

Sprödigkeit und Kerbzähigkeit

Von

Paul Ludwik, w. M. d. Akad. d. Wiss., und Rudolf Scheu

(Aus der technischen Versuchsanstalt der Technischen Hochschule in Wien)

(Mit 6 Figuren auf einer Tafel)

(Vorgelegt in der Sitzung am 20. Oktober 1927)

Spröde nennt man Körper, die leicht brechen. Dies geschieht um so leichter, je geringer die hiezu nötige Formänderung oder Formänderungsarbeit ist.

Wird die ertragene Formänderung als Maß der Sprödigkeit betrachtet, so ist die Sprödigkeit unabhängig vom Formänderungswiderstand, also von der Härte und Festigkeit, wogegen eine durch die Formänderungsarbeit gemessene Sprödigkeit sowohl von der Formänderungsfähigkeit als auch von dem Formänderungswiderstande abhängig ist. Insofern aber letzterer Einfluß meist stark zurücktritt, erscheinen beide Auffassungen berechtigt.

Ob der Bruch schon bei geringer Formänderung oder Arbeitsaufnahme eintritt, hängt aber nicht nur vom Werkstoff, sondern auch wesentlich von der Größe der Formänderungsgeschwindigkeit und der Art der Beanspruchung ab.

Denn mit zunehmender Formänderungsgeschwindigkeit steigen auch die Formänderungswiderstände.¹ Um diese größeren Widerstände zu überwinden, sind dann oft schon Zugspannungen nötig, die örtlich die Kohäsion überschreiten, wodurch ein vorzeitiger Trennungsbruch ausgelöst wird.

Eine starke Erhöhung der spezifischen Formänderungsgeschwindigkeit wird dort eintreten, wo z. B. zufolge Kerbwirkungen² größere Arbeitsmengen in kurzer Zeit von einem verhältnismäßig kleinen Stoffvolumen aufgenommen werden müssen.³

¹ Vgl. auch G. Sachs, »Grundbegriffe der mechanischen Technologie Metalle«, p. 194 (Leipzig 1925, Akademische Verlagsgesellschaft).

² Über Kerbwirkungen vgl. G. Sachs und G. Fick, »Der Zugversuch«, p. 54 (Leipzig 1926, Akademische Verlagsgesellschaft).

Ludwik und Scheu, Stahl und Eisen, 43 (1923), 999 und 1427. Bei dynamischer Beanspruchung dürfte für die wirkliche Größe des Gleitwiderstandes weder die Schlaggeschwindigkeit noch die spezifische Formänderungsgeschwindigkeit maßgebend sein, sondern vor allem die »effektive Gleitgeschwindigkeit«, also die Gleitgeschwindigkeit der Gleitflächen, die auch noch von der Anzahl der Gleitflächen (in der Volumseinheit) abhängen und (unter sonst gleichen Umständen) mit zunehmender Zahl der Gleitflächen abnehmen wird.

Aber auch die Art der Beanspruchung wird durch die Wirkung der Kerbe eine ganz andere. Manche Stoffe, z. B. weiche Stähle, die in der Zugprobe oft große Dehnbarkeit zeigen und sich bei der Biegeprobe beliebig biegen (zusammenfallen) lassen, verhalten sich eingekerbt, besonders bei stoßweiser Beanspruchung, wie ganz spröde Körper, indem schon eine geringe Schlagarbeit einen plötzlichen Bruch (ohne vorhergegangene Verformung) herbeiführt.

Man spricht dann von Kerbempfindlichkeit, deren Prüfung in der Kerbschlagprobe erfolgt, wobei als Kerbzähigkeit die im Pendelhammer gemessene Biegearbeit (bezogen auf den Bruchquerschnitt) bezeichnet wird, die nötig ist, um eine eingekerbte beiderseits aufliegende prismatische Biegeprobe (mit einem Schlag) zu durchschlagen.

Wann und warum selbst sehr dehnbare Stoffe oft nur eine geringe Kerbzähigkeit haben, also das eigentliche Wesen der Kerbempfindlichkeit, ist noch nicht geklärt.¹

Im allgemeinen dürfte diese Sprödigkeit dann auftreten, wenn das Verhältnis des Reißwiderstandes (Kohäsion) zum Gleitwiderstande (Formänderungswiderstand) unter einen gewissen kritischen Grenzwert sinkt,² dessen Größe aber auch von der Größe der Hauptspannungen abhängig sein muß. Denn bei der an der Kerb-stelle herrschenden dreiachsigen Zugbeanspruchung werden Zugspannungen um so kleinere Schubspannungen hervorrufen, je mehr sich die Hauptspannungen einander nähern.³

Unter sonst gleichen Umständen wird also ein Stoff um so kerbspröder sein, je stärker die Versteifung, je höher der Gleitwiderstand und je niedriger der Reißwiderstand ist.

Jede Milderung der Versteifung wird sonach günstig wirken. Denn je schwächer die Versteifung, um so mehr nähert sich der dreiachsige Spannungszustand dem einachsigen. Daher haben schmälere Proben mit Rundkerb oft eine viel höhere Kerbzähigkeit als breitere Proben mit Spitzkerb.

Bei Blechen ist die Kerbzähigkeit mitunter auch noch hängig von der Lage der Kerbe zur Blechoberfläche. So betrug z. B. bei einem Kesselblech aus Flußstahl die Kerbzähigkeit bei parallel zur Blechoberfläche gelegener Kerbe fast 18 mkg/cm^2 , dagegen bei senkrecht zur Oberfläche gelegener Kerbe kaum

¹ Vgl. auch M. Moser, Stahl und Eisen 43 (1923), 935 und 45 (1925), 1879; Krupp'sche Monatshefte 5 (1924), 48; E. Maurer und R. Mailänder, Stahl und Eisen 45 (1925), 409 und 46 (1926), 1752; F. Körber und A. Pom-p. Mitt. Kaiser-Wilhelm-Institut f. Eisenforschung 6 (1925), 1 und 33; F. Körber und H. A. v. Storp, Mitt. Kaiser Wilhelm-Institut f. Eisenforschung 7 (1925), 81 und 8 (1926), 127; F. Sauerwald und H. Wieland, Zeitschr. f. Metallkunde 17 (1925), 358 und 392.

Ludwik, Stahl und Eisen 43 (1923), 1427 und Zeitschr. d. Vereines deutscher Ingenieure 70 (1926), 379.

Vgl. diese Ber. 135 (1926), 587.

12 mkg/cm^2 , obwohl in beiden Fällen die Proben in der Walzrichtung (nicht quer zu ihr) lagen.

Auf beistehender Tafel zeigt Fig. 1 das Gefüge im Längs- und Fig. 2 im Querschnitt nach Ätzung mit dem Oberhoffer'schen Ätzmittel (Vergr. 25mal). Deutlich ist zu erkennen, daß die von Kohlenstoff- und Phosphorseigerungen herrührende Zeilenstruktur blättrig und nicht sehnig verläuft, wodurch der Zusammenhang von parallel zur Blechoberfläche gelegenen Schichten gelockert wird.

Auf derselben Tafel zeigt Fig. 3 einen Kerbschlagbruch bei parallel und Fig. 4 bei senkrecht zur Blechoberfläche gelegener Kerbe. Im ersten Falle spaltete das Blech parallel, im zweiten senkrecht zur Kerbe, also beidemale parallel zur Blechoberfläche.

Wohl wegen des blättrigen Gefüges hatte dieses Blech auch im gealterten Zustand noch eine Kerbzähigkeit von 17 mkg/cm^2 (also fast dieselbe wie im Einlieferungszustand), wenn die Kerbe parallel zur Blechoberfläche lag, dagegen nur rund 6 mkg/cm^2 bei senkrecht zur Oberfläche gelegener Kerbe.

Eine ähnliche Verminderung der Kerbzähigkeit von Flußstahl kann auch eintreten, wenn z. B. die Temperatur abnimmt.

Dagegen wirkt eine nicht zu harte Vergütung günstig, weil hiebei der Reißwiderstand stärker zunimmt als der Gleitwiderstand.¹

Der Einfluß der Kaltbearbeitung, Alterung und Vergütung auf die Dehnbarkeit und Festigkeit sowie auf die Kerbzähigkeit von weichem Flußstahl (bei 20° C) ist aus Zahlen-tafel 1 zu ersehen.²

Bei 100° C hatte der ausgeglühte und der vergütete Stahl noch dieselbe Kerbzähigkeit (21 mkg/cm^2), während bei 20° C die Kerbzähigkeit des vergüteten Stahles die des ausgeglühten um etwa 50% überstieg. Bei dem ausgeglühten und um 5% vorgestreckten Stahl sank die Kerbzähigkeit (bei 20° C) schon nach einer 20stündigen Lagerung bei Zimmertemperatur auf etwa die Hälfte und nach künstlicher Alterung (halbstündiges Anlassen auf 200° C) auf etwa ein Siebentel.

Dagegen hatte der vergütete Stahl nach gleicher Vorbehandlung (5% vorgereckt und eine halbe Stunde bei 200° C angelassen), also im gealterten Zustande, noch immer fast dieselbe Kerbzähigkeit wie der ausgeglühte Stahl vor der Alterung. Erst nach einer Vorstreckung um 10% und um 20% vermochte die Alterung die Kerbzähigkeit der vergüteten Stähle von durchschnittlich 20 auf 9, beziehungsweise 3 mkg/cm^2 herabzudrücken. In der

¹ Ludwik, Heft 295 (Bach-Heft) der Forschungsarbeiten, p. 56, Berlin 1927, VDI-Verlag.

² Sämtliche Kerbschlagproben hatten 15 × 15 mm Querschnitt und einen 7.5 mm tiefen Rundkerb von 2 mm Durchmesser. Die Kerbschlagversuche wurden auf einem 100 mkg-Pendelhammer von Amsler mit einer Fällhöhe von 3.2 m und einer Auflagerentfernung von 100 mm durchgeführt.

Zugprobe tritt der Einfluß der Alterung besonders in der Erhöhung der Streckgrenze hervor¹ und der Einfluß der Vergütung in der Erhöhung der Reißfestigkeit.² Vgl. auch Zahlentafel 1.

Bemerkenswert ist, daß die kerbzähnen Stähle mitunter eine kleinere Bruchdehnung hatten als die kerbspröden. Die Dehnung bietet also keinerlei Anhalt für eine vorhandene Kerbsprödigkeit.

Sehr charakteristisch war das Bruchaussehen von Stählen verschiedener Kerbzähigkeit.³ Bei einer Kerbzähigkeit von über rund 20 mkg/cm^2 war der Bruch stets matt und sehnig. Zwischen etwa 20 und 15 mkg/cm^2 Kerbzähigkeit begann die Bruchfläche in der Mitte glänzend und körnig zu werden. Mit weiter abnehmender Kerbzähigkeit vergrößerte sich dann diese glänzende Kernzone, während die sie umgebende matte Randzone immer mehr zurücktrat. Bei 5 bis 10 mkg/cm^2 Kerbzähigkeit ist nur noch ein schmaler matter Rand sichtbar und unter 5 mkg/cm^2 Kerbzähigkeit schließlich die ganze Bruchfläche glänzend und körnig.

Eine solche Veränderung des Bruchaussehens ist aber nicht etwa durch eine Änderung der Korngröße zu erklären, was ja schon daraus hervorgeht, daß eine Alterung wohl oft einen sehr starken Abfall der Kerbzähigkeit, nicht aber die geringste Änderung der Korngröße bewirkt. Bei gleicher Korngröße kann also der Bruch sowohl matt und sehnig als auch glänzend und körnig sein.

Auf beistehender Tafel zeigt Fig. 5 (Vergr. 200 mal) den Bruch eines Stahles von fast 18 mkg/cm^2 Kerbzähigkeit. Die Bruchlinie verläuft gezackt und die Körner sind stark verzerrt. Daneben zeigt Fig 6 (Vergr. 500 mal) den Bruch desselben, aber gealterten Stahles von nur rund 3 mkg/cm^2 Kerbzähigkeit. Die geradlinigen Risse innerhalb der Körner deuten auf einen vorwiegend intra-granularen Bruchverlauf.⁴

Der Übergang von der matten Sehne zum glänzenden Korn ist daher wohl vor allem darauf zurückzuführen, daß der matte sehnige Bruch mehr durch Abgleitung stark gereckter Krystallkörner zustande kommt (Fig. 5), wogegen der glänzende körnige Bruch mehr durch die Spaltflächen und Korngrenzen geht (Fig. 6).

Ein metallischer Werkstoff erscheint also um so spröder, je früher bei zu hohem Gleitwiderstand ein Trennungsbruch durch Überwindung des Reißwiderstandes einsetzt, und um so kerbzäher,

¹ Diese Erhöhung der Streckgrenze dürfte als eine Nachhärtungserscheinung zu deuten sein. Vgl. Ludwik und Schen, Werkstoffausschußbericht Nr. 70 des Vereines deutscher Eisenhüttenleute (Nov. 1925), und Ludwik, Zeitschr. des Vereines deutscher Ingenieure 70 (1926), 379 und 71 (1927), 1532.

² Vgl. auch diese Ber. 135 (1926), 587 und Zeitschr. f. Metallkunde 18 (1926), 269.

³ Vgl. auch E. Maurer und R. Mailänder, Stahl und Eisen 45 (1925), 409 und 46 (1926), 1752, und P. Goerens und R. Mailänder, Heft 295 der Forschungsarbeiten, p. 18, Berlin 1927, VDI-Verlag.

⁴ Ludwik, Zeitschr. d. Vereines deutscher Ingenieure 71 (1927), 1532.

Zahlentafel 1 Vergleichende Zug- und Kerbschlagversuche.

Flußstahl mit 0·10/0 C (0·5 Mn, 0·02 P, 0·04 S)			Ausgeglüht				Vergütet			
			Ein- lieferungs- zustand	eine halbe Stunde bei 200° C angelassen nach einer Vorstreckung um			Ein- lieferungs- zustand	eine halbe Stunde bei 200° C angelassen nach einer Vorstreckung um		
				50/0	100/0	200/0		50/0	100/0	200/0
Z u g p r o b e	Gleichmäßige Dehnung... ..in Proz.		21 23	12 10	10 8	3·5 0·3	19 20	7·5 8·5	4·5 4·5	0 0
	Bruchdehnung..... ..in Proz.		33 32·9	20 21	16·1 14·6	9·8 3·2	26·6 27·8	16·9 16·5	12·5 11·0	9·5 1
	Bruchquerschnittsverminderung in Proz.		67·8 67·8	64·2 63·0	61·1 58·1	57·4 55·2	66·1 67·4	72·6 69·4	69·6 65·3	64·3 1
	Streckgrenze	obere	28·5 24·9	40·0 42·0	46·5 50·7	53·9 56·5	33·4 31·5	43·6 46·3	51·9 55·0	60·7 61·2
		in kg/mm^2	untere	25·3 24·2	39·3 41·0	46·2 50·3	53·9 55·7	30·9 30·7	41·7 45·7	49·8 54·4
	Zugfestigkeit ..in kg/mm^2		40·8 40·1	45·2 46·3	48·7 52·8	54·0 56·5	46·4 46·6	45·3 48·9	50·5 55·0	60·7 61·2
	Reißfestigkeit ..in kg/mm^2		86·3 83·5	85·6 86·0	83·6 87·5	84·8 85·4	99·4 101·1	98·2 100·8	101·4 103·2	102·3 1
Kerbschlag- probe	Kerbzähigkeit. ..in mkp/cm^2		11·1	1·7	1·3	1·5	17·4	10·7	5·6	2·5
			12·4	2·0	1·6	1·7	18·4	12·7	7·1	2·6
			14·8	2·0	1·7	1·9	21·8	12·8	11·7	3·1
			15·9	2·3	2·1	2·0	23·6	14·1	12·7	3·1

1 Außerhalb der Meßlänge gebrochen.

1 Außerhalb der Meßlänge gebrochen.

je mehr Krystallite durch Überwindung des Gleitwiderstandes vor Beginn des Trennungsbruches zu möglichst weitgehender Verformung gelangen.

Zusammenfassung.

Als Maß der Sprödigkeit kann entweder die ertragene Formänderung oder die aufgenommene Formänderungsarbeit betrachtet werden.

Die Sprödigkeit ist nicht nur vom Werkstoff, sondern wesentlich auch von der Größe der Formänderungsgeschwindigkeit abhängig. Besonders Kerben bewirken sowohl eine starke Zunahme der spezifischen Gleitgeschwindigkeit als auch räumliche Spannungszustände. Beides erhöht die Sprödigkeit oft derart, daß selbst sehr dehnbare Stoffe spröde erscheinen.

Eine solche Kerbempfindlichkeit kommt in der Zugprobe meist gar nicht zum Ausdruck, dagegen sehr deutlich in der Kerbschlagprobe. Bei gleicher Schlaggeschwindigkeit ist die Kerbzähigkeit abhängig von der Breite der Probe sowie von der Schärfe und Lage der Kerbe.

Der Einfluß der Kalthärtung, der Alterung und der Vergütung auf Festigkeit, Dehnung und Kerbzähigkeit, sowie die Beziehung zwischen der Sprödigkeit, dem Gefüge und der Art des Bruches wird an Versuchen erläutert.

Der Bruch erscheint entweder matt und sehnig oder glänzend und körnig, je nachdem, ob er bei (im Verhältnis zum Gleitwiderstand) genügend hohem Reißwiderstand durch Abgleitung stark verzerrter Krystallkörner oder aber bei (im Verhältnis zum Reißwiderstand) zu hohem Gleitwiderstand durch Trennung längs Spaltflächen und Korngrenzen erfolgt. Im ersten Fall ist das Metall zähe, im anderen spröde.

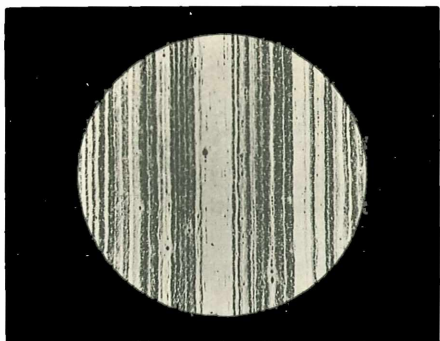


Fig. 1

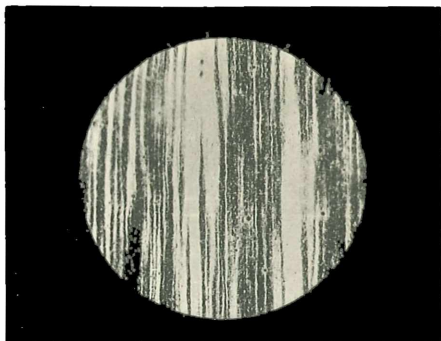


Fig. 2

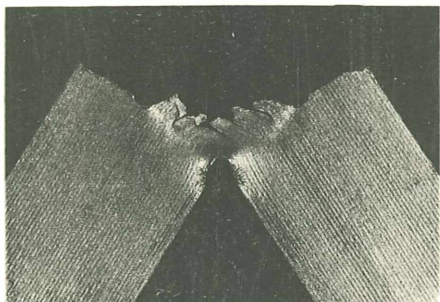


Fig. 3 a

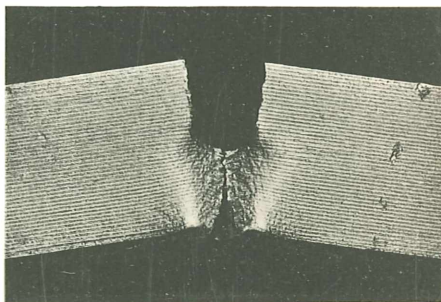


Fig. 4 a

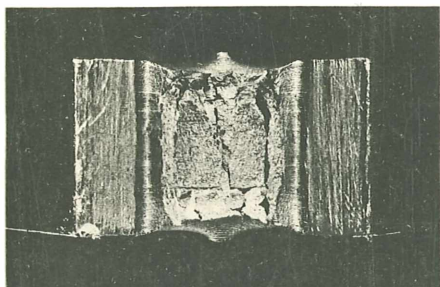


Fig. 3 b

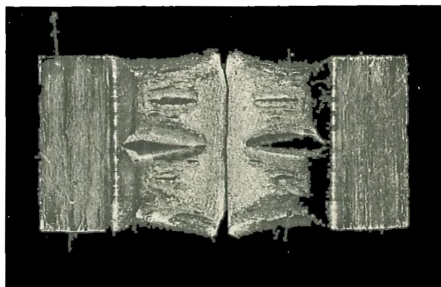


Fig. 4 b

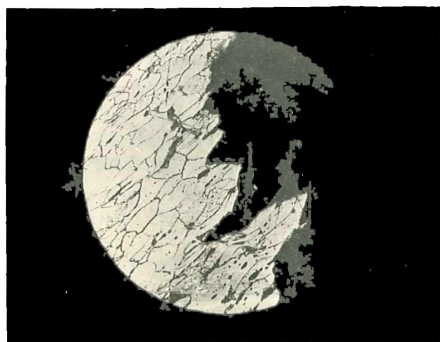


Fig. 5

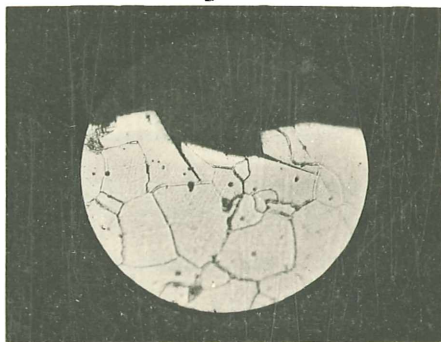


Fig. 6 Lichtdruck v. Max Jaffé, Wien.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften
mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse](#)

Jahr/Year: 1927

Band/Volume: [136_2a](#)

Autor(en)/Author(s): Ludwik Paul, Scheu Rudolf

Artikel/Article: [Sprödigkeit und Kerbzähigkeit. 563-568](#)