Erzeugnisse und der Schallgeschwindigkeit Ce anzunehmen. Tatsächlich wurde in Untersuchungen das Vorhandensein einer engen Relation zwischen der Schallgeschwindigkeit und der Rohdichte, der Festigkeit sowie dem spezifischen elektrischen Widerstand an zylindrischen Probestücken festgestellt. Es ist zu unterstreichen, daß ähnliche Resultate bei Qualitätsuntersuchungen von Bodenkohlen und Anoden durch die Ultraschallverfahren^{3) bis 5)} auch von anderen Autoren festgestellt wurden.

Für Bodenkohlen und vorgebrannte Anoden, für welche das akustische Verfahren zur Zeit die breiteste Anwendung findet, wird die Frequenzmessung der Eigenlängsschwingungen in der Regel mit Hilfe des Geräts »Swuk 203« (Bild 1) oder seiner früher hergestellten Modifikation »Swuk 202« durchgeführt. Die Funktion des Geräts beruht auf der Messung freier Schwingungen, die in einem Erzeugnis durch einen Schlag erregt werden. Die entstehenden Schwingungen werden von einem Mikrophon aufgenommen und verarbeitet.

Unter Verwendung dieser Geräte wurden die von verschiedenen Herstellern gelieferten Auskleidungen (Bodenkohlen) untersucht. Die Ergebnisse sind in Tafel 3 angegeben. Die Werte der Schallindizes im Bereich von SI23 bis SI29, wobei der Unterschied der von einem Hersteller gelieferten Bodenkohlen im Bereich von 2 bis 3 Schallindizes liegt. Die etwas verminderten SI-Werte der vom Hersteller A (vorwiegend SI25) gelieferten Elektroden stimmen mit der bei Betrieb unter Praxisbedingungen festgestellten verminderten mechanischen Festigkeit dieser Elektroden im Vergleich zur Festigkeit der von Herstellern B und C gelieferten Elektroden überein.

Der akustischen Kontrolle wurden auch die 75 vom Hersteller D gelieferten Bodenkohlen mit Länge 3800 mm unterworfen. Es wurde festgestellt, daß 16 Elektroden SI25, 56 Elektroden SI27 und 3 Elektroden SI29 aufweisen. Außerdem wurden die in der Aluminiumfabrik in Sajanogorsk hergestellten vorgebrannten Anoden geprüft. Die Werte von



Bild 1: Meßgerät »Swuk 203«

Fig. 1: »Swuk 203« test unit

Tafel 3: Prüfergebnis der Bodenkohlen verschiedener Herstellerfirmen

Table 3: Test results on the hearth blocks produced by various manufacturers

Herstellerfirma	Elektrodenlänge, in mm	Frequenz der Eigenschwingungen in kHz	Ce in m/s	SI	Durchschnittswert der Rohdichte, ρ in g/cm ³	E-Modulwert der Rohdichte, $E = 1,02 \cdot c^2 \cdot \rho \cdot 10^{-4}$ in GPa
1	A	0,79	2530	25	1,55	9,9
2		0,82	2620	27		10,7
3		0,76	2430	25		9,2
4		0,80	2560	25		10,2
5		0,77	2460	25		9,4
6		0,76	2430	25		9,2
7		0,72	2300	23		8,2
8		0,77	2460	25		9,4
9		0,79	2530	25		9,9
10		0,82	2620	27		10,7
11		0,80	2560	25		10,2
12		0,82	2620	27		10,7
13		0,85	2720	27		11,5
14		0,77	2460	25		9,4
15		0,77	2460	25		9,4
16		0,79	2530	25		9,9
1	B	0,82	2620	27	1,57	10,8
2		0,79	2530	25		10,1
3		0,84	2690	27		11,4
4		0,82	2620	27		10,8
5		0,89	2850	29		12,7
6		0,92	2940	29		13,6
7		0,90	2880	29		13,0
8		0,90	2880	29		13,0
9		0,87	2780	27		12,2
10		0,62	2730	27		11,7
11		0,59	2600	25		10,6
1	C	0,62	2730	27	1,55	11,6
2		0,59	2600	25		10,5
3		0,59	2600	25		10,5
4		0,60	2640	27		10,8

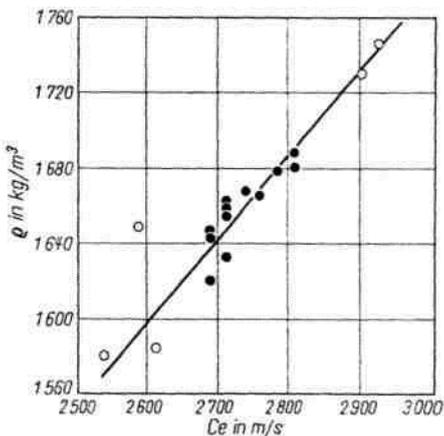


Bild 2: Relation zwischen der Dichte ρ der »grünen« Anoden und der Schallgeschwindigkeit Ce; • extra hergestellt, o bei Inbetriebsetzung und Einrichten ausgesonderter Fehlstücke

Fig. 2: Relation between density of "green" anodes and the speed of sound CE; • specially manufactured, o defects distinguished during start-up and adjustment

Schallindizes der Bodenkohlen liegen vorwiegend im Bereich von SI19 bis SI25.

Anwendungsmöglichkeiten

Um die Anwendung von akustischen Verfahren für die technologische Kontrolle bei Herstellung vorgebrannter Anoden zu ermitteln, wurden Prüfungen an in der Aluminiumfabrik Sajanogorsk nach der Technologie der Firma KHD hergestellten ungebrannten (»grünen«) Anoden durchgeführt. Diese Prüfungen wurden unter Teilnahme von Spezialisten der Firma sowohl auf extra hergestellten Anoden mit verschiedenen Werten der Dichte als auch an ausgesonderten Fehlstücken durchgeführt. Die Anodendichte ρ wurde durch das Verfahren der hydrostatischen Wägung (Prüfmethode der Firma KHD) ermittelt. Die Werte des E-Moduls wurden nach der Schallgeschwindigkeit Ce und der Dichte ρ berechnet. Um den Einfluß der in den Elektroden bei deren Abkühlung vor sich gehenden Prozesse auf die Prüfergebnisse aus-

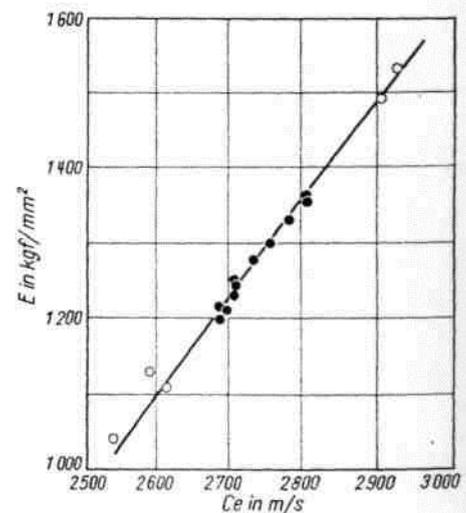


Bild 3: Relation zwischen dem E-Modul E der »grünen« Anoden und der Schallgeschwindigkeit Ce; • extra hergestellt, o bei Inbetriebsetzung und Einrichten ausgesonderter Fehlstücke

Fig. 3: Relation between E-modulus E of "green" anodes and the speed of sound CE; • specially manufactured, o defects distinguished during start-up and adjustment

zuschließen, wurden die Messungen frühestens 24 Stunden nach der Herstellung durchgeführt. Wie es sich auf Daten der Tafel 3 und den Bildern 2 und 3 erkennen läßt, besteht eine zuverlässige Verbindung zwischen Ce, und dem E-Modul der »grünen« Anoden.

Zusätzlich wurde eine akustische Prüfung an den auf Lager befindlichen »grünen« Anoden durchgeführt. Die SI-Werte liegen im Bereich von SI27 bis SI29. Die Prüfungen zeigen, daß das Verfahren auch für die Ermittlung einer operativen Information an »grünen« kohlenstoffhaltigen Erzeugnissen erfolgreich angewendet werden kann. Es ist mithin auch für die Kontrolle des technologischen Prozesses der Herstellung einzusetzen.

Schrifttum / References

- ¹⁾ Anon.: Zerstörungsfreie Prüfungen, Handbuch; Herausgegeben von P. Mak-Master, Verlag Energija, 1965
²⁾ Anon.: Geräte für die zerstörungsfreie Kontrolle der Werkstoffe und Erzeugnisse, Hand-

buch; Herausgegeben von W.W. Kljuev; Verlag Maschinostroenie, 1986

³⁾ Weng, T.: Quality Evaluation of Carbonaceous Materials by Ultrasonic Techniques. Light Metals (AIME) (1981) S. 517/528

⁴⁾ Weng, T.; Vera, V.: Effect of Butt Particle Size and Butt Fraction on Prebake Anode Properties. Light Metals (AIME) (1981) S. 1005/1013

⁵⁾ Weng, T.: Quality Inspection Procedures for Prebake Cathode Blocks. Light Metals (AIME) (1985) S. 975/989

⁶⁾ Glagowskij, B.A.; Moskowenko, I.B.: Akustische Niederfrequenzverfahren im Maschinenbau, Maschinostroenie, 1977

⁷⁾ Blankenburg, S.; Möckel, R.; Clausnitzer, M.; Glagowskij, B.A.; Moskowenko, I.B.: Akustische Härteprüfung zur Schleifkörperauswahl. Werkstatt und Betrieb 118 (1979) S. 398/400

⁸⁾ Glagowskij, B.A.; Moskowenko, I.B.: Schallindex-Kriterium der Beurteilung von Kenndaten der Schleifwerkzeuge. Vortragsband der internationalen Konferenz zu Schleifen, Werkstoffe und Prozesse »Intergrind 88«, Budapest, 15. bis 17. November 1988

⁹⁾ Voronko, J.: Abraziv szerszámok akusztikai vizsgálat. Épitőanyag - XXVII. évfolyam. (1985) 6 szám. S. 178/184

¹⁰⁾ Forrai, T.: Keménységvizsgálat akusztikai módszerrel. Gépgyártástechnológia. XXVIII N 10 (1988) S. 459/462

Autoren / Authors

Anatolij Filippowitsch Grebjonkin (1941) studierte am Taschkent Polytechnischen Institut mit dem Abschluß 1963 als Ingenieur. Er ist Kandidat der technischen Wissenschaften. Heute ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Allunions-wissenschaftlichen Forschungs-

und Projektinstitut für die Aluminium-, Magnesium- und Elektrodenindustrie, Leningrad (UdSSR) tätig.

Wassilij Andrejewitsch Krjukowskij (1942) studierte am Krasnojarsk Institut für Buntmetalle mit dem Abschluß 1967 als metallurgischer Ingenieur. Er ist Kandidat der technischen Wissenschaften. Tätig ist er heute als stellvertretender Direktor »elektrolytische Aluminiumproduktion« am Allunions-wissenschaftlichen Forschungs- und Projektinstitut für die Aluminium-, Magnesium- und Elektrodenindustrie, Leningrad (UdSSR).

Dr. Boris Aronowitsch Glagowskij (1926) studierte am Leningrad Institut für Feinmechanik und Optik mit dem Abschluß 1950 als Ingenieur und Elektromechaniker. Er ist Professor und Doktor der technischen Wissenschaften. Beschäftigt ist er heute als Abteilungsleiter »Kontrollmeßtechnik und Prozeßautomatisierung« am Allunions-wissenschaftlichen Forschungsinstitut für Schleifen und Schleifmittel, Leningrad (UdSSR).

Dr. Wladislaw Sergejewitsch Lyssanow (1935) studierte am Leningrad Institut für Technologie mit dem Abschluß 1958 als Chemietechnologe. Er ist Doktor der technischen Wissenschaften. Heute ist er beschäftigt als Generaldirektor »Schleif-, Superharz und Keramikmaterialien« beim Allunions-wissenschaftlichen Forschungsinstitut für Schleifen und Schleifmittel, Leningrad (UdSSR).

Igor Borissowitsch Moskowenko (1939) studierte am Leningrad Institut für Elektrotechnik mit dem Abschluß 1962 als Ingenieur und Elektrophysiker. Er ist Kandidat der technischen Wissenschaften. Heute ist er als Laborleiter »Kontrollmeßgeräte« tätig am Allunions-wissenschaftlichen Forschungsinstitut für Schleifen und Schleifmittel, Leningrad (UdSSR).

Nondestructive acoustic testing of carbon anodes

The quality of carbon products used in the electrolytic refining of aluminium considerably affects the technical and economic characteristics of electrolysis, such as power consumption, the grade and cost of the metal, the service life of the cells, and anode consumption, among others. As the power of electrolyzer units increases, it becomes progressively less satisfactory to carry out destructive tests for selective quality control of the carbon products. This

paper presents the results of tests carried out to determine the physical and mechanical properties of hearth blocks and anode blocks for aluminium electrolyzers using a nondestructive acoustic method, which can be adapted quite effectively for 100% express quality control of carbon products in various standard sizes.

The theoretical basis of the method is first explained. This involves mea-

suring the natural oscillation frequencies of the products. Zvuk-type acoustic devices developed for the purpose and produced in the USSR are described. The paper also presents results obtained by applying the method to hearth and anode blocks, including green ones, from different manufacturers using a comprehensive indication proposed by the authors - a sound index related to such important characteristics of carbon products as density and E-modulus.

The possibility is considered of integrating the acoustic quality control into an automatic carbon block production line.