

# Bestimmung bruchmechanischer Kennwerte durch den instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch

G. Vasoukis, Siemens AG, Reaktortechnik Erlangen, Deutschland

Determination of Fracture Toughness Values by Means of Instrumented Notched Bar Impact Tests

## Summary

The absorbed energy as well as the effect of temperature on the absorbed energy during the recording of load - displacement diagrams for notched bar - impact tests of mild steel, Ck 10, Ck 35, Ck 45, Ck 60 und C 85 W2 in normalized condition were analysed. Considerable relations between discontinuity of characteristic loads and displacements and irregularities of absorbed energy-temperature curves were obtained.

From these investigations one can define characteristic temperatures, which are not arbitrary, but physically founded and describe the behaviour of materials in different temperature-ranges. These characteristic temperatures, above all, the crack arrest temperature could also be defined by fractographical and microfractographical investigations.

The absorbed energy-temperature curves were also determined arithmetically by a simple method of area computation of load displacement diagrams. Therefore, it can be made sure that the available curves are correct and determined on principle of physics.

Further it is shown that also the fracture toughness can be derived from the results of the instrumented notched bar impact tests.

## 1. Einleitung

Zur Beurteilung der Spröbruchneigung ist man bestrebt, trotz der vielen anderen Prüfverfahren die Aussagefähigkeit des wegen seiner Einfachheit noch immer bevorzugten Kerbschlagbiegeversuches voll auszuschöpfen. Hierzu bedarf es einer grundlegenden Analyse des Versuches, durch

die Aufnahme von Kraft-Weg-Diagrammen und mikrofraktographische Untersuchungen [1]. Durch die Instrumentierung des Kerbschlagbiegeversuches ist seine Aussagefähigkeit in Bezug auf das Werkstoffverhalten umfangreicher als durch die Angabe des integrierten Wertes der verbrauchten Schlagarbeit.

## 2. Analyse des Kerbschlagbiegeversuches

Die Voraussetzung einer fundamentalen Aussage ist die genaue Messung der Kraft und der Durchbiegung. Als Maß für die Güte und Genauigkeit der gesamten Kraft-Weg-Messungen wird die Differenz der planimetrierten Arbeit Abb. 1 und der am Schalgwerk abgelesenen Schlagarbeit gewertet. Diese Differenz ist für die Anlage der MPA-Stuttgart, Abb. 2 kleiner als  $\pm 0,2$  mkp, wobei darin sowohl der Ablesefehler am Schlagwerk als auch der Planimetrierfehler enthalten sind.

## 3. Ergebnisse (Kerbschlagzähigkeit, Kraft, Weg, Verformungsbruchtiefe, Übergangstemperatur)

Ausgehend von der Messung des Kraft- und Wegverlaufes beim Kerbschlagbiegeversuch wird mit Hilfe der ermittelten Kraft-Weg-Diagramme, (Abb. 1) die Kerbschlagzähigkeit und der Verlauf der Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurve analysiert (Abb. 3). Dabei ergeben sich deutliche Zusammenhänge zwischen den Unstetigkeiten im Verlauf der charakteristischen Kraft- und Weggrößen der Kraft-Weg-Diagramme und den Unregelmäßigkeiten des Verlaufes der Kerbschlagzähigkeit. Der Verlauf der Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurven wird auch rechnerisch aufgrund einer einfachen Modellvorstellung des Kraft-Weg-Diagrammes aus Kraft und Weg bestätigt. Der Verlauf kann damit als physikalisch gesichert betrachtet werden.

Davon ausgehend können auch charakteristische Temperaturen definiert werden, die nicht willkürlich, sondern physikalisch begründet sind und die das Werkstoffverhalten in verschiedenen Temperaturbereichen beschreiben. Diese Temperaturen sind auch mikrofraktographisch begründet,

(Abb. 4). Die makro- und mikrofraktographische Untersuchung der Bruchflächen liefert Merkmale der verschiedenen Brucharten und führt zu einer Einteilung der Brüche nach makroskopischen und mikroskopischen Gesichtspunkten, Abb. 5. Eine besondere Stellung kommt dem Verhalten des Kerbgrundes zu, da der Bruch von dort bzw. in der Nähe ausgeht. Im Kerbgrund findet auch bei den tiefsten angewandten Temperaturen ( $-196$  °C) noch mikroplastische Verformungen statt, Abb. 4. Auch jede Spröbruchfläche enthält inselartige lokale Verformungsbrüche.

## 4. Bestimmung der Bruchzähigkeit

Die Anwendung der Bruchmechanik auf Stähle niedriger Festigkeit wird erschwert durch die Einhaltung elastischer Beanspruchung. Wells [2] hat erkannt, daß man die Bruchmechanik auch auf Brüche von gekerbten Proben anwenden kann, die erst nach Überschreiten der Bauteilfließgrenze ("General Yield") eintreten.

Er ging dabei von der freiwerdenden Energie bzw. der Spannung an der Rißspitze aus, die bei einem Werkstoff mit ausgeprägter Fließgrenze und ebenem Spannungszustand durch die Streckgrenze  $\sigma_s$  und die Rißöffnung  $\delta$  ("Crack Opening Displacement" C.O.D.) bestimmt ist.

Fearneough und Nichols [2] haben die Gedanken von Wells auf Charpy-Proben angewandt. Dabei gilt unter Annahme eines ebenen Spannungszustandes die Beziehung  $K_{C_D} = \sqrt{\sigma_{sd} \cdot \delta \cdot E}$  wobei E das Elastizitätsmodul ist.

Die dynamische Streckgrenze  $\sigma_{sd}$  kann man abschätzen, indem man die gemessene statische Streckgrenze  $\sigma_s$  um einen Betrag, basierend auf den Ergebnissen von [3], erhöht. Die Rißöffnung konnte bei den Versuchen [1] nicht gemessen werden. Nimmt man eine lineare Beziehung zwischen Rißöffnung  $\delta$  und Biegewinkel  $\theta$  [4] ( $\theta$  bestimmt durch die gemessene Durchbiegung) an, so kann man  $K_{C_D}$  bis auf eine Konstante bestimmen Abb. 6 (hier wurde die dynamische Streckgrenze aus der Bauteilfließkraft und unter der Annahme, daß bei dieser Kraft der vollplastische Zustand erreicht wird und die Spannungsverteilung ideal plastisch ist, erhalten). Um diese Konstante zu bestimmen werden z. Zt. folgende Ver-

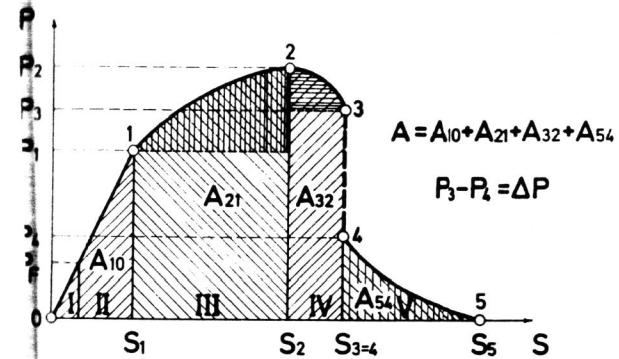
suche durchgeführt:

1. Bestimmung der Abhängigkeit zwischen Rißöffnung und Biegewinkel
2. Messung von statischen  $K_{IC}$ -Werten mit Hilfe von Verbundproben, da das Material nur in Form von Kerbschlagbiegeproben vorhanden ist.
3. Messung von dynamischen  $K_{IC}$ -Werten mit Hilfe von angeschwungenen Kerbschlagbiegeproben im instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch.

Mit Hilfe der ermittelten Konstante kann die Bruchzähigkeit aus den Ergebnissen des instrumentierten Kerbschlagbiegeversuches bestimmt werden und folgende Funktionen können aufgestellt werden  $K_C = f(T)$ ,  $K_C = f(A)$ ,  $A = f(x)$  (wobei  $T$  = Temperatur,  $A$  = verbrauchte Schlagarbeit,  $x$  = Verformungsbruchtiefe bedeuten), die eine Möglichkeit darstellen, durch Werte aus dem einfachen Kerbschlagbiegeversuch die Bruchzähigkeit zu bestimmen (Korrelation).

#### Literatur

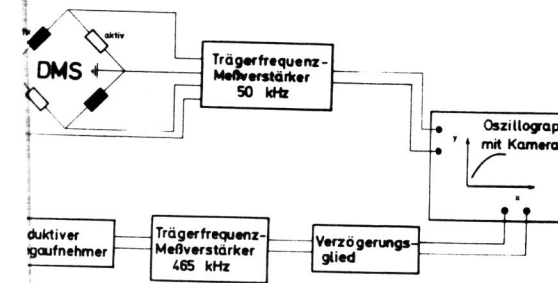
- [1] Vasoukis, G., Fraktographie und Analyse des Kerbschlagbiegeversuches ein Beitrag zur Frage des Sprödbruchs und zur Bruchmechanik der unlegierten Stähle, Techn.-wiss. Ber. MPA Stuttgart (1971), Heft 71-01
- [2] Fearneough, G.D., R.W. Nichols, Fracture Mechanics Considerations in the Charpy Impact Test, The International Journal of Fracture Mechanics, Vol 4, No. 3, September 1968
- [3] Russel, D., Untersuchungen zum Streckgrenzen- und Bruchverhalten ferritischer Stähle bei dynamischer Beanspruchung im Bereich tiefer Temperaturen, Diss. T.H. Aachen 1971.
- [4] Wilshaw, T.R., Deformation and Fracture of Mild Steel Charpy Specimens, Journal of the Iron and Steel Inst. 204, 1966, p. 936-942.



Schema eines Kraft-Weg-Diagrammes beim Kerbschlagbiegeversuch im Mischbruchgebiet

Abb. 1

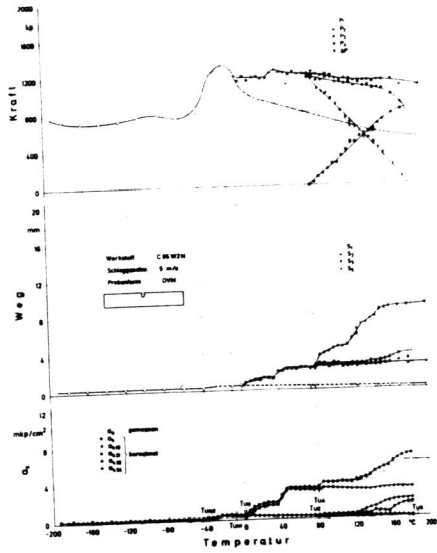
#### Kraftmessung



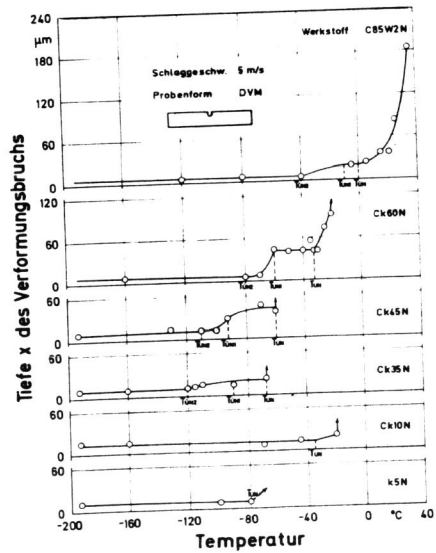
#### Dehnungsmessung

Anschlußordnung für die Kraft- und Dehnungsmessung

Abb. 2

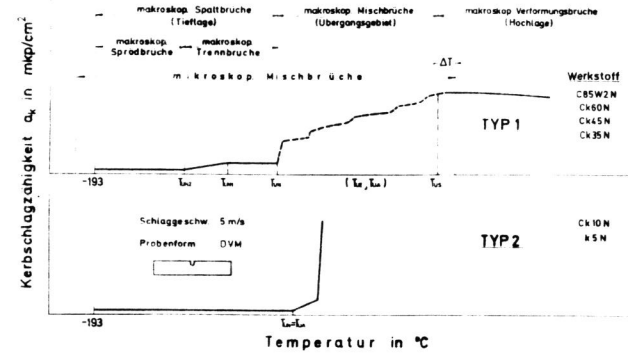


Analyse des Kraft-Weg-Verlaufs und der Kerbschlagzähigkeit, Werkstoff C 85 W 2 B



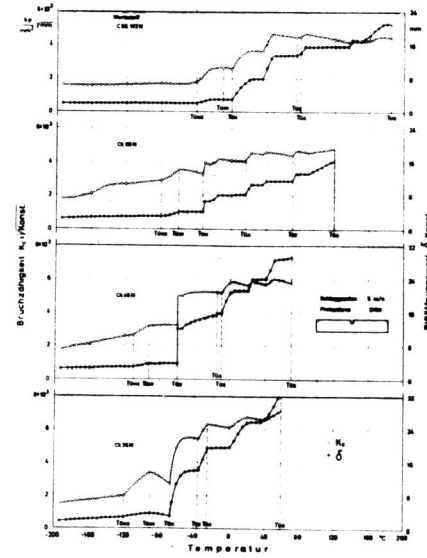
Mikrofraktographische Analyse des Bruchverhaltens von Kerbschlagbiegeproben im Kerngrund im Spaltbruchgebiet

Abb. 3



Schematischer Verlauf von Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurven und Brucharten

Abb. 5



Verlauf der Bruchzähigkeit und des Dehnungswertes von Kerbschlagbiegeproben

Abb. 6