

Zu fraktographischen Besonderheiten von Bruchflächen und der Bruchzähigkeit bei Ermüdungsexperimenten

Ivanova V. S., Botvina L. R., Maslov L. I.
A. A. Baikov Institut für Metallurgie. Moskau SSR

Abstract. New method of the calculating the Fracture toughness under cyclic loading is suggested with using fractographic data

In den letzten Jahren ist in einer Reihe von Arbeiten /1-5/ der Versuch gemacht worden, quantitative Zusammenhänge zwischen fraktographischen Parametern von Bruchflächen und der Bruchzähigkeit zu finden.

In der vorliegenden Arbeit wird die Beziehung zwischen der Bruchzähigkeit und fraktographischen Charakteristika von Ermüdungsbruchflächen untersucht. Es wurden Bruchflächen zylindrischer Proben aus Stahl 20 und Cr18Ni10Ti lichtmikroskopisch und elektronenmikroskopisch (mit dem Gerät Tesla W-2/2) nach Erprobung der Proben unter Bedingungen reiner Biegung mit Drehung bei Belastungsfrequenzen von 3000 Zyklen/Minute untersucht, wobei bei der elektronenmikroskopischen Methode mit einem zweistufigen Kohleabdruckverfahren gearbeitet wurde. Auf den Bruchflächen konnten in Abhängigkeit von den Spannungsamplituden drei charakteristische Makrozonen festgestellt werden: Zone l_g -Zone eines reinen Ermüdungsbruches, die durch die Anwesenheit von Ermüdungsbändern charakterisiert ist (Makrobänder, die visuell, und Mikrobänder, die elektronenmikroskopisch beobachtbar sind); Zone l_d -eine Übergangszone, die durch Anzeichen eines gemischten Bruches gekennzeichnet ist (hier wird ein "grübchenförmiger" Bruch beobachtet, aber in einigen Gebieten sind noch Ermüdungsbänder sichtbar) und schliesslich l_p -die Spaltzone (Abb.I).

Das Auftreten von Ermüdungsbändern ist ein Anzeichen für einen ebenen Deformationszustand /6/, das heisst, bei der Rissbewegung in l_g sind in den Volumengebieten von der Risspitze Bedingungen eines ebenen Deformationszustandes realisiert. Beim Übergang zur Zone l_d werden die Ermü-

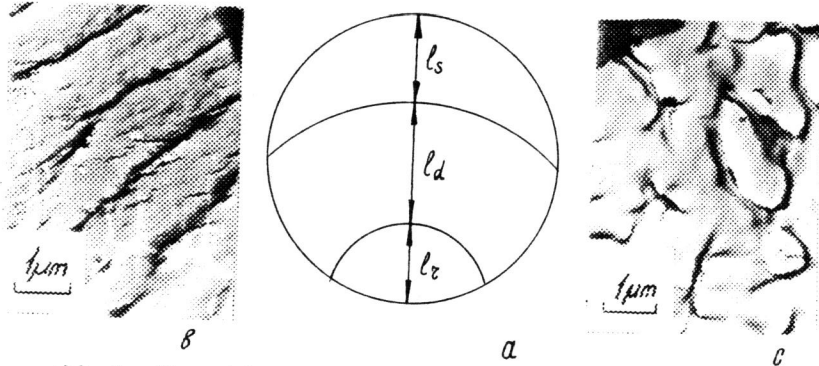


Abb. I. Charakteristische Zonen auf der Ermüdungsbruchfläche (a); und elektronenmikroskopische Abbildung von der Zone l_s (b) und l_d (c)

dungsbänder durch "Grübchen" abgelöst, deren Anwesenheit den Übergang zu einem Bruch unter Bedingungen eines gemischten Spannungszustandes charakterisiert. Die Untersuchung des Einflusses der Spannungsamplitude auf die Breite der beobachteten Zonen zeigt, dass mit Vergrößerung der Amplitude sich die Zone l_r verringert und bei Spannungswerten σ nahe $\sigma_k/6$ gleich l_d wird [7]. Die Grösse der Zone l_s wird durch Änderungen der Spannungsamplitude praktisch nicht beeinflusst (Tab. I).

Tabelle I.

Werte von fraktographischen Parametern von Ermüdungsbruchflächen und berechnete Werte der Bruchzähigkeit

Material	Belastungsamplitude	l_f	l_s	K_{Ic}^f	K_{Ic}^s	K_{Ic}^x	K_{Ic}^{xx}	Δ_{Ic}
Stahl	32,5	5,0	-	-	-	-	-	-
20	28	5,3	2,3	II5	75	75	-	-
	27	5,6	2,5	II3	75	-	-	-
	26	5,8	2,5	II0	73	-	I05	I,2
	25	6,0	2,4	I08	69	-	-	-
	24	6,0	2,6	I04	69	-	-	-

Nicht	50	4,8	-			
rostender	44	5,6	2,25	I84	II7	93,0
Stahl	43	5,7	2,4	I82	II8	
	42	5,9	2,45	I80	II6	I8I I,5
18-8	40	6,0	2,5	I74	II3	

x) bestimmt aus den fraktographischen Daten nach Formel (4)

xx) nach Werten der statischen Prüfung.

Die ermittelte schwache Abhängigkeit von l_s von der Spannungsamplitude wurde auch bei sechs anderen Stahlsorten mittlerer Festigkeit bestätigt (Abb. 2).

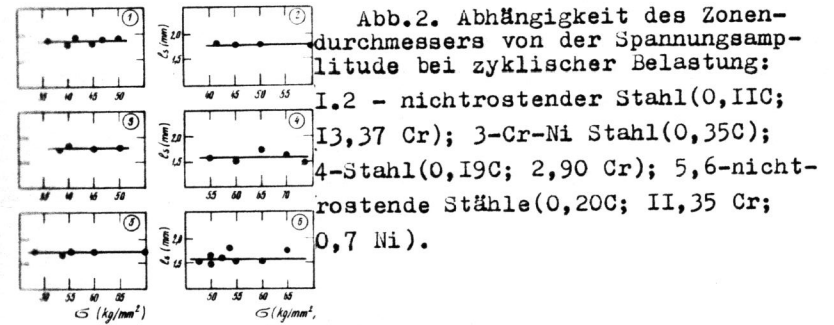


Abb. 2. Abhängigkeit des Zonen-durchmessers von der Spannungsamplitude bei zyklischer Belastung:
 1.2 - nichtrostender Stahl (0, IIC; 13,37 Cr); 3-Cr-Ni Stahl (0,35C); 4-Stahl (0, I9C; 2,90 Cr); 5,6-nichtrostende Stähle (0, 20C; II, 35 Cr; 0,7 Ni).

Bei Stahl 20 fehlt die Zone l_s mit Überschreiten der kritischen Spannung $\sigma_k/8$ überhaupt, die Bruchfläche besteht nur aus den Zonen l_d und l_r . Somit kommt es bei der kritischen Spannung zu einer Änderung des Spannungszustandes nämlich einem Übergang der Rissausbreitung unter Bedingungen eines ebenen Deformationszustandes zu der unter den Bedingungen eines gemischten Spannungszustandes.

Die Analyse des Abdruckes der Bruchfläche des Stahles Cr18Ni10Ti zeigte, dass die Breite der Ermüdungsbänder in der Zone l_s in dem Mass anwächst, wie die Risslänge und die Zyklenzahl vergrößert werden; ihren Maximalkwert erreicht sie an der Grenze zur Zone l_d . Die $\Delta - l$ -Kurve weist bei $l=l_s$ einen Knick auf, d.h. die Risslängenzunahme Δ erreicht einen kritischen Wert Δ_{Ic} (Abb. 3).

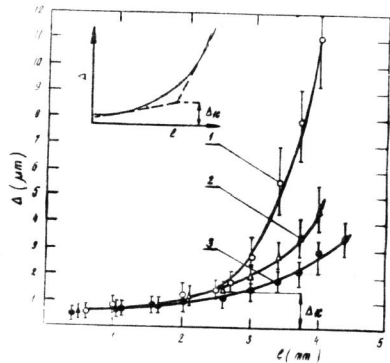


Abb.3. Abhängigkeit der Ermüdungsbänderbreite von der Länge des Ermüdungsrissses: 1-nichtrostender Stahl (I8-8); 2-Cr-Ni Stahl (1,38C; 1,3Cr, 3,15 Ni); 3-Stahl (0,25C).

Die erhaltenen Resultate erlauben es, zur Bestimmung der minimalen Bruchzähigkeit $(K_{IC})_{min}$ bei zyklischer Belastung Überzugehen, wobei die makroskopischen Charakteristika der Ermüdungsbruchflächen ungekerbter Proben entsprechen den folgenden Methoden /2,9/ verwendet werden. Die Proben (eben oder zylindrisch) werden im Ermüdungsversuch bis zum Bruch erprobt. Daraufhin bestimmt man an den Bruchflächen die Länge (für ebene Probe) oder die Tiefe (für zylindrische Probe) des Ermüdungsrissses (Durchmesser des Ermüdungsfleckes $l_f = l_s + l_d$).

Die Bruchzähigkeit wird entsprechend den Formeln der Bruchmechanik in Abhängigkeit von der Probengeometrie berechnet. Für die Proben (zylindrisch und ungekerbt) erhält man

$$K_{IC}^s = \sigma \sqrt{\pi l_s} \quad \dots(I).$$

Berücksichtigt man, dass l_s der Länge eines stabilen Ermüdungsrissses entspricht, der die Lebensdauer des Materials bei zyklischer Belastung beschreibt, kann man die Beziehung

$$K_{IC}^s = \sigma \sqrt{\pi l_s} \quad \dots(2)$$

angeben, wobei σ die maximale Spannungsamplitude ($\sigma_K > \sigma > \sigma_w$) bedeutet.

Die in Abhängigkeit von der Spannungsamplitude berechneten Werte K_{IC}^f und K_{IC}^s sind in Tabelle I angeführt. K_{IC}^s bestimmt nach Formel (2) bei $\sigma = \sigma_w$, entspricht dem

minimalen $(K_{IC})_{min}$ und erweist sich als konstant. Dieser Wert bestimmt die Arbeitsfähigkeit des Materials bei zyklischer Belastung:

$$(K_{IC}^s)_{min} = \sigma_w \sqrt{\pi l_s} \quad \dots(3).$$

Wie man aus Tabelle I entnehmen kann, liegt der Wert von K_{IC}^f bei σ_K nahe dem entsprechenden Wert, der mit statischer Dehnung gekerbter Proben bestimmt wurde, wie es schon früher festgestellt wurde /2,9/.

Minimale Bruchzähigkeit $(K_{IC}^s)_{min}$ kann auch aus Daten elektronenmikroskopischer Untersuchungen mit den Beziehungen

$$G_{IC} = L_m \cdot \Delta l_c ; (K_{IC}^s)_{min} = \sqrt{\frac{L_m \cdot \Delta l_c \cdot E}{1 - \mu^2}} \quad \dots(4)$$

bestimmt werden /10,11/, wobei G_{IC} die kritische Energie pro Einheitslänge des Risses, L_m die Schmelzwärme (kg/mm^3), Δl_c die kritische Risslängenzunahme bei der kritischen Spannung, E den Elastizitätsmodul bedeuten.

Die erhaltenen Resultate zeigen die prinzipielle Möglichkeit einer Bestimmung der Bruchzähigkeit aus fraktographischen Daten, womit die Fraktographie auf das Niveau einer quantitativen Methode gestellt wird.

Literatur

1. Bates R.C., Clark W.G., Ir. Moon D.M. - Electron Microfractography, ASTM, 1969, I92-2I4.
2. Иванова В.С. и др. - Усталость и хрупкость металлических материалов. Изд. "Наука", Москва, 1968.
3. T. Yokobori and M. Jchikawa. - Rep. Res. Inst. Strength and Fracture Mater., Tohoku Univ., v.4, N2 (1968), p.45; v.5, N2 (1969), p.43.
4. T. Yokobori and T. Aizawa. - Rep. Res. Inst. Strength and Fracture Mater., Tohoku Univ., 1970, 6, NI, p.19.
5. T. Kawasaki, T. Yokobori, S. Hakanish, J. Ogawara, M. Horiguchi. - Rep. Res. Inst. Strength and Fracture Mater., Tohoku Univ., 1969, v.6, p.25.
6. Plumbridge W.J., Ryder D.A. - Acta Met., 1969, I7, NI2, p.1449.
7. Иванова В.С., Маслов Л.И., Ботвина Л.Р. - Проблемы прочности. 1972, №2, стр.37.
8. Иванова В.С. - Усталостное разрушение металлов. М., Металлургиздат, 1968.
9. Иванова В.С., Кудряшов В.Г. - Проблемы прочности. 1970, №3, стр.29.
10. Иванова В.С., Ботвина Л.Р. ФХОМ, №3, 1971, стр.43.
11. Ivanova V.S., Botvina L.R. - On Prediction the Fracture toughness. Preprint, Inter. Inst. Welding Commis. X, Doc. X-70, USSR Nat. Welding Committee, Moscow, 1970.