

## Besonderheiten der Deformation und des Bruches von faserverstärkten Verbundwerkstoffen

Ivanov V. S., Kopjev I. M., Busalov J. E.  
A. A. Baikov Institut für Metallurgie. Moskau

**Abstract.** The experimental evidence of the fracture of the different types of the fibre-reinforced composites is investigated. The dependence of the fracture mechanisms on the strain-hardening characteristics of the matrix is shown.

Auf der Grundlage von Literaturangaben und eigenen Untersuchungen werden einige spezifische Besonderheiten der Deformation und des Bruches grundlegender Typen von Verbundwerkstoffen untersucht. Es werden folgende Effekte beim Bruch von Verbundwerkstoffen analysiert: die ungeordnete Zerstörung von Fasern, der geordnete Bruch in definierte Fasersegmente, das mehrfache Bilden von Einschnürungen, das Zerbrechen in definierte-Matrixsegmente.

In der vorliegenden Mitteilung werden auf der Grundlage von Literaturangaben und eigenen Untersuchungen einige spezifische Besonderheiten der Deformation und des Bruches der folgenden grundlegenden Verbundwerkstofftypen betrachtet:

1. Spröde Matrix -spröde Faser
2. Plastische Matrix-spröde (quasispröde) Faser
3. Plastische Matrix -plastische Faser
4. Spröde Matrix -plastische Faser

### Verbundwerkstoffe mit spröder Matrix und spröder Faser

Verbundwerkstoffe vom Typ "Spröde (quasispröde) Matrix-spröde Faser" sind charakteristisch für Werkstoffe, die aus einer polymeren-oder keramischen Matrix mit hochfesten steifen Fasern gebildet werden.

Bei Belastung von Verbundwerkstoffen dieses Types erfolgt der Bruch über eine Anhäufung einer kritischen Zahl von Defektstellen, die mit dem Bruch von einzelnen Fasern und defekten Matrix-gebieten verbunden sind. So,

wie die spröden Fasern eine große Schwankung in der Festigkeit aufweisen, ist auch die Deformationskurve des Verbundwerkstoffes mit der Verteilungsfunktion der Faserfestigkeit verbunden. Der Prozeß der Ansammlung einer bestimmten Menge zerstörter Zonen unterliegt statistischen Gesetzen. Der statistische Zugang zur Berechnung des Widerstandes gegen Rißausbreitung in Verbundwerkstoffen unter Berücksichtigung von zwei bei der Verformung auftretenden Prozessen - dem Anhäufen von zufälligen Faserbrüchen und der Rißausbreitung in der Matrix - erwies sich in einer Reihe von Fällen als richtig [1,2].

Verbundwerkstoffe mit plastischer Matrix und spröden (quasispröden) Fasern

Dieser Typ von Verbundwerkstoffen umfaßt eine große Zahl von Verbundwerkstoffen mit metallischer Matrix. Bei Verbundwerkstoffen dieses Types werden in Abhängigkeit vom Volumenanteil zwei Typen des Bruches beobachtet: Bruch mit geordneter Zerkleinerung der Fasern im Fall einer verfestigenden Matrix, Zerstörung mit einem einmaligen Zerbrechen der Fasern (im Fall einer nichtverfestigenden Matrix).

In allgemeiner Form [3] er gibt sich als Bedingung für den gleichzeitigen Bruch von Faser und Matrix bei unterschiedlicher Bruchdehnung der Komponenten  $\epsilon_1 > \epsilon_2$

$$\sigma_1 \nu_1 < E_1 \nu_1 \epsilon_2 + \sigma_2 \nu_2$$

Die Bedingung für die Zerkleinerung der spröden Phase nimmt die Form

$$\sigma_1 \nu_1 > E_1 \nu_1 \epsilon_2 + \sigma_2 \nu_2$$

an, wobei der Index 2 der spröden und der Index 1 der plastischeren Phase entsprechen,  $\sigma_1, \sigma_2, \nu_1$  und  $\nu_2$  sind die Festigkeiten der Komponenten und ihre entsprechenden Volumenanteile. Die Analyse der Bedingung für die Zerkleinerung zeigt, daß die Zerkleinerung der Fasern in Segmente einer minimalen Länge  $(\Delta l)_{min} = l_c$ , mit  $l_c$  als der kritischen Faserlänge, bei Volumenanteilen

kleiner als dem kritischen Volumen und bei gegebener Verfestigungsfähigkeit der Matrix stattfindet. Zwischen der Zahl der mehrfach zerkleinerten Segmente ( $N$ ), der Anzahl von Zerkleinerungszyklen ( $n$ ) und den Verstärkungsparametern besteht der Zusammenhang [4,5]

$$N = \frac{8}{3} \frac{l_f \tau}{G_f d_f} \dots (1)$$

$$n = 1 + 3,3 \lg \left[ \frac{4}{3} \frac{l_f \tau}{G_f d_f} \right] \dots (2)$$

Die minimale Segmentlänge bestimmt sich nach

$$\Delta l_{min} = \frac{3}{8} \frac{G_f d_f}{\tau} \dots (3)$$

wobei  $l_f \tau$  die Faserlänge am Anfang der Zerkleinerung der Fasern und Bindungskraft zwischen Faser und Matrix sind.

Gleichung (2) kann als Abschätzung für die Bindungsfestigkeit an der Faser-Matrix-Grenzschicht verwendet werden [6]. Der Prozeß der geordneten Zerkleinerung der Fasern wird durch eine Umverteilung der Zugspannungen bei der Segmentbildung bedingt, wobei in der Segmentmitte eine maximale Zugspannung erreicht wird. Das ist möglich, wenn die Matrix sich bei der Deformation verfestigt. Bei nicht verfestigenden Matrices wird die Zerkleinerung von Fasern im Verbund nicht beobachtet. Es wurden Versuche an Verbundwerkstoffen von Mg - Li - Legierungen mit hochfesten Stahldrähten durchgeführt. Magnesiumlegierungen mit 8 Gewichtsprozenten besitzen eine geringe Verfestigung. Die Untersuchung von Proben nach Dehnung mit Röntgendurchstrahlung zeigte, daß eine Zerkleinerung von Fasern fehlte und die Proben durch eine einzige Einschnürung zerstört wurden. An der Einschnürungsstelle näherten sich die Drähte einander.

Verbundwerkstoffe von plastischer Matrix mit plastischen Fasern

Eine interessante Besonderheit der Deformation dieser Verbunde ist das Auftreten von mehrfachen Einschnürungen.

Mehrfache Einschnürungen wurden detailliert am Verbund Nickel-Wolfram untersucht [8,7] untersucht, der mit der Methode des Walzens unter Vakuum erhalten wurde. Die Experimente zeigten, daß bei Verformung des Verbundwerkstoffes bei höheren Temperaturen (400-600°C) schon bei relativ kleinen Anfangsdehnungen an der Probe und der Faser Einschnürungen gebildet werden, ihre Anzahl und das Ausmaß der lokalen Deformation jeder Einschnürung wächst mit Vergrößerung des Deformationsgrades der Probe, die Probe und die Faser nehmen eine Bambusstruktur mit etwa gleichen Abständen der Einschnürungen an. Beim Entstehen einer  $W/N_0$ -Phase mit der Dicke von 10-15 µm an der Grenzschicht nimmt die Deformationskurve eine gezackte Struktur an und es wird eine Zerkleinerung der Drähte festgestellt.

Einschnürungen bilden sich im Mittelabschnitt des Drahtes, solange die Drahtlänge nicht die kritische Länge unterschreitet, daraufhin erfolgt der Bruch des Verbundwerkstoffes. Der Abstand zwischen den Einschnürungen ist etwa gleich der kritischen Länge  $l_c$ .

Die erhaltenen Werte stimmen mit den am Verbund Messing-Wolframdraht erhaltenen [9] überein. Der minimale Abstand zwischen den Einschnürungen bestimmt sich nach

$$(l_c)_{\min} = \frac{3}{8} \frac{G \cdot d_f}{\tau} \quad \dots(4)$$

Diese Gleichung ist das Analogon zu Gleichung (3). Mit der Erscheinung der Einschnürungsbildung erklärt sich in gewissem Maße die Erhöhung der Plastizität der Fasern in der Matrix, im Vergleich zur Deformation des isolierten Drahtes, und folglich die hohe Plastizität gleichartiger Verbundwerkstoffe. Der Prozeß der Einschnürungsbildung in plastischen und quasispröden Fasern ist nur im Fall einer verfestigungsfähigen Matrix möglich.

#### Verbundwerkstoffen mit spröder Matrix und plastischen Fasern

Zu Verbundwerkstoffen dieses Types gehören Werkstoffe

auf der Basis von polymeren oder keramischen Matrices, verstärkt mit plastischen Metalldrähten oder Fasern. Eine Besonderheit des Bruches dieser Verbundwerkstoffe ist die Zerkleinerung der spröden Matrix in kleine Blöcke, deren Durchmesser mit den Verstärkungsparametern folgen dermaßen verbunden ist [3, 10]

$$S = \frac{1-V_f}{V_f} + \frac{\sigma_m \lambda}{2\tau} \quad \dots(5)$$

wobei  $\tau$  die Bindungsfestigkeit an der Grenzschicht Faser-Matrix,  $\lambda$  den Faserradius,  $\sigma_m$  die Matrixgrenzfestigkeit und  $V_f$  den Volumenanteil an Fasern darstellen.

Die betrachteten Verbundwerkstofftypen umfassen die grundsätzlichen Formen von Verbundwerkstoffen. Die Analyse des Faserbruches bei Deformation des Faserwerkstoffes zeigte, daß seine Erscheinungsform von dem Charakter der Übertragung der Zugspannung auf die Fasern im Prozeß der Verformung abhängt. Diese Spannungsübertragung ihrerseits wird durch die Verfestigungsfähigkeit der Matrix bestimmt. Im Fall einer verfestigungsfähigen Matrix werden maximale Zugspannungen immer in der Fasermitte erreicht, wobei im Fall spröder Fasern diese in zwei Teile zerbrechen und anschließend eine Spannungsverteilung erfolgt, während bei plastischen Fasern an den Orten maximaler Zugspannungen Einschnürungen (mit nachfolgender Spannungsverteilung) entstehen.

#### Literatur

1. B.W. Rosen J. Am. Inst. Aero Astron, 1964, 2, November, p. 1985.
2. C. Zweben, B.W. Rosen, J. Mech. Phys. Solids, 1970, 18, 189.
3. J.A. Copper, Rev. Phys. Technol., 1971, 2, N2, p. 49.
4. В.С. Иванова, Л.М. Устинов, Физика и химия обработки материалов, 1969, № 2, стр. 114.
5. V.S. Ivanova, L.M. Ustinov, Fracture, 1969, Proceedings of the Second International Conf. on Fracture, Brighton, April, 1969.
6. В.Г. Будучева, Э.Г. Фридман, В.С. Сказин, В.С. Морозов, Л.М. Свирина. Физика и химия обработки, 1971, № 1, 107.
7. Ч.В. Копецкий, А.М. Марков, В.Л. Ореховский, Физика и химия обработки материалов, 1970, № 1, стр. 70.
8. В.С. Иванова, Ч.В. Копецкий, А.М. Марков, В.Л. Ореховский ДАН СССР, 1971, № 196, № 6.
9. C. Schoene, E. Scala, Met. Trans, 1970, 1, 12, p. 3466, p. 219.
10. P. Cremer, J.A. Copper, Fibres Sci and Technol, 1969, 1, N3.