

DARSTELLUNG DER UMFORMBARKEIT VON METALLISCHEN WERKSTOFFEN IN EINEM UMFORMBARKEITSDIAGRAMM

Z. DARVAS

Forschungsinstitut für Eisenindustrie, H-1509 Budapest

Eingangen am 24 April 1984
Vorgelegt von Prof. Dr. I. ARTINGER

Summary

In this paper the formerly usual formability diagram has been modified on the basis of the theory of Z. Marciniak and K. Kuczyński concerning the localization of strain in shearing bands and the empirical values.

The already known outer variables of state influencing the formability were extended by the term "state of strain", for the numerical designation of which the absolute value of the Lode parameter was introduced.

Formability test were made with three different steels in order to confirm the relationship between the formability and the state of strain.

On account of the experimental results an assumed shape of the formability diagram was taken as a basis in the whole region of plane stress.

The assumptions valid for plane stress were extended also to spatial stress conditions on the understanding of the equivalency of the state of stress parameter in terms of the formability.

A hypothesis has been formulated concerning the shearing band systems occurring in various states of strain.

Einführung

Die Probleme der Umformbarkeit metallischer Werkstoffe umfassen ein außerordentlich weites Gebiet, und zwar deshalb, weil die Umformbarkeit von vielen Faktoren abhängt. In erster Annäherung kann man schreiben:

$$\bar{\epsilon}_{Br} = f(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}, T, A) \quad (1)$$

wo:

$\bar{\epsilon}_{Br}$ – die Vergleichsformänderung beim Bruch;

σ_{ij} – den Spannungstensor;

ϵ_{ij} – den Formänderungsgeschwindigkeits-Tensor;

T – die Temperatur;

A – Werkstoffkennwerte darstellt.

Bei näherer Betrachtung steigt die Anzahl der Veränderlichen noch weiter. Zu den Werkstoffkennwerten gehören alle Parameter, die die Umformbarkeit von der Werkstoffseite beeinflussen können (z. B. Zusammensetzung, Reinheit, Homogenität, Gefüge, Anisotropie, usw.).

Die Behandlung des Spannungszustandes als Parameters ist auch ein Problem, diesbezüglich nämlich wie man aus dem für den Spannungszustand eindeutig kennzeichnenden Spannungstensor σ_{ij} einen solchen skalaren Index bilden kann, der den Spannungszustand kennzeichnet.

Zur Kennzeichnung des Spannungszustandes ist die von Maier vorgeschlagene Kennzahl weit verbreitet [1]:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_v} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3k_f} \quad (2)$$

wo:

σ_m — der hydrostatische Spannungsanteil

σ_v — die Vergleichsspannung

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — Hauptspannungen

k_f — Formänderungsfestigkeit bedeutet.

Dieser Index enthält im Wesentlichen die erste Invariante des Spannungstensors σ_{ij} und die zweite Invariante des Spannung-Tensors S_{ij} . Die dritte Invariante des Spannung-Tensors ist in diesem Index nicht mit einbezogen. Der Kennwert σ_m/σ_v liefert deshalb keine eindeutige Kennzeichnung des Spannungszustandes, sondern nur für den Fall von $\sigma_3 = 0$, also für ebene Spannungszustände.

Neuere Forschungen haben ergeben, daß alle im Laufe der Umformung auftretenden Werte des Spannungszustandes beachtet werden müssen, weil dies die Bruchformänderung ebenfalls beeinflusst [2—5]. Im Schrifttum wurde diese Erscheinung Umformgeschichte genannt. In der Praxis der Blechumformung wird sie mit folgendem Quotienten beschrieben:

$$\eta = \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1} \quad (3)$$

$\eta = \text{konstant}$ bedeutet einen linearen Formänderungsweg im Koordinatensystem des Grenzformänderungsschaubildes. Man fand auch, daß die Koaxialität des Umformweges ebenfalls ein beachtenwertes Problem darstellt [6].

Die Forschungen im Bereich der Umformung — ob Blech- oder Massivumformung — lassen sich nach Abb. 1 gruppieren. Haupttrichtung der

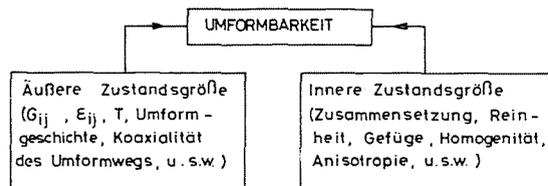


Abb. 1. Gruppierung der Zustandsgrößen, welche die Umformbarkeit beeinflussen

Forschungen ist die Prüfung der Beziehungen zwischen der Umformbarkeit und den äußeren Zustandsgrößen. Dies ist von großer Wichtigkeit, weil es die Grundlage der zur Verbesserung der Umformbarkeit dienenden Werkstoff-Forschungen und der Ausarbeitung von Verfahren zur maximalen Ausnützung der bildsamen Umformbarkeit der Metalle bildet. Die wichtigste Zielsetzung dieser Forschungen ist die Entwicklung von Umformungsdarstellungs- und -prüfverfahren bzw. ihre Vervollkommnung. Kármán und Bridgman haben damit bereits zu Anfang des Jahrhunderts begonnen und mit der Verbreitung der Blechumformverfahren in den sechziger Jahren wurde nach Keeler und Goodwin ein neuer Aufschwung erzielt.

Heute sind zur Darstellung der Umformbarkeit von metallischen Werkstoffen zwei Verfahren verbreitet: das Umformbarkeitsdiagramm und das Grenzformänderungsdiagramm. Im Umformbarkeitsdiagramm wird die Bruchformänderung als Funktion des Spannungszustandsindex dargestellt, das Grenzformänderungsdiagramm enthält dagegen die im Moment des Bruchs (oder der Instabilität) bestehenden Umformungskomponenten. Bei dem Grenzformänderungsdiagramm wird von den äußeren Zustandsgrößen der Spannungszustand betont und zwar deshalb, weil die Blechformung überwiegend ein Kaltformverfahren darstellt und die Formänderungsgeschwindigkeiten sich nicht in einem breiten Feld ändern. Was den Spannungszustand betrifft, ist die Lage vorteilhaft, weil er durch den Parameter η eindeutig gekennzeichnet wird. Die meisten Probleme verursacht hier die Umformgeschichte. Die Koaxialität des Umformweges bildet noch nicht Gegenstand intensiver Forschungen.

Bei beiden Umformungsdarstellungs- bzw. -prüfsystemen scheint sich die Lösung anzubieten, daß man zur Bestimmung der Umformbarkeit ein Prüfverfahren benötigt, welches $\eta = \text{konstant}$ und die Koaxialität des Umformweges sichert. Diese Prüfungen stehen bei Blech- und Massivumformung mehr oder weniger zur Verfügung und werden laufend verbessert. Verschiedene prüftechnische Probleme ($\eta \neq \text{konstant}$, die verwendete Rastergröße, Meßfehler usw.) haben die Anwendbarkeit dieser Methoden öfters in Frage gestellt.

Die vorliegende Arbeit behandelt nur eins dieser weitverzweigten Probleme, die Darstellungsarten der Umformbarkeit.

Das Umformbarkeitsdiagramm und das Grenzformänderungsdiagramm

Die Grenzwerte des bei Massivumformung auftretenden Bruches haben Marciniak und Kuczyński auf Grund ihrer Theorie über die Lokalisierung der Umformung in Scherbänder bestimmt [7]. Die Bruchformänderung wurde im Koordinatensystem der Grenzkurve dargestellt (Abb. 2). Der Theorie zufolge

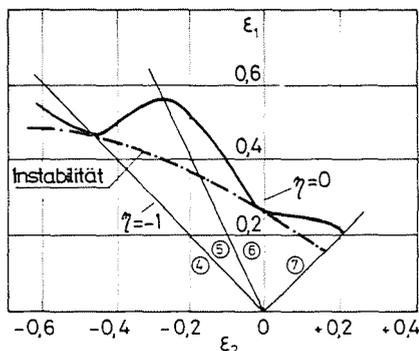


Abb. 2. Die theoretische bestimmte Grenzformänderungskurve von Marciniak und Kuczyński [7]

hat — wie aus Abb. 2 ersichtlich — die Bruchformänderung entlang der Belastungswege $\eta=0$ und $\eta=-1$ lokale Mindestwerte. Der Mindestwert bei $\eta=0$ wird bei Aufnahme der Grenzkurve regelmäßig festgestellt, der Mindestwert bei $\eta=-1$ wird bei Torsionsversuchen beobachtet. Bei diesen Beanspruchungen besteht ein ebener Formänderungszustand. Marciniak und Kuczyński haben gezeigt, daß in diesem Fall die Annahme der Lokalisierung der Formänderung in Scherbänder am günstigsten ist und dies die geringere Umformbarkeit erklärt.

Eine enge Beziehung besteht zwischen den Umformbarkeitsdarstellungsweisen Umformbarkeitsdiagramm und Grenzformänderungsdiagramm. Im ebenen Spannungszustand läßt sich diese Beziehung eindeutig beschreiben. Bei der Annahme eines isotropen Werkstoffes, mit $\eta=\text{konstant}$ und Anwendung der Fließbedingung von Mises und des Fließgesetzes läßt sich der Spannungszustand nach folgender Gleichung berechnen:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_v} = \frac{1 + \alpha}{3\sqrt{1 - \alpha + \alpha^2}} \quad (4)$$

wo:

$$\alpha = \frac{2\eta + 1}{2 + \eta}$$

Die folgende Formel liefert die Vergleichsbruchformänderung:

$$\bar{\epsilon}_{Br} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{1 + \eta + \eta^2} \cdot \epsilon_1 \quad (5)$$

Im Einklang mit der Theorie von Marciniak und Kuczyński bedarf der Charakter des Umformbarkeitsdiagramms einer Modifizierung und die Gestalt wird der Abb. 3 entsprechen [8].

Hauptformänderungen möglichen Varianten des ebenen Formänderungszustandes vorhanden. Abb. 4 zeigt diese Variationen und die auftretenden Scherbänder.

In Abb. 4 ist die Vorderseite der kleinen Würfel die freie Fläche ohne Spannungseinwirkung. In allen drei Fällen entstehen, wie die Abbildung zeigt, äquivalente Scherbänder, lediglich mit verschiedener Orientierung zur freien Fläche. Der Formänderungskennwert $|v|$ ist in allen Fällen identisch und gleich 0. Die festgestellte Verschiedenheit der Bruchformänderung ist dem Einfluß des Spannungszustandes zuzuschreiben.

Unserer Annahme gemäß treten in den Extremfällen der räumlichen Formänderungszustände ($|v|=1$) die in den diese umgebenden ebenen Formänderungszuständen wirkenden Scherbänder gemeinsam auf. Nach Abb. 4 ist es leicht einzusehen, daß in dieser Hinsicht die Lage in den mit $|v|=1$ bezeichneten Formänderungszuständen identisch ist; zu gleichen Werten des Formänderungszustand-Kennwertes gehören unabhängig vom Spannungszustand gleiche Scherbänder-Systeme. Die hierbei aktivierten Scherbänder zeigt Abb. 5.

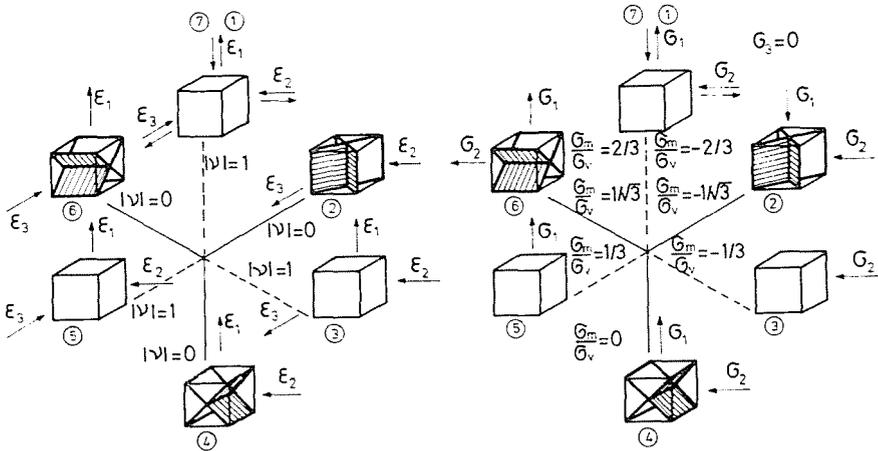


Abb. 4. Die im ebenen Formänderungszustand auftretenden Scherbänder

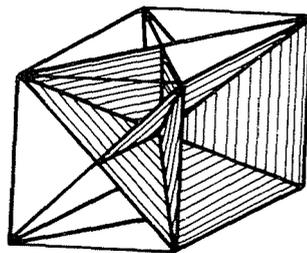


Abb. 5. Modell der im räumlichen Formänderungszustand auftretenden Scherbänder

Darin sieht man, daß im räumlichen Formänderungszustand die Anzahl der Scherbänder die im ebenen Formänderungszustand mögliche Anzahl übertrifft. Daraus folgt, daß die Formänderung schwieriger auf einen einzelnen Scherstreifen lokalisiert werden kann, also der Bruch später erfolgt.

Zur Abb. 3 zurückgreifend können wir feststellen, daß die Kurve für $|v|=0$ hinsichtlich der Lokalisierung der Formänderung am günstigsten und die Kurve $|v|=1$ am ungünstigsten ist.

Zwischen den beiden Extremwerten kann man eine mit $|v|=\text{konstant}$ gekennzeichnete Kurvenschar annehmen. Im ebenen Spannungszustand existieren diese Kurven natürlich nicht, weil zu einem bestimmten Wert von σ_m/σ_v nur ein einziger Wert von $|v|$ gehört.

Wenn man die Bedingung der Gleichwertigkeit der mit dem Kennwert σ_m/σ_v gekennzeichneten Spannungszustände hinsichtlich ihrer Umformbarkeit annimmt, kann man den Einfluß des Formänderungszustandes auf die Umformbarkeit folgendermaßen formulieren. Bei verschiedenen, mit gleichem Spannungszustand-Kennwert gekennzeichneten Spannungszuständen ist die Bruchformänderung im ebenen Formänderungszustand minimal und im räumlichen Formänderungszustand maximal. Im räumlichen Spannungszustand lassen sich die mit der Konstante $|v|$ gekennzeichneten Kurven bestimmen (z. B. mit Torsionsprüfung unter hydrostatischem Druck die Kurve für $|v|=0$).

Zur Kontrolle der in Abb. 3 dargestellten angenommenen Gestalt des Umformbarkeitsdiagramms und des angenommenen Einflusses des Formänderungszustandes auf die Umformbarkeit wurden Versuche vorgenommen.

Prüfmethoden und Geprüfte Werkstoffe

Einachsiger Stauchversuch

Der einachsige Stauchversuch wurde mit dem von Herberth und Wiegels vorgeschlagenen modifizierten Probekörper von Rastegaev vorgenommen [9]. Mit diesem bestand die Möglichkeit, eine Formänderung $\bar{\epsilon} \approx 2$ zu erzielen, mit minimaler Abweichung vom einachsigen Druck (Abb. 6.a).

Torsionsversuch

Bei dem Torsionsversuch ist die Umformung nicht koaxial. Der dementsprechende eventuelle Effekt wurde nicht beachtet. Das ist der einzige der durchgeführten Versuche, bei welchem dies vorkommt (Abb. 6.b).

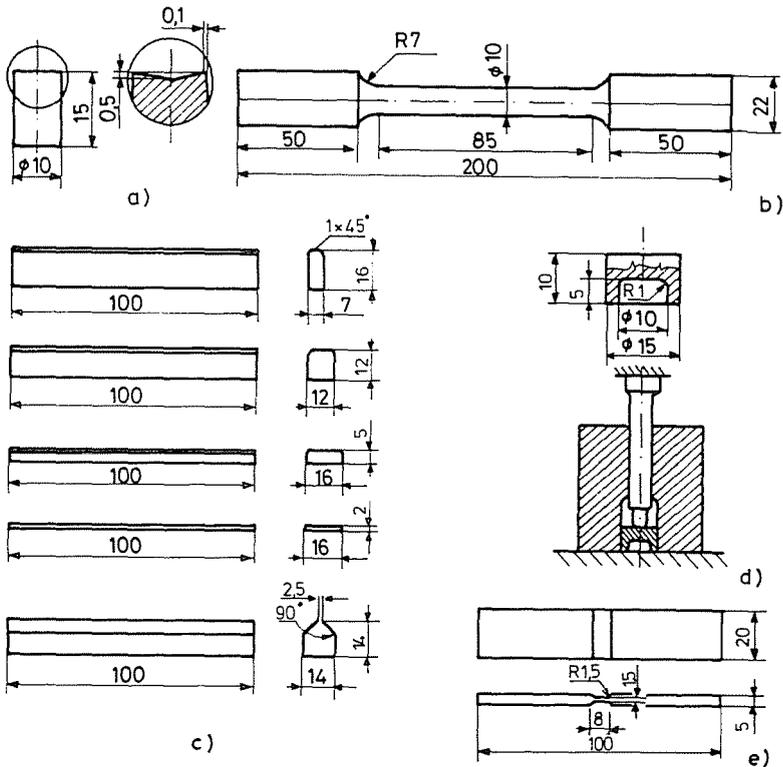


Abb. 6. Die bei den Umformbarkeitsversuchen eingesetzten Probekörper a — Stauchprobekörper, b — Torsions- und Zugprobekörper, c — Biegeprobekörper, d — Druck-Zug-Probekörper und Skizze der Versuche, e — flacher Zugprobekörper

Biegeversuch

Durch Änderung des Breite/Höhe-Verhältnisses eines prismatischen Probekörpers läßt sich im Spannungszustand-Kennwertbereich von $\frac{1}{3} \leq \sigma_m/\sigma_v \leq \frac{1}{\sqrt{3}}$ jeder beliebige Wert erreichen. Biegeprüfungen wurden bei 4—6 verschiedenen Werten des Quotienten B/H vorgenommen. Am Werkstoff Ck 55 wurden auch Biegeversuche mit dem fünfeckigen Probekörper von Marciniak und Kuczyński durchgeführt (Abb. 6.c).

Zugversuche

Zwecks Vergleich mit der Ergebnissen der Biegeversuche wurden Zugversuche mit zylindrischen Probekörpern sowie auch mit den von Clausing empfohlenen flachen gekerbten Probekörpern [10] vorgenommen (Abb. 6.e).

Druck-Zugversuch

Der biaxiale ausgeglichene Zug wurde nach der von Smirnov—Aljajev empfohlenen Weise verwirklicht [11]. Es handelt sich dabei eigentlich um eine Adaptierung des bei Blechprüfungen verwendeten Bulge-Tests (Abb. 6.d).

Die Probekörper wurden vor der Prüfung mit einem 1×1 mm Raster versehen. Zur Druck-Zugversuch bedienten wir uns eines 2×2 mm Rasters. Das deformierte Netz wurde mit einem Werkstattmikroskop mit 30-facher Vergrößerung und 0,01 mm Genauigkeit ausgemessen. Jeder Meßpunkt wurde durch Prüfung von 5—6 Probekörpern bestimmt.

Geprüfte Werkstoffe

Zu den Umformbarkeitsprüfungen verwendeten wir drei Stahlsorten: den unlegierten Stahl Ck 55, den Schnellstahl S 6—5—2 und den Lagerstahl 100 Cr 6. Alle drei Sorten waren Stabstähle. Der Stahl Ck 55 war ein Sechskantstahl im Walzzustand, mit 22 mm Flächenabstand, der Stahl S 6—5—2 war ein weichgeglühter Rundstahl mit 13 mm \varnothing und der Stahl 100 Cr 6 ein solcher mit 16 mm \varnothing . Die chemische Zusammensetzung der untersuchten Stähle zeigt die Tafel 1.

Tafel 1

Die chemische Zusammensetzung der untersuchten Stähle

Material	C	Si	Mn	Cr	P	S	Cu	Ni	W	Mo	V
S 6-5-2	0,85	0,28	0,25	4,16	0,023	0,009	0,10	0,28	6,22	5,05	1,82
100Cr6	1,05	0,23	0,61	1,50	0,014	0,009	0,17	0,01	—	—	—
Ck55	0,55	0,21	0,62	0,08	0,018	0,026	0,13	0,06	—	—	—

Zur Kennzeichnung der mechanischen Eigenschaften zeigen wir in Abb. 7 die mit dem einachsigen Stauchversuch bestimmten Fließkurven.

Zu den Prüfungen wurden relativ schlecht umformbare Werkstoffe gewählt, um mit allen Prüfungen einem Bruch hervorzurufen. Die Einschnürungen der untersuchten Werkstoffe waren: 37% (S 6—5—2), 41% (Ck 55), 62% (100 Cr 6).

Einzelne Abmessungen der Probekörper aus den drei Werkstoffen waren von den in Abb. 6 angegebenen Werten verschieden, doch war der Charakter derselbe.

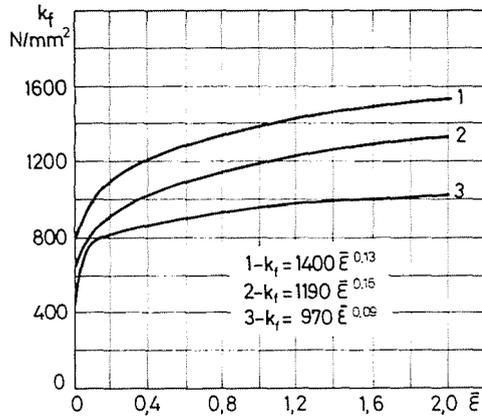


Abb. 7. Fließkurven der untersuchten Stähle
 1 — S 6—5—2, 2 — 100 Cr 6, 3 — Ck 55

Prüfergebnisse und deren Bewertung

Prüfergebnisse

Mit den vorher beschriebenen Versuchen wurden im ebenen Spannungszustand die Umformbarkeitsdiagramme aller drei Stähle ermittelt (Abb. 8—10).

Die Punkte in den Abbildungen entsprechen den Durchschnittswerten der Bruchformänderung. Im Schaubild wurden die Punkte, zwischen welchen kein Meßpunkt vorlag, durch Geraden miteinander verbunden. Die leeren Kreise bezeichnen die Ergebnisse der Zugversuche mit zylindrischen und flachen Probekörpern. Diese dienen nur zu Vergleichszwecken, besonders der zylindrische Zugversuch, bei welcher, wie bekannt, im Einschnürungsabschnitt ein räumlicher Spannungszustand auftritt. In Abb. 8 zeigt der Punkt MK das Ergebnis der fünfkantigen Biegeprobe. Diese ergab — im Gegensatz zu den Ergebnissen von Marciniak und Kuczyński — praktisch dieselbe Bruchformänderung, wie der normale Biegeprüfkörper.

Zum einachsigen Stauchversuch sei noch bemerkt, daß bei dem Werkstoff 100 Cr 6 eine geringe Ausbauchung auftrat, weshalb der Spannungszustand vom einachsigen Druck abwich.

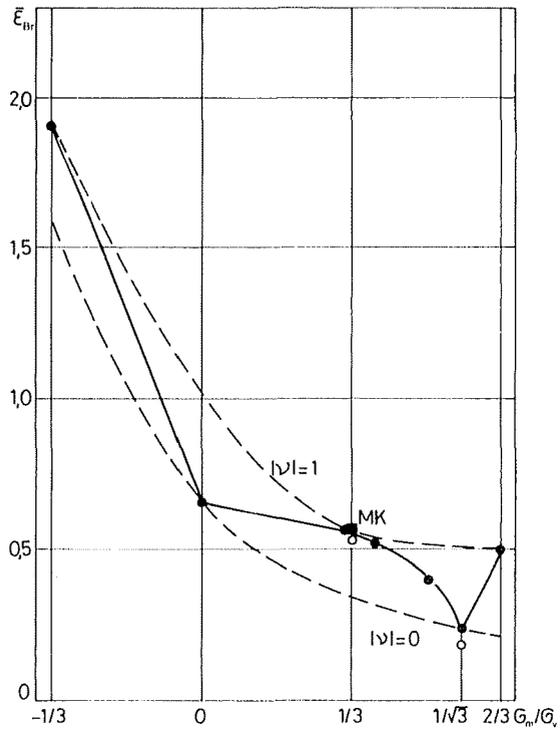


Abb. 8. Umformbarkeitsdiagramm des Schnellstahles

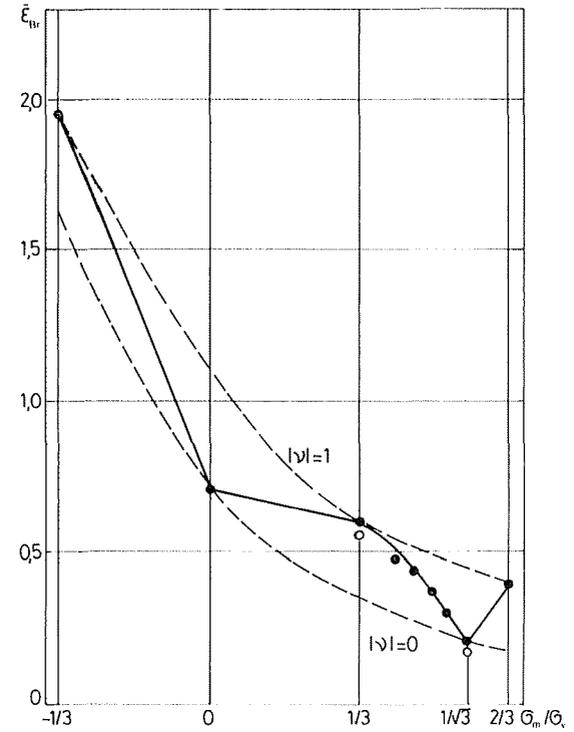


Abb. 9. Umformbarkeitsdiagramm des Schnellstahles

S 6 5 2

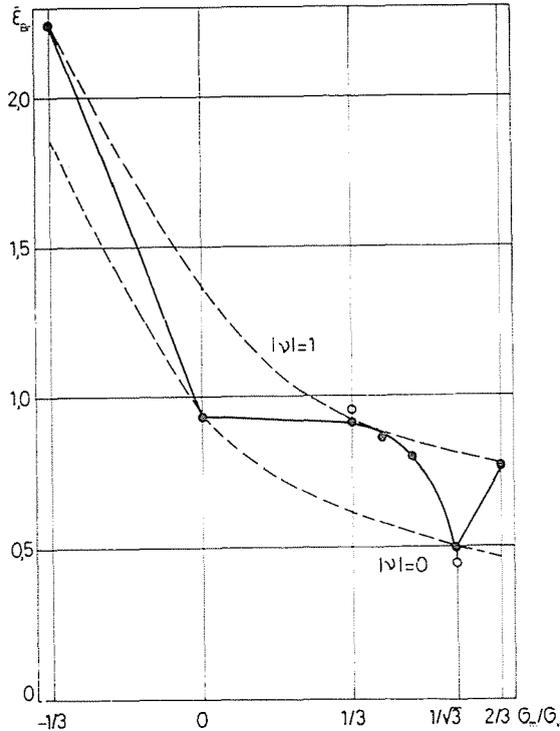


Abb. 10. Umformbarkeitsdiagramm des Lagerstahles 100 Cr 6

Bewertung der Prüfergebnisse

Die vorgenommenen Prüfungen haben die in Abb. 3 graphisch formulierten Annahmen über den Charakter des Umformbarkeitsdiagramms eindeutig bewiesen. Demzufolge kann man auch die Gedankengänge über den Einfluß des Formänderungszustandes auf die Umformbarkeit als experimentell bewiesen annehmen. Dies bedeutet jedoch, daß der Kreis der Zustandsgrößen, welche die Umformbarkeit beeinflussen mit dem Formänderungstensor ε_{ij} erweitert wird; man kann also folgenden Ausdruck schreiben

$$\bar{\varepsilon}_{Br} = f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}, T, A) \quad (7)$$

Auf Grund der Ergebnisse kann man eine begründet erscheinende Annahme über den Charakter des Umformbarkeitsdiagramms im ganzen Bereich des ebenen Spannungszustandes aufstellen (Abb. 11).

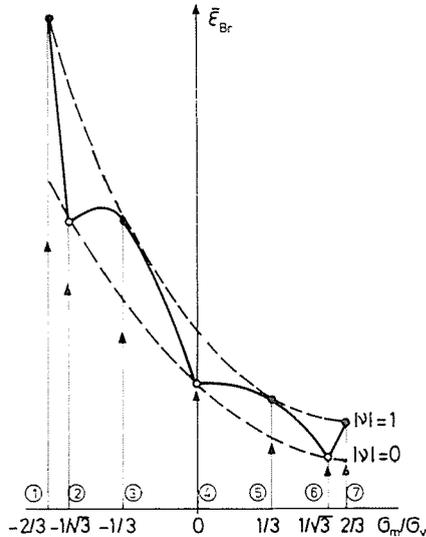


Abb. 11. Angenommene Gestalt des Umformbarkeitsdiagramms in ganzen Bereich des ebenen Spannungszustandes

Die in Bild 11 bezeichneten zwei weiteren Bruchpunkte $\left(\sigma_m/\sigma_r = -\frac{1}{\sqrt{3}}\right)$ und $-\frac{2}{3}$ lassen sich zurzeit mit bekannten Prüfungen leider nicht bestimmen.

Zusammenfassung

Die Umformbarkeit der metallischen Werkstoffe bildet ein äußerst weitverzweigtes Problem. Die Prüfungs- und Darstellungsarten der Umformbarkeit gehören nur zu einem Zweig dieses Problems.

In der vorliegenden Arbeit wurde der früher übliche Charakter des Umformbarkeitsdiagramms auf Grund der Theorie von Marciniak und Kuczyński über die Lokalisierung der Formänderung in Scherbänder und der Meßerfahrungen modifiziert.

Der Kreis der äußeren Zustandsgrößen, welche die Umformbarkeit beeinflussen, wurde um ein neues Glied – den Formänderungszustand – erweitert, zu dessen numerischer Kennzeichnung der Absolutwert des Lode-Parameters (6) eingeführt wurden.

Zur Bestätigung der Beziehung zwischen der Umformbarkeit und dem Formänderungszustand wurden mit drei verschiedenen Stählen Umformbarkeitsversuche vorgenommen.

Auf Grund der Versuchsergebnisse wurde eine Annahme über den Charakter des Umformbarkeitsdiagramms im ganzen Bereich des ebenen Spannungszustandes formuliert.

Die für den ebenen Spannungszustand geltenden Annahmen wurden unter der Bedingung der Gleichwertigkeit des Spannungszustand-Kennwertes bezüglich der Umformbarkeit auch auf räumliche Spannungsverhältnisse ausgedehnt.

Eine Hypothese über die in verschiedenen Formänderungszuständen auftretenden Scherbänder-Systeme wurde formuliert.

Literatur

1. MAIER, A. F.: Diss. TH Aachen 1934
2. NAKAZIMA, K.—KIKUMA, T.—HASUKA, K.: Yamata Tech. Rep.,(1968) Nr. 264. 8517
3. GRUMBACH, M.—SANZ, G.: Mem. Sci. Rev. Met., 71 659 (1974)
4. MÜSCHENBORN, W.—SONNE, H—M.: Arch. Eisenhüttenwes., 46 9. 597 (1975)
5. DEGUEN, M.—PARNIERE, P.—SANZ, G.: CIT, (1979) 5. 721
6. HSÜ, T. C.: Int. J. Prod. Res., 12 99 (1974)
7. MARCINIAK, Z.—KUCZYŃSKI, K.: Int. J. Mech. Sci. 21 609 (1979)
8. SZEGHEGYI Á.—DARVAS Z.: Berg- und Hüttenmännischer Tag, Freiberg 1980
9. HERBERTZ, R.—WIEGELS, H.: Stahl und Eisen, 101 89 (1981)
10. CLAUSING, D. P.: Int. J. of Fracture Mech. 6 71 (1970)
11. SMIRNOV—ALJAJEV, G. A.: Mechanitscheskie osnovy plastitscheskoj obrabotki metallov. Maschinostroenie 1968

Dr. Zoltán DARVAS H-1509 Budapest Pf 14.