

# EINFLUSS DER ALTERUNG AUF DIE KONTRAKTIONSBARKEIT VON STÄHLEN\*

Von

G. Y. ZIAJA

Mechanisch-Technologisches Institut der Technischen Universität, Budapest

(Eingegangen am 20. Februar 1959)

## 1. Einführung

1.1. Die Art des Bruches von Stählen wird durch drei Faktoren, Untersuchungstemperatur, Geschwindigkeit der Deformation und durch den mehrachsigen Spannungszustand bestimmt, welcher im Augenblick des Bruches im Probestab (oder Maschinenteil) zustande kommt. Beim Charpyschen Kerbschlagbiegeversuch, einem der am meisten verbreiteten Werkstoffprüfverfahren ist von den erwähnten drei Faktoren die Mehrachsigkeit des Spannungszustandes durch die Stabform, die Deformationsgeschwindigkeit hingegen durch die Ausbildung des Schlagwerkes bestimmt. Da diese für gewöhnlich genormt sind, läßt sich der spröde Zustand der Stähle durch Änderung des dritten Faktors, der Temperatur, ermitteln, sofern man sich zur Bestimmung des spröden Zustandes der Kerbschlagbiegeversuch bedient.

Die bei verschiedenen Temperaturen vorgenommenen Kerbschlagbiegeversuche lassen erkennen, daß die Kerbschlagzähigkeit von Stählen in gewissen Temperaturintervallen sprunghafte Änderungen aufweist (Bild 1). Die Stelle dieses Übergangs-Temperaturintervalls — d. h. die Stelle des Übergangs zum spröden Zustand — wird durch zahlreiche Faktoren bestimmt, so außer durch den bereits erwähnten mehrachsigen Spannungszustand (Stabform) und die Deformationsgeschwindigkeit auch durch die chemische Zusammensetzung, durch die Korngröße und durch den Wärmebehandlungszustand [1].

In der Praxis wird ein Stahl spröde genannt, sofern sein Übergangs-Temperaturintervall nahe an der Zimmertemperatur oder über dieser liegt [2]. Dieser spröde Zustand des Stahles kann auf verschiedene Art, so beispielsweise auch durch seine Alterung herbeigeführt werden.

Die Alterung ist eine Änderung der Eigenschaften des Stahls, die zustande kommt, wenn man ihn nach Kaltverformung oder Wärmebehandlung kürzere oder längere Zeit bei Zimmertemperatur oder bei einer über dieser liegenden Temperatur lagern läßt.

Die Alterung wird im allgemeinen Ausscheidungsvorgängen aus übersättigten festen Lösungen zugeschrieben, die bei verschiedenen Legierungen

\* Diplomarbeit im Auftrag des Mechanisch-Technologischen Instituts (Professor : L. GILLEMOT).

eintritt, so beispielsweise bei gewissen Aluminiumlegierungen, ferner auch bei Stählen mit niedrigerem Kohlenstoffgehalt und bei Speziallegierungen von Stahl [3]. Im allgemeinen versteht man unter „Altern“ die Änderung der Festigkeit, Härte, Verformbarkeit und Kerbschlagzähigkeit von Stählen mit niedrigerem Kohlenstoffgehalt. Das Altern derartiger Stähle wird darauf

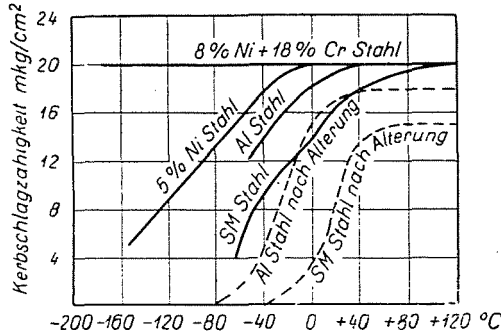


Bild 1. Temperaturabhängiger Verlauf der Kerbschlagzähigkeit von Eisen und Stahl

zurückgeführt, daß sich die Löslichkeit der üblichen Verunreinigungselemente im Ferrit mit der Temperatur auch unter der Umwandlungstemperatur  $A_1$  weitgehend ändert. Den Verlauf der Löslichkeit von C, O<sub>2</sub> und N<sub>2</sub> in Abhängigkeit von der Temperatur veranschaulicht Bild 2 [3]. Unter den sonstigen für

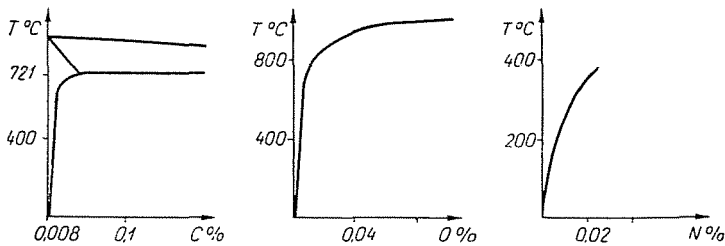


Bild 2. Löslichkeit von Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff in Ferrit

gewöhnlich vorkommenden Verunreinigungen ist die Löslichkeit des P und Si bei Zimmertemperatur größer, als daß sie die üblicherweise vorhandenen Mengen erschöpfen würde, weshalb diese auch keinerlei Ausscheidungsvorgänge auslösen. Ein Gleiches gilt für Mn, während Schwefel in der Regel in Form von MnS vorhanden ist, das sich in Ferrit geringfügig löst, dessen Wirkung jedoch ungewiß ist.

1.2. Eine Alterung an Weichstählen läßt sich auf zweierlei Art erzielen. Die Ausscheidungsverhärtung (Abschreckalterung, »quenchageing«) kommt dann zustande, wenn der Weichstahl-Probekörper nach rascher Abschreckung von 600–700°C, bei Zimmertemperatur sehr lange (allenfalls Monate hindurch),

oder eventuell bei einer etwas höheren Temperatur einige Tage gelagert wird. Die den Schrifttumsangaben zufolge [3] solcherart erzielbare Härteerhöhung geht aus Tabelle 1 hervor.

Tabelle 1

	C-Gehalt in Prozenten					
	0,019	0,033	0,043	0,063	0,087	0,166
	Brinell-Härte, kg/mm <sup>2</sup>					
Unmittelbar nach Abschrecken von 700 °C	85	79	89	123	127	136
Nach 8tägigem Altern von 52 °C	92	80	101	207	170	194
Zunahme	7	1	12	84	43	58

Ist die Menge des im Eisen gelösten  $N_2$  und  $O_2$  gering, d. h. wird der Stahl im Zuge der Herstellung beruhigt, so ist die Härtezunahme wesentlich geringer, eine Tatsache, die darauf hinweist, daß die Hauptursache der Alterung außer in der Ausscheidung des im Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm mit der Linie PQ bezeichneten Tertiärzementites in dem im Ferrit gelösten  $O_2$  und  $N_2$  zu suchen ist. Anderen Versuchen gemäß verursacht der Sauerstoff unmittelbar keine Abschreckalterung, doch vermindert seine Anwesenheit die Löslichkeit des C und  $N_2$  im Ferrit, so daß er mittelbar dennoch einen Einfluß auf die Alterung ausübt [4]. Der Mechanismus der durch die Ausscheidungen ausgelösten Verhärtung wird mit der Dislokationstheorie erklärt [5].

Die mechanische Alterung kommt durch die auf die Kaltverformung des Weichstahles folgende Lagerung zustande, unter deren Wirkung Festigkeit und Härte des Weichstahles anwächst, während seine Kerbschlagzähigkeit sich wesentlich vermindert. Zerreißversuche an dem derart gealterten Stoff zeigen, daß die Streckgrenze wieder als scharf abgrenzbarer Punkt erscheint, im Gegensatz zu dem ziemlich flachen Verlauf der Zugschaulinie des bloß kaltverformten Weichstahles, eine Erscheinung, die damit erklärt wird, daß die Ausscheidungen den Gleitflächen entlang auftreten, und die in den Kristalliten befindlichen Dislokationen nur dann einer schnellen Bewegung fähig sind, wenn sie von der Atmosphäre der segregierten Teilchen abreißen. Hierzu bedarf es einer eigenen Kraft, die ihrer Größenordnung nach der Streckgrenze entspricht. Entfernt man aus dem Eisen den interstitiellen Kohlenstoff und Stickstoff, so verschwindet die Streckgrenze, während andererseits die auf die Kaltverformung folgende Alterung das neuerliche Erscheinen der Streckgrenze verursacht [5].

1.3. Die Untersuchung der Werkstoff-Kenngrößen für gealterte Stähle führte zu der Feststellung, daß die Abschreckalterung eine größere Härtezunahme, die mechanische Alterung hingegen eine größere Verminderung der

Kerbsehlagzähigkeit zur Folge hat. Die Kerbschlagzähigkeit nicht alternder Stähle (wie etwa der mit Al beruhigten Stähle) zeigt eine geringere Verminderung oder bleibt konstant. Die im Zuge der Alterung eintretende Versprödung wird im allgemeinen mit Hilfe des Kerbschlagbiegeversuches geprüft. Wie bereits erwähnt, vermindert sich nach dem Altern die Kerbschlagzähigkeit, während die Härte zunimmt. Hierzu kommt noch eine Verminderung der Kennwerte für die Plastizität, beispielsweise der Dehnung, wogegen sich Festigkeit und Streckgrenze erhöhen. Das Produkt aus Festigkeit und Dehnung ist eine die Arbeit ausdrückende Größe. Eine physikalisch definierte derartige Größe ist z. B. die REYTSÖsche Zähigkeitsarbeit [8], die die zur gleichmäßigen Formveränderung des Stoffes erforderliche Arbeitsmenge ausdrückt. Die bis zum Bruch verrichtete Arbeit läßt sich durch die Kontraktionsarbeit des Stoffes ausdrücken.

1.4. Die Kontraktionsarbeit [6] ist jene Arbeitsmenge, die nötig ist, um 1 cm<sup>3</sup> eines Stoffes eine Deformation hervorzurufen, wie sie der eingeschnürte Querschnitt der Zugprobe beim Bruch erlitten hat, oder mathematisch ausgedrückt :

$$A_c = \int_{L_0}^{L_c} \frac{PdL}{V_0} = \int_{L_0}^{L_c} \frac{P}{F_0} \cdot \frac{dL}{L_0} = \int_0^{\delta_c} \sigma d\delta, \quad (1)$$

wenn

$A_c$  = die Kontraktionsarbeit [mkg/cm<sup>3</sup>],

$L_0$  = die an der Stelle des eingeschnürten Querschnittes am Probestab bezeichnete elementare Entfernung [mm],

$L_c$  = deren Dehnungslänge beim Zerreißversuch [mm],

$V_0$  = das an der Stelle der Kontraktion angezeichnete elementare Volumen [mm<sup>3</sup>],

$F_0$  = die Querschnittsfläche des Probestabes [mm<sup>2</sup>],

$\sigma$  = Spannung [kg/mm<sup>2</sup>],

$\delta$  = effektive Dehnung [mm/mm],

$\delta_c$  = die effektive Dehnung des Bruchquerschnittes beim Bruch [mm/mm].

Der Wert des obigen Integrals läßt sich auf konstruktivem Wege durch Planimetrieren der Fläche unter der Kurve ermitteln (Bild 3), doch ist auch die rechnerische Ermittlung möglich [6], denn es gilt

$$A_c = \frac{\delta_g}{3} (\sigma_s + 2\sigma_B) + 4,6\sigma_B(1 + \delta_g) \lg \frac{1 + \delta_c}{1 + \delta_g} + \sigma_B(1 + \delta_g)^2 \left[ \frac{1}{1 + \delta_c} - \frac{1}{1 + \delta_g} \right], \quad (2)$$

worin außer den oben bereits definierten Bezeichnungen bedeuten :

$\delta_g$  = gleichmäßige Dehnung [mm/mm],

$\sigma_s$  = Streckgrenze [kg/mm<sup>2</sup>],

$\sigma_B$  = Bruchfestigkeit [kg/mm<sup>2</sup>].

Bei dieser Ermittlung des Integralwertes ging man von zwei Bedingungen aus, u. zw. daß :

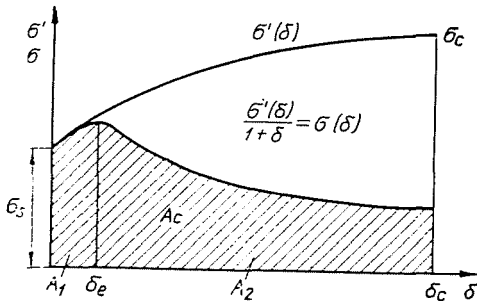


Bild 3. Das  $\sigma$ — $\delta$  und  $\sigma'$ — $\delta$ -Schaubild

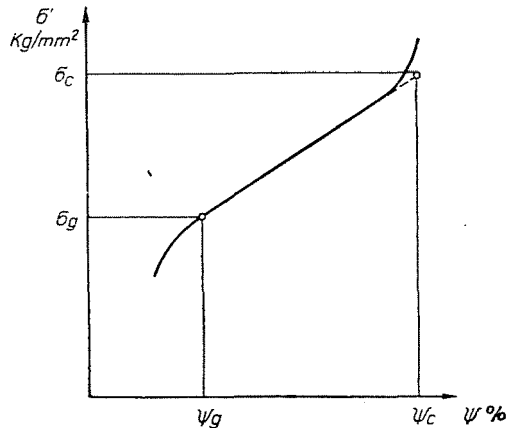


Bild 4. Verlauf der  $\sigma'$ — $\psi$ -Kurve

1. die Kurve, die den in Bild 3 mit  $A_1$  bezeichneten Flächenteil nach oben begrenzt, eine Parabel darstellt [8] und daß
2. in der Kurve gemäß Bild 4 die Strecke zwischen  $\sigma_g$  und  $\sigma_c$  eine Gerade ist [6].

Diese beiden Bedingungen treffen auch für weiche Stähle mit sehr guter Annäherung zu, weshalb es im vorliegenden Fall zur Bestimmung der Kontraktionsarbeit genügt, die aus den einfachen ZerreiBversuchen gewonnenen Unterlagen zu verwenden, ohne sich irgend eines besonderen MeBverfahrens bedienen zu müssen.

## 2. Zielsetzung

2.1. Ein geeignetes Verfahren zum Nachweis der verspröden Wirkung des Alterns bildet der Charpysche Kerbschlagbiegeversuch. Vermutlich ist der Schlagversuch für die auf das Altern folgende Versprödung deshalb kennzeichnend, weil der hierbei verwendete Probestab stark gekerbt ist, weil mithin beim Bruch unbedingt der Zustand der mehrachsigen Spannung vorliegt. Bekanntlich besteht aber an der Stelle der Einschnürung im Augenblick des Bruches ebenfalls ein Zustand der mehrachsigen Spannung. Hieraus ergibt sich nun eine Reihe von Fragen, u. zw. inwieweit sich die Kontraktionsarbeit

nach dem künstlichen Altern ändert, ob die Änderung der Kontraktionsarbeit die Alterung zu kennzeichnen vermag, und welche Ausmaße die Änderung der Kontraktionsarbeit annimmt, falls eine solche eintritt.

2.2. Frühere Versuche [6] haben nachgewiesen, daß die Kontraktionsarbeit von Stählen von der Temperatur des Anlassens nach erfolgter Härtung unabhängig ist. Es ist nicht uninteressant zu untersuchen, wie sich das Altern, das — ähnlich der Veredlung — die Festigkeit und Dehnung wesentlich beeinflußt, auf die Kontraktionsarbeit von Stählen auswirkt. Im Zuge des Alterns nimmt die Festigkeit zu, während die Dehnung abnimmt. Vernachlässigt man in Gleichung [1] in erster Annäherung das  $\sigma_s$ , dann kann Gleichung [2] in der Form

$$A_c = \sigma_B \cdot f(\delta_B, \delta) \quad (3)$$

geschrieben werden, woraus folgt, daß sich die Kontraktionsarbeit vermindert, daß sie zunimmt oder konstant bleibt je nachdem, welches Glied des Produktes im Zuge der Alterung die größere Änderung erfährt, ob also die Spannung oder die Dehnungsänderung größer ist.

### 3. Messungen

Zwecks Beantwortung der in Punkt [2] aufgeworfenen Fragen wurden drei genormte Stähle gewählt, deren übliche Kenngrößen in Tabelle II zusammengefaßt sind.

Tabelle II

Stoff	$\sigma_B$	$\sigma_F$	$\delta_{10}$	$\nu$	$A_k$	$A_c$	Bemerkungen
35F	37,5	21,3	34,0	65,0	21	55—63	
A 37.21	37,6	25,8	30,0	68,0	14	61—66,5	Al = 0,06%
C15	46,8	32,3	30,1	66,0	15	70—82	

Der hohe Al-Gehalt des Stahles A 37.21 läßt es als wahrscheinlich erscheinen, daß er mit Aluminium beruhigt wurde.

Die aus den erwähnten Stoffen angefertigten Probestäbe wurden auf verschiedene Art der Alterung unterzogen. Die hierauf folgende Untersuchung erstreckte sich auf die Frage, inwiefern sich mit den Veränderlichen der Alterung (Kaltverformung, Dauer und Temperatur der auf die Kaltverformung folgenden Wärmebehandlung) die Kontraktionsarbeit ändert. Gleichzeitig wurde zur Kontrolle der Alterung auch die Kerbschlagzähigkeit gemessen, wobei noch das Ziel verfolgt wurde, festzustellen, in welcher Weise die erwähnten Stoffe 35F und A 37.21 maximal gealtert werden können. Die Veränderlichen der Alterung wurden den in der ungarischen Norm [7] angegebenen

Werten entsprechend gewählt. Die Meßergebnisse sind in den Abbildungen 5, 6 und 7 dargestellt.

Aus den Schaubildern geht hervor, daß die Kontraktionsarbeit keine alterungsbedingte Änderung erfährt, bzw. daß sie im Streuungsbereich der

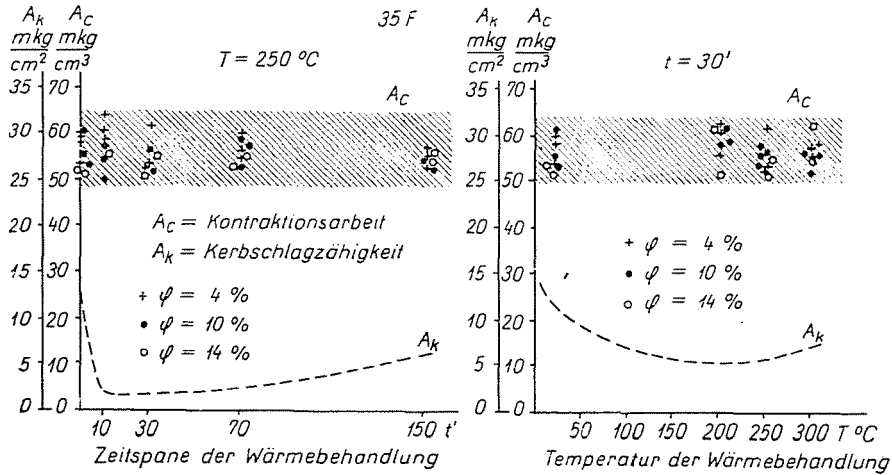


Bild 5. Verlauf der Kontraktionsarbeit und der Kerbschlagzähigkeit des Werkstoffes 35F in Abhängigkeit von den Veränderlichen der Alterung

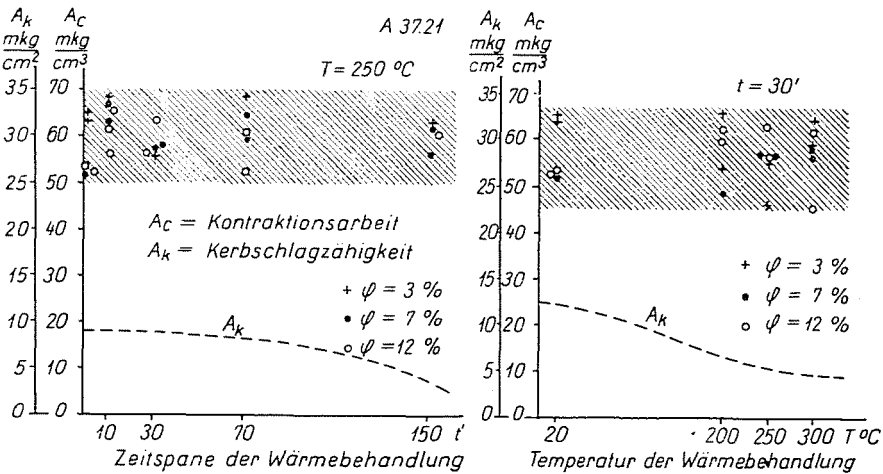


Bild 6. Verlauf der Kontraktionsarbeit und der Kerbschlagzähigkeit des Werkstoffes A 37.21 in Abhängigkeit von den Veränderlichen der Alterung

Kontraktionsarbeit des ungealterten Stoffes verbleibt. Wird die die Alterung beschleunigende Wärmebehandlung nicht vorgenommen, dann zeigen sich die aus den Abbildungen 8, 9 und 10 ersichtlichen Erscheinungen, die Kontraktionsarbeit vermindert sich also mit der aus dem einachsigen Ziehen bestehenden Kaltverformung.

Die Erklärung hierfür findet sich in einer früheren Feststellung K. LJUNGBERGS [9], derzufolge es ohne Belang bleibt, wie groß die Zahl der Beanspruchungen ist, durch die die Kontraktionsarbeit des Stoffes bei einer Bean-

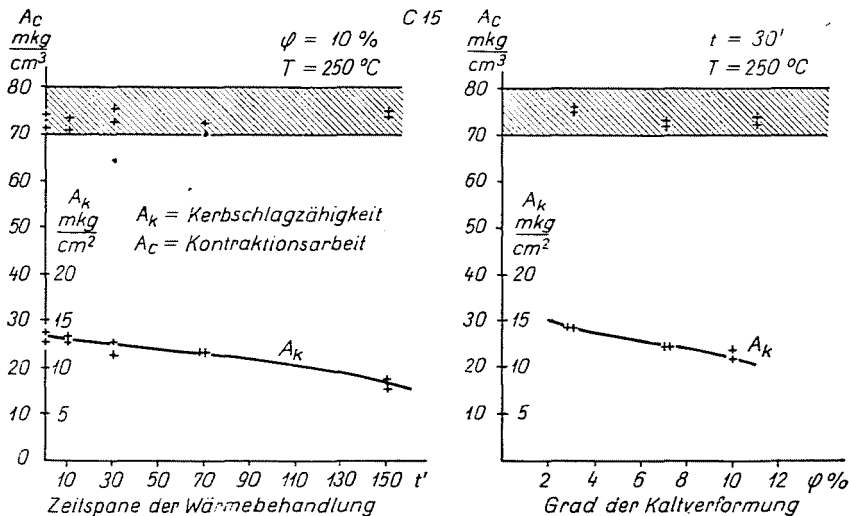


Bild 7. Verlauf der Kontraktionsarbeit und der Kerbschlagzähigkeit des Werkstoffes C15 in Abhängigkeit von den Veränderlichen der Alterung

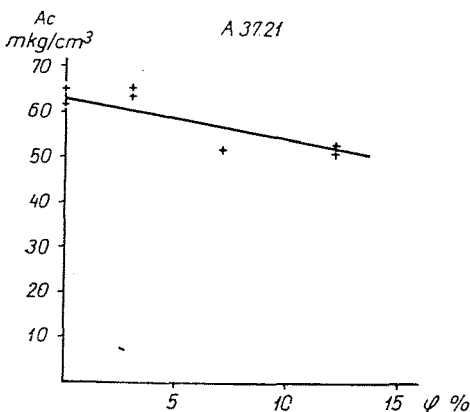


Bild 8. Verlauf der Kontraktionsarbeit des Werkstoffes 35F in Abhängigkeit von der Kaltverformung

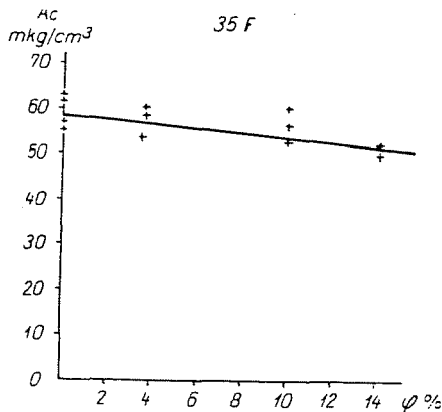


Bild 9. Verlauf der Kontraktionsarbeit des Werkstoffes A 37.21 in Abhängigkeit von der Kaltverformung

spruchung bis zum Bruch erschöpft wird. Mathematisch läßt sich dies in der Form

$$A_c = A_1 + A_2 + \dots + A_n \tag{4}$$

ausdrücken, wobei  $A_c$  die Kontraktionsarbeit des Stoffes,  $A_1 + A_2 + \dots + A_n$



hingegen die Summe der im Zuge der Beanspruchung bis zum Bruch aus dem Stoff »herausgeholt« Kontraktionsarbeiten bezeichnen.

Dies trifft natürlich auch für den einachsigen Zug zu. Die Werte der beim Ziehen aus dem Stoff herausgeholt Kontraktionsarbeiten entsprechen

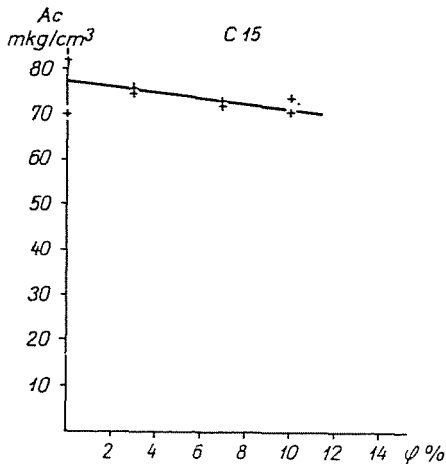


Bild 10. Verlauf der Kontraktionsarbeit des Werkstoffes C15 in Abhängigkeit von der Kaltverformung

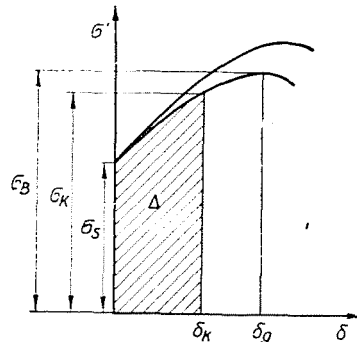


Bild 11. Bestimmung der durch Kaltverformung herausgeholt Arbeit

je einem Flächenstück gemäß Bild 3. Mit einachsigem Ziehen kann der Stoff ohne Kontraktion des Probestabes nur bis zur gleichmäßigen Dehnung belastet werden. In diesem Fall läßt sich die aus dem Stoff herausgeholt Kontraktionsarbeit nach REJTO [8] in einfacher Weise bestimmen. Ist nämlich die Kurve in Bild 3 bis  $\delta_g$  eine Parabel, dann ergibt sich durch Bestimmung der Fläche unter der Parabel die herausgeholt Kontraktionsarbeit (Bild 11). Beträgt die Dehnung  $\delta_k$  und die bei der Dehnung gemessene Höchstspannung  $\sigma_k$ , dann gilt für die herausgeholt Arbeit

$$\Delta = \sigma_s \delta_k + \frac{2}{3} (\sigma_k - \sigma_s) \delta_k, \quad (5)$$

vorausgesetzt, daß  $\delta_k < \delta_g$ .

Nach der Dehnung wurden aus den Stäben normgemäße Rundzugproben geformt und nach Messung der Kontraktionsarbeit festgestellt, daß diese kleiner war, als vor der Dehnung. Addiert man zum erhaltenen  $A'_c$ -Wert den anhand der Gleichung [5] errechneten  $\Delta$ -Wert, ergibt sich, daß  $A'_c + \Delta = A_c$ .

Im Hinblick auf die große Streuung der Kontraktionsarbeit hat diese Gleichheit nur für den Fall Gültigkeit, daß der Wert  $A'_c + \Delta$  innerhalb des

Bereiches von  $A_c$  verbleibt. Die Summierung kann anhand des oben erwähnten Satzes von LJUNGBERG durchgeführt werden.

Die Ergebnisse einiger im Zusammenhang mit den vorangegangenen Prüfungen vorgenommener Messungen zeigt untenstehende Tabelle III.

Tabelle III

Stoff	$A_c$	$\delta_k$ %	$\sigma_k$ kg/mm <sup>2</sup>	$\Delta$	$A'_c$	$A'_c + \Delta$
35 F	55—63	14	40,1	4,9	52,2	57,1
A 37.21	61—65,5	3	27,3	0,8	63,6	64,4
		12	35,6	4,5	56,5	61,0
		3	32	1,0	75,5	76,5
C15	70,3—82	7	41,7	2,7	73,0	75,7
		10	44,5	4,1	72,8	76,9

#### 4. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Aus den Versuchen ging hervor, daß die Kontraktionsarbeit der Stoffe 35F und C15 auch nach der Alterung keine Veränderung erfuhr, und daß auch die Umstände des Alterns ohne Einfluß auf die Ergebnisse blieben. Die Alterung des Stoffes A 37.21 nahm geringere Ausmaße an, doch blieb seine Kontraktionsarbeit innerhalb eines Streuungsbereiches. Von Interesse ist die Erscheinung, daß die Kontraktionsarbeit bei Kaltverformung, die durch einachsigen Zug herbeigeführt wird, eine ausgeprägte Verminderung erfuhr, deren Größe auf einfache Weise rechnerisch ermittelt werden kann.

#### Schrifttum

1. GREAVES, R. H.—JONES, J. A.: J. of the Iron and Steel Inst. **CXII**, 123 (1925).
2. VERŐ, J.: Általános Metallográfia. Akadémischer Verlag, Budapest 1956. S. 396.
3. EPSTEIN, S.: Ageing of Iron and Steel, Metals Handbook, 1948, S. 438.
4. LOW, J. R. JR.—GENSAMER, M.: Trans. AIME **158**, 207 (1944).
5. SCHEY, J.: A fémek képlékeny alakváltozásának atomos elmélete. Mérn. Továbbképző Int. 3004, 40 (1954).
6. GILLEMOT, L.—SINAY, G.: MTA Műszaki Tud. Oszt. Közl. **XII** 343 (1958).
7. MSz 1741.
8. REJTŐ, S.: Az elméleti mechanikai technológia és a fémek technológiája, Budapest, 1919.
9. LJUNGBERG, K.: Erste Mitteilungen des Neuen Internationalen Verbandes für Materialprüfungen. Gruppe A 149—154, Zürich 1931.