

Betrachtungen zur Ausbildung von plastischen Verformungen bei dreiaxigem Spannungszustand

Voicu Safta

Dr. Ing. V. Safta Leiter der Abteilung Werkstoffprüfung
im Forschungszentrum für Schweißtechnik
und Werkstoffprüfung Timișoara

1. Allgemeine Betrachtungen

Im Rahmen der Arbeit wurde der dreiaxige Spannungszustand $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$, mit V-Kerben, deren Profil gleich dem hyperbolischen Kerbprofil ist, zustande gebracht; die geometrische Form des Kerbprofils ist in Fig.1 gegeben. Für die theoretische und experimentelle Untersuchung der Ausbildung plastischer Verformungen wurde eine Längsebene angenommen, wobei die Wahl des Koordinatensystems mit Rücksicht auf die Hauptrichtungen des Deformationstensors im kleinsten Querschnitt der Kerbe erfolgte.

2. Theoretische Überlegungen

Aufgrund der Beziehung von H. Neuber [1] für die Formzahl

$$\alpha_k = (\alpha_\sigma \cdot \alpha_\epsilon)^{1/2} \quad (1)$$

worin α_σ und α_ϵ die Formzahlen der Spannungen bzw. der Dehnungen im plastischen Bereich in Richtung L darstellen sowie unter Annahme einer verallgemeinerten Form der von V. WEISS [2] vorgeschlagenen Beziehung für die Änderungen der Normalspannung an der Kerbspitze im Bereich elastischer Verformungen, erhält man den Ausdruck

$$\alpha_k = \frac{\alpha_{k \max}}{1 + c(K, \lambda)} \quad (2)$$

worin K und λ die Bedeutung aus Fig.1 haben, während c eine von der Höhe der Kerbwirkung und dem Ausmasse der Verformung abhängige Konstante ist.

Anhand der Exponentialbeziehung für das wahre Spannungs-Dehnungs-Diagramm

$$\sigma_n = \sigma_0 \cdot \epsilon_n^m \quad (3)$$

und mit Rücksicht auf Beziehungen (1) und (2), ergibt sich für die spezifische Dehnung in Längsrichtung im plastischen

Bereich :

$$\epsilon_{Lp} = \epsilon_n \left[\frac{\alpha_K \max}{1 + c(K \cdot \lambda)} \right]^{\frac{2}{m+1}} \quad (4)$$

Auf ähnliche Weise kann der entsprechende Ausdruck für die Dehnung in radialer Richtung ϵ_{Rp} hergeleitet werden.

3. Methodologie der experimentellen Untersuchungen

Die Methodologie der experimentellen Untersuchungen beruht auf die Überlegung, dass die Ferritkristalle mit fortschreitender Verformung im höchstbeanspruchten Volumen Gefügeänderungen erfahren [3], [4], (Fig.2). Der Ausmass dieser Änderungen ist von der angebrachten Spannung und der Mehrachsigkeitszahl des Spannungszustandes im betrachteten Bereich abhängig, der seinerseits durch die Grösse der Formzahl α_K und der Lage im kleinsten Querschnitt λ im Verhältnis zur Symmetrieachse der Probe bestimmt ist.

Unter der Annahme, dass in verhältnismässig begrenzten Abschnitten in den Hauptrichtungen keinerlei Rotation stattgefunden hat, erhält man :

$$\epsilon_L = \frac{h_L - h_R}{\mu h_L + h_R} \quad (5)$$

und auf gleiche Weise einen ähnlichen Ausdruck für ϵ_R . Die Bedeutung der Indizes für die Korngrösse ist aus Fig.2 ersichtlich; μ ist die Poissonzahl.

Zur Korngrössenbestimmung wurde das Gitterverfahren, mittels eines aus 8 bis 10 äquidistanten, senkrecht angeordneten Linienpaaren gebildeten Gitters herangezogen, wobei der Abstand zweier aufeinanderfolgenden Linien 0,020 mm war. Der grösste Messfehler betrug $\pm 1\%$. Messergebnisse, die erhebliche Abweichungen zeigten, wurden mit Hilfe des Chauvenet-Verfahrens eliminiert. Die Messungen erfolgten in 5 verschiedenen Bereichen im kleinsten Querschnitt der Proben, unter jeweils 5 verschiedenen Verformungszuständen, von $\psi/Z = 0,025$ bis 0,960.

4. Versuchsergebnisse. Analyse und Bewertung

Anhand der Ergebnisse wurden die Raumdiagramme der Funktionen $\varphi_1(\epsilon_L, \psi/Z, \lambda)$ bzw. $\varphi_2(\epsilon_R, \psi/Z, \lambda)$ für verschiedene Werte des Parameters α_K aus Fig.1 gezeichnet. Durch Projek-

tion derselben in der $\epsilon \Delta \lambda$ konnten die Kurvenscharen $\epsilon_L = f_1(\lambda)$ bzw. $\epsilon_R = f_2(\lambda)$ dargestellt werden, mit der Verhältnis ψ/Z als Parameter. Zur Veranschaulichung sind in Fig.3 die Funktionen φ_1 für $\alpha_K = 2,7$ und in Fig.4 die Abhängigkeiten f_1 für $\alpha_K = 1,0$; 2,7 bzw. 4,4 wiedergegeben. Ihre Analyse liefert ein aufschlussreiches Bild der Verteilung der Verformungen im Querschnitt sowie ihrer Ausbildung in verschiedenen Deformationszuständen. Zum Unterschied von den Kerbstäben beobachtete man bei den Proben mit $\alpha_K = 1,0$ eine konvergente Deformationsverteilung, während bei den Proben mit $\alpha_K = 1,1 - 1,3$ die Deformationsänderungen im Querschnitt unterhalb von 5% bleiben, wahrscheinlich infolge des sich bei diesen Werten einstellenden Gleichgewichtes zwischen der Kerbwirkung und der gegensinnigen Wirkung der Einschnürung.

Wird der zeitliche Ablauf der Deformationen (abhängig von ψ/Z) verfolgt, so kann allgemein eine beschleunigte Ausbildung beobachtet werden. Dieser Vorgang vollzieht sich im gesamten Querschnitt, und ist bei abgeschlossener Formänderung am deutlichsten. Ausgenommen sind von dieser allgemeinen Ausbildung die plastischen Zonen an der Kerbspitze, wo bei einer gewissen Höhe der Verformung eine Stabilisierung des Vorganges stattfindet.

5. Gegenüberstellung der Ergebnisse

Für den Vergleich der Ergebnisse wurde zunächst die Konstante bestimmt. Zu diesem Zweck wurde die folgende Beziehung

$$c(a-r) = \rho \left[\frac{\alpha_K \max}{\left(\frac{\epsilon_L}{\epsilon_n} \right)^{\frac{m+1}{2}} - 1} \right] \quad (6)$$

herangezogen, indem die jeweiligen Glieder durch Effektivwerte, der betrachteten Verformungsphase ψ/Z entsprechend, ersetzt wurden. Auf diese Weise konnte die Änderungen des Kerbprofils infolge der Verformung berücksichtigt werden [5]. Der Wert der Verfestigungszahl m wurde durch Auftragung der wahren korrigierten Werkstoffkennlinie - mit Hilfe eines Photoverfahrens - in einem doppeltlogarithmischen Koordinatensystem ermittelt. Die Ergebnisse sind in Fig.5 wiedergegeben.

Die Punkte in Fig.6 veranschaulichen einen Vergleich zwischen den experimentellen und den theoretischen Ergebnissen für Kerben mit $\alpha_K > 2,7$. Es ist eine gute Übereinstimmung zu erkennen, indem die Versuchspunkte rechts und links der um 45° geneigten Geraden, in einem annehmbaren Streubereich liegen. Der Korrelationstest ergab $r = 0,97$. Bei kleineren Werten von α_K verliert Beziehung (4) ihre Gültigkeit, weil die Kerbform von den Annahmen, die der Ableitung der Grundbeziehungen vorausgeschickt wurden, zu sehr abweicht.

LITERATUR

1. H.Neuber(1961): Journal of Applied Mechanics,12,550
2. V.Weiss (1971): In „Fracture“.Ed.by H.Liebowitz,v.3, Academic Press,New-York,London,233
3. V.Safta (1969): Rev.Roum.sci.techn.-Métallurgie,Ed.de l'Acad.de la RSR,Bucuresti,v.14.2.208
4. V.Safta,A.Bernath(1965): Rev.Roum.sci.techn.-Métallurgie, Ed.de l'Acad.de la RSR,Bucuresti,v.11,1,71
5. V.Safta (1971): Materialprüfung,v.13,11,378

CONTRIBUTIONS TO THE EVOLUTION OF PLASTIC DEFORMATIONS UNDER MULTI-AXIAL STRESSES

- Abstract -

The investigations have supplied a conclusive picture of the evolution of plastic deformations to fracture in specimens subjected to multi-axial convergent stresses, embodied by V-notches equivalent to the theoretical notch shape.

In view of a quantitative analysis of the components of the tensor of deformations, a technique based on a microstructure model - grain size and microhardness measurements (Fig.2) - was developed, by which both the local distribution of the longitudinal and transverse deformations in the sections and their evolution depending on the total deformation ψ/Z were ascertained (Fig.3 and 4).

It is shown that relation (4), derived on base of theoretical and experimental considerations on the stress and strain concentration with elastic and plastic behaviour of materials, can be experimentally validated for notches with $\alpha_K > 2,5$. (Fig.6).

