ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1980

Seria: HUTNICTWO z. 20 Nr kol. 636

Izabella HYLA, Józef ŚLEZIONA,

Politechnika Śląska - Gliwice

Instytut Inżynierii Materiałowej - Katowice

MECHANIZM POWSTAWANIA ZŁOMU W MATERIAŁACH KOMPOZYTOWYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono mechanizmy zniszczenia kompozytów włóknistych, uwzględniające typ i klasę połączenia pomiędzy komponentami. Szczególną uwagę zwrócono na zniszczenia kompozytów Al-włókno stalowe, zaliczanych do tzw. pseudopierwszej klasy. W analizie zjawiska zniszczenia kompozytów uwzględniono charakterystyki fizyko-mechaniczne oraz wytrzymałość połączenia komponentów.

WSTĘP

W materiałach kompozytowych, należących do grupy materiałów niejednorodnych, działają zróżnicowane mechanizmy powstawania złomu. Zależą one zarówno od własności fizyko-mechanicznych komponentów, jak również od technologii wytwarzania kompozytu. Zależności te wynikają z bardzo zróżnicowanego sposobu łączenia się ze sobą komponentów w różnych warunkach technologicznych wytwarzania materiału. Znajomość mechanizmów powstawania i rozwoju zniszczenia w różnego typu połączeniach komponentów umożliwia prawidłowe dobranie zarówno osnowy i zbrojenia, jak również technologii łączenia ich ze sobą.

1. TYPY POŁĄCZEŃ POMIĘDZY KOMPONENTAMI W MATERIAŁACH KOMPOZYTOWYCH

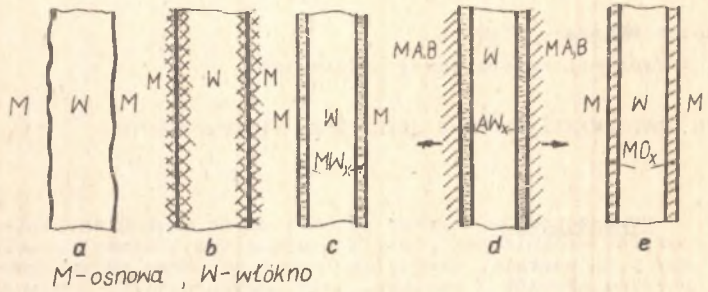
W metalicznych materiałach kompozytowych wyróżnić można następujące typy połączeń (rys. 1) [1]:

a) połączenie mechaniczne,
b) połączenie na drodze zwilżania i rozpuszczania,
c) połączenie dyfuzyjne,
d) połączenie dyfuzyjne z wymianą,
e) połączenie z międzywarstwą tlenkową.

Typy otrzymywanych połączeń stały się podstawą podziału materiałów kompozytowych na 3 klasy:

I klasa - zbrojenie i osnowa nie reagują ze sobą i nie tworzą roztworów,

II klasa - zbrojenie i osnowa nie reagują ze sobą ale tworzą roztwory,
III klasa - zbrojenie i osnowa wzajemnie reagują ze sobą, tworząc związki chemiczne na granicy rozdziału.



Rys. 1. Schematy podstawowych typów połączeń [1]
a - połączenie mechaniczne, b - połączenie na drodze zwilżania i rozpuszczania, c - połączenie dyfuzyjne, d - połączenie dyfuzyjne z wymianą, e - połączenie z międzywarstwą tlenkową

Wśród materiałów kompozytowych istnieje ponadto dość duża grupa materiałów określanych jako materiały klasy pseudopierwszej. Do grupy tej zalicza się te przypadki, w których niezależnie od skłonności do wzajemnego reagowania ze sobą komponentów, odpowiednio dobrana technologia wytwarzania kompozytu może reakcję taką uniemożliwiać. Jednym z przedstawicieli tej grupy materiałów kompozytowych jest kompozyt Al-włókno stalowe. Dokładne wyodrębnienie klas nie zawsze jest możliwe, jednakże taka systematyka jest wygodna z wielu względów, m.in. również przydatna jest przy analizie mechanizmu zniszczenia, ponieważ w poszczególnych grupach rozwój procesu zniszczenia oraz miejsce jego zarodkowania różnią się między sobą.

Podstawą oceny jakości uzyskiwanego połączenia na granicy rozdziału pomiędzy komponentami może być wielkość naprężeń stycznych powstających w warstwie granicznej w momencie utraty połączenia pomiędzy osnową i zbrojeniem.

Według [3] naprężenia te wyznaczyć można z zależności:

$$\tau_{max} = \frac{K \cdot P_t}{R\,a} \operatorname{otg} h(\sqrt{a} \cdot l) \qquad (1)$$

$$a = \frac{H}{R}, \quad R = \frac{1}{A_w \cdot E_w} - \frac{1}{A_o \cdot E_o}, \quad H = \pi d_w \cdot K$$

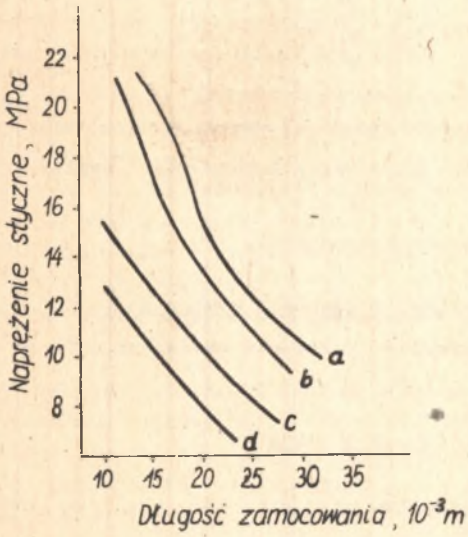
Natomiast zależność naprężenia stycznego od długości włókna zbrojącego podczas obciążenia kompozytu obciążeniem zewnętrznym, wywołującym w przekroju próbki naprężenia normalne σ, określić można z zależności [5]:

$$\tau = \sigma \frac{G_o}{E_k \cdot \beta \cdot t} \frac{s h \beta \cdot x}{c h \beta \frac{l}{2}} \qquad (2)$$

gdzie:

$$\beta^2 = \frac{4\,G_o}{t \cdot d_w \cdot E_o},$$

G_o - moduł ścinania osnowy,
$E_{k,w}$ - moduł sprężystości kompozytu i włókna,
d_w - średnica włókna,
t - grubość warstwy przygranicznej,
l - długość włókna,
K - stała, związana z charakterystykami mechanicznymi komponentów.



Rys. 2. Zależność naprężenia stycznego od długości drutu zbrojącego w kompozycie Al - drut stalowy [6] o średnicy: a - 4 mm; b - 3,25 mm; c - 2,5 mm; d - 2,0 mm

Badania w tym zakresie prowadzone przez autorów [6] dla kompozytu klasy pseudopierwszej, tj. dla Al-włókno stalowe pozwoliło uzyskać statystyczną zależność opisującą rozkład wytrzymałości połączenia komponentów od długości drutu zbrojącego (rys. 2) w postaci:

$$\tau = (\alpha L)^{-\frac{1}{\beta}} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right), \qquad (3)$$

gdzie:

α, β - parametry rozkładu,
Γ - funkcja gamma,
L - długość drutu.

Jak widać z przedstawionych wykresów, wielkość naprężenia stycznego na granicy rozdziału zależy nie tylko od długości drutów zbrojących lecz również od ich średnicy, a zatem sterowanie wytrzymałością połączenia można prowadzić zarówno przez dobór odpowiedniej długości drutu jak również i jego średnicy. Prowadzone badania dla różnych klas kompozytów pozwoliły stwierdzić ponadto, że w zależności od wytrzymałości połączenia komponentów, określonej naprężeniem τ, wyróżnić można ogólnie dwa przypadki:

1 - połączenie słabe, gdy $\tau < \tau_o$ (wytrzymałość połączenia jest mniejsza od wytrzymałości na ścinanie osnowy);
2 - połączenie mocne, gdy $\tau > \tau_o$.

Te dwa typy połączeń determinują charakter zniszczenia komponentów. W zależności od wytrzymałości połączenia zniszczenie kompozytów rozpatruje się w obrębie teorii silnych lub słabych połączeń.

2. CHARAKTER ZNISZCZENIA KOMPOZYTÓW

Oprócz typu połączenia komponentów o mechanizmie zniszczenia kompozytu decydują również własności fizyko-mechaniczne osnowy i zbrojenia. Wyróżnić można tutaj dwie grupy materiałów kompozytowych:

1. $\varepsilon_o > \varepsilon_w$ $\alpha_o > \alpha_w$ lub $\alpha_o < \alpha_w$
2. $\varepsilon_o < \varepsilon_w$ $\alpha_o > \alpha_w$ lub $\alpha_o < \alpha_w$

$\varepsilon_{o,w}$ - wydłużenie przy zerwaniu osnowy i zbrojenia,
$\alpha_{o,w}$ - współczynnik rozszerzalności cieplnej osnowy i zbrojenia.

Analizując mechanizmy zniszczenia kompozytów należy więc uwzględnić:

1 - typ połączenia komponentów i
2 - charakterystyki fizyko-mechaniczne komponentów.

2.1. Zniszczenie w przypadku silnego połączenia komponentów

W przedziale sprężystości wytrzymałość kompozytu określona jest z reguły mieszania wg zależności [7]:

$$\sigma_K = \sigma_o'(1 - V_w) + \sigma_w V_w$$

W obszarze tym naprężenia w kompozycie są proporcjonalne do jego modułu sprężystości.

W momencie zniszczenia naprężenia we włóknie osiągają jego granicę wytrzymałości, którą wyznaczyć można z wytrzymałości pęczka włókien. Przyjmuje ona również te same wartości przy wzroście udziału objętościowego osnowy (jeśli nie zajdzie reakcja na granicy kontaktu). Kompozyt z silnymi powierzchniami rozdziału i jednorodnymi własnościami włókien i osnowy będzie pękał w płaszczyźnie prostopadłej do przyłożonego naprężenia, a powierzchnia złomu będzie gładka.

W przypadku włókien niejednorodnych pod względem wytrzymałości, powstałe naprężenie od przyłożonego obciążenia zewnętrznego spowoduje pękanie włókien w słabych miejscach ($\varepsilon_w < \varepsilon_o$). Włókna mogą łamać się na odcinki o długości $l > l_{kr}$, a obciążenie będzie dalej przenoszone. Dopiero znaczne zmniejszenie w jednej płaszczyźnie efektywnego przekroju lub skrócenie włókien do długości poniżej krytycznej ($l < l_{kr}$) spowoduje rozprzestrzenianie się szczeliny, która przebiegać będzie tak, aby połączyć pęknięcia włókien przez osnowę od jednego do drugiego włókna (bez zniszczenia połączenia włókno-osnowa), (rys. 3a).

Spowodowane jest to tym, że wytrzymałość połączenia komponentów jest większa od wytrzymałości na ścinanie osnowy, wobec tego ścinanie nie przebiega wzdłuż powierzchni granicznej, lecz poprzez osnowę.
Własności mechaniczne takiego kompozytu nie zależą od wytrzymałości połączenia komponentów, a jedynie od ich udziału objętościowego.

2.2. Zniszczenie w przypadku słabego połączenia komponentów

W przeciwieństwie do kompozytów z silnym połączeniem komponentów, które niszczą się albo przez niszczenie osnowy ($\varepsilon_o < \varepsilon_w$) albo przez niszczenie włókna ($\varepsilon_o > \varepsilon_w$), kompozyty ze słabym połączeniem niszczą się wzdłuż granicy rozdziału włókno- osnowa w najsłabszym ogniwie układu.

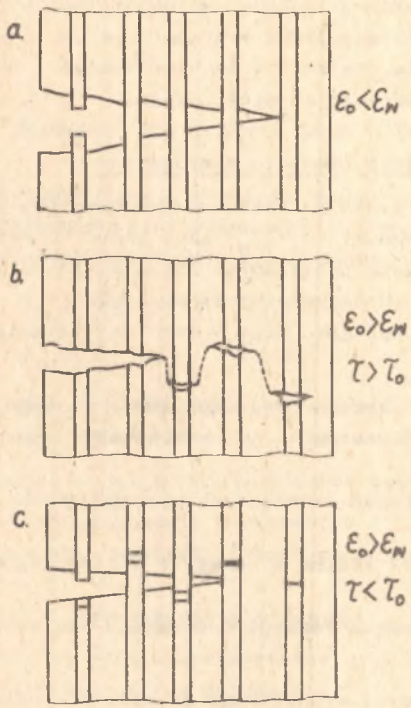
Ze względu na charakter obciążenia wystąpić mogą 4 typy zniszczenia wzdłuż powierzchni rozdziału [1].

1. Zniszczenie pod wpływem normalnych naprężeń rozciągających występuje w wyniku poissonowskiego ściskania lub ścinania podczas plastycznego odkształcenia.
2. Zniszczenie w wyniku działania naprężeń ścinających występujących np. podczas pęknięcia włókna.
3. Zniszczenie w wyniku powstania wokół włókna w warstwie dyfuzyjnej szczeliny krytycznej.
4. Zniszczenie włókna osłabionego w wyniku reakcji dyfuzyjnej na granicy rozdziału.

Przy odkształcaniu wzdłużnym kompozytu włóknistego ze słabym połączeniem komponentów, gdy wielkość odkształcenia kompozytu zbliża się do wielkości odkształcenia krytycznego włókna, we włóknie pojawia się bardzo często przewężenie, które prowadzi do odwarstwienia włókna od osnowy i następnie jego zerwania. Dalszy wzrost odkształcenia prowadzi do zniszczenia kompozytu przez pękanie osnowy. Zniszczenie kompozytu na skutek utraty połączenia przez komponenty na granicy rozdziału może mieć miejsce również przy innych sposobach obciążenia.

Jak już wspomniano poprzednio, odkształcenie niszczące dla osnowy może być większe lub mniejsze od odkształcenia niszczącego włókien, a więc możliwy jest również przypadek, gdy proces zniszczenia rozpoczyna się od pękania osnowy.

Omawiane przypadki można obserwować w kompozytach Al-drut stalowy, natomiast ich schematy przedstawiono na rys. 3. Na rys. 3a przedstawiono schemat zniszczenia kompozytu, gdy $\varepsilon_o < \varepsilon_w$ ($\tau > \tau_o$), a na rys. 3b sytuację odwrotną, gdy $\varepsilon_w < \varepsilon_o$. Rysunek 3bc przedstawia kompozyt zbrojony włóknami o niejednorodnych własności wytrzymałościowych (duży rozrzut wytrzymałości poszczególnych włókien), co prowadzi do pękania włókien w różnych miejscach przy odkształceniu $\varepsilon_k \approx \varepsilon_w$; dalszy wzrost odkształcenia prowadzi do zniszczenia osnowy (3b) lub zniszczenia osnowy z wyciąganiem włókien (3c). Powierzchnie powstałych złomów przedstawiono na rys. 4 i 5.



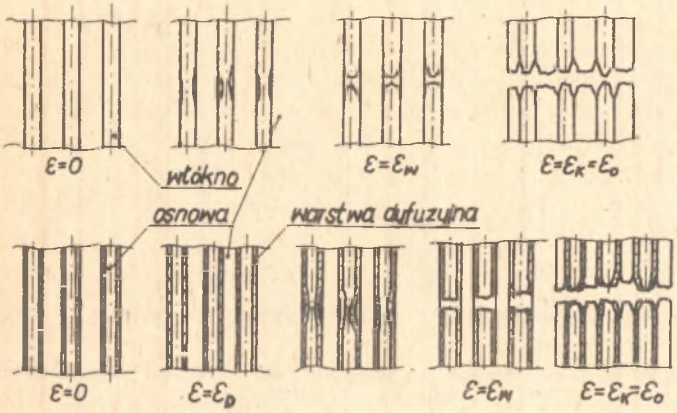
Rys. 3. Typy zniszczenia kompozytu podczas rozciągania [1]

Na rys. 4 pokazano złom kompozytu AK11 + D7oA, dla którego $\varepsilon_w > \varepsilon_o$. Na zdjęciu widać wyraźnie tworzenie się szyjki w drutach. Natomiast na rys. 5 przedstawiono złom kompozytu AK11 + H25N2oS2, dla którego $\varepsilon_w < \varepsilon_o$. Jak widać, występuje tu jedynie zróżnicowanie powierzchni przełomu osnowy, natomiast pękanie kompozytu następuje w płaszczyźnie zniszczenia. Obydwa przedstawione kompozyty AK11 +D7oA i AK11 + H25N2oS2 zaliczyć można do grupy materiałów ze słabym połączeniem komponentów.

Omówione przypadki bazują jedynie na charakterystykach mechanicznych komponentów składowych bez analizowania typu ich połączenia. Jak już jednak wspomniano, istotny wpływ na wytrzymałość połączenia komponentów, a zatem również i wytrzymałość kompozytu, posiada typ połączenia zbrojenia z osnową. Na rys. 6 przedstawiono przykładowo sche-

Rys. 4. Złom kompozytu AK11+D7OA ø 0,45 mm, V_w = 20%, pow. 30 x

Rys. 5. Złom kompozytu AK11+H25N2oS2 ø 0,40 mm, V_w = 20%, pow. 30 x



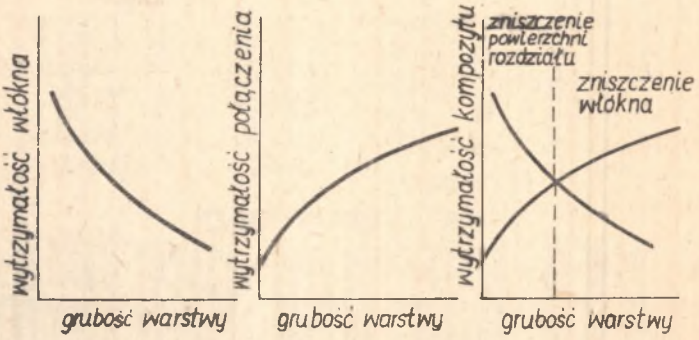
Rys. 6. Model zniszczenia kompozytu Al-drut stalowy bez warstwy (a) i z warstwą dyfuzyjną (b)

maty zniszczenia kompozytu bez warstwy dyfuzyjnej (a) i z warstwą dyfuzyjną (b), dającą jednakże tzw. słabe połączenie na granicy rozdziału, odpowiadające przypadkowi $\tau < \tau_o$. Wpływ warstwy dyfuzyjnej na wytrzymałość połączenia pomiędzy komponentami jest dość zróżnicowany, dlatego też zostanie on nieco dokładniej omówiony.

3. WPŁYW WARSTWY DYFUZYJNEJ NA WYTRZYMAŁOŚĆ POŁĄCZENIA KOMPONENTÓW

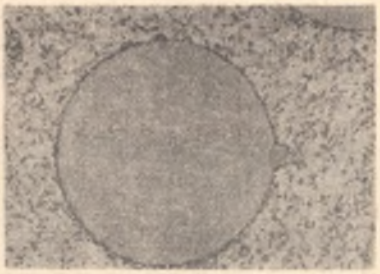
Powstająca w procesie technologicznym lub w czasie eksploatacji warstwa dyfuzyjna decyduje o mechaniźmie zniszczenia kompozytu. W przypadku kompozytu Al-włókno stalowe tworząca się warstwa przejściowa jest związkiem międzymetalicznym Fe_2Al_5, o bardzo niskich własnościach mechanicznych (R_m = 17,0 MPa; μHV = 960 ÷ 1150 MPa). Znacznie korzystniejszym zjawiskiem byłoby wytworzenie cienkiej warstwy roztworu stałego FeAl (R_m > 200 MPa). Stwierdzono w badaniach, że warstwa dyfuzyjna zwiększa co prawda wytrzymałość połączenia komponentów aż do wartości $\tau \geq \tau_o$, jednakże obniża własności wytrzymałościowe włókna, co prowadzi nawet do zniszczenia kompozytu. Zniszczenie takie przebiega według mechanizmu silnego połączenia komponentów (rys. 7). W zależności od grubości warstwy przejściowe istnieją dwa obszary:

I. $d < d_{kr}$ - podwyższający wytrzymałość kompozytu,
II. $d > d_{kr}$ - obniżający wytrzymałość kompozytu.



Rys. 7. Wpływ warstwy dyfuzyjnej na wytrzymałość włókna, połączenia włókno-osnowa i kompozytu

W przypadku I podwyższenie wytrzymałości związane jest ze wzrostem wytrzymałości połączenia komponentów, natomiast obniżenie wytrzymałości (II) związane jest z osłabieniem drutu przez warstwę dyfuzyjną oraz wzrostem udziału objętościowego warstwy dyfuzyjnej, będącej na ogół ciałem kruchym o dużym stopniu zdefektowania. Przy odkształceniu $\varepsilon_k < \varepsilon_w$ w warstwie dyfuzyjnej pojawiają się mikroszczeliny o długości krytycznej, rozprzestrzeniające się następnie na drut, w wyniku czego następuje dzielenie włókna (drutu) na "n" segmentów o długości krytycznej. Dalsze zniszczenie przebiega wg mechanizmu silnego połączenia.



Rys. 8. Miejscowe wytworzenie warstwy dyfuzyjnej w kompozycie AK11 +D70A po wyżarzaniu w 500°C/24 h, pow. 100 x

W kompozytach Al-włókno stalowe możliwe jest wytworzenie w procesie technologicznym pomiędzy komponentami filmu tlenkowego Al_2O_3, który zabezpiecza przed tworzeniem się warstw dyfuzyjnych. Zdarza się jednak, że w kilku miejscach może być on zerwany i wówczas tworzy się miejscowa warstwa dyfuzyjna (rys. 8). W zależności od grubości tej warstwy i powierzchni kontaktu będzie ona różnie wpływać na mechanizm zniszczenia kompozytu Al-włókno stalowe. Im cieńsza będzie warstwa i mniejsza powierzchnia kontaktu, tym łatwiej będą mogły relaksować naprężenia powstające w warstwie i ich wpływ na wytrzymałość połączenia będzie mniejszy. Wzrost powierzchni kontaktu utrudnia procesy relaksacji naprężeń i w warstwie pojawiają się szczeliny. Ten sam proces obserwuje się, gdy grubość warstwy przekroczy wartość krytyczną $d > d_{kr}$. Zniszczenie kompozytu przebiega wówczas tak jak z pełną warstwą dyfuzyjną.

4. PODSUMOWANIE

Jak widać z przytoczonych rozważań, mechanizm zniszczenia kompozytu zależy od bardzo wielu czynników. Pełne zatem wykorzystanie wysokich własności mechanicznych materiałów kompozytowych uwarunkowane jest m.in. uwzględnieniem tych wpływów przy projektowaniu materiałów kompozytowych.

Reasumując, do czynników mających istotny wpływ na mechanizm zniszczenia materiału kompozytowego zaliczyć można:

1) charakterystyki fizyko-mechaniczne komponentów,
2) rodzaj połączenia pomiędzy komponentami,
3) rozmiary komponentu zbrojącego, mające wpływ na wytrzymałość połączenia włókien z osnową,
4) grubość powstałej warstwy przejściowej,
5) sposób obciążenia kompozytu.

Jak widać z przytoczonego zestawienia, istnieją duże możliwości sterowania własnościami mechanicznymi materiałów zbrojonych na różnych etapach procesu ich wytwarzania. Jednakże warunkiem niezbędnym takiej ingerencji jest świadomość wpływu poszczególnych parametrów składowych na mechanizm zniszczenia wytwarzanego materiału.

LITERATURA

[1] Metcalfe AG - Composite Materials. V.1. Interfaces in Metal Metrix Composites, Academic Press New York, 1974. Wyd. rosyj. Mir, Moskwa, 1978.

[2] Razruszenije niemetałłów i kompozitnych materiałów. Razruszenije T.7 cz. 1 Izd. Mir, Moskwa, 1976.

[3] Lawrence P. - J. of Mat. Sc., 1972, Nr 7.

[4] Szorszorow M.Ch. - Problemy procznosti, 1975, Nr 8.

[5] Kompozicjonnyje materiałły wołoknistogo strojenija. Naukowa Dumka, Kijów, 1970 r.

[6] Hyla I., Śleziona J. - Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej, 1979, Nr 19.

[7] Hyla I. - Wybrane zagadnienia z inżynierii materiałów kompozytowych, PWN Warszawa, 1978.

[8] Kendall K. - J. of Mat.Sc. 1o. 1975, 1011-1014.

[9] Friedrich E., Pompe W., Kopiow I.R. - J. of Mat.Sc., 1974, Nr 9.

[10] Szorszorow M.Ch. i inni - Fizika i chimija obrabotki materiałow, 1976 Nr 1.

[11] Ochiai S., Murakami Y. - Metal Science 1976, Nr 11.

[12] Morley J.G. - International Metals Reviews, September, 1976.

МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ИЗЛОМА В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

Р е з ю м е

В работе представлено механизмы разрушения волокнистых композитов учитывающие тип и классу соединения между компонентами. Особенно внимание обращено к разрушению композитов Al-стальная проволока, которые относятся к псевдопервому классу.

В анализе явления разрушения композитов были учитываны физико-механические характеристики компонентов и прочность их соединения.

STAND UP FRACTURE MECHANISM IN COMPOSITE MATERIALS

S u m m a r y

Fracture mechanismes of the fibre composites conserning the type of the connection between components was presented in this paper.

Special attention was payed to the destruction of Al-steel wire composites which belong to the pseudofirst class physic-mechanic characteristics and connection strength of the components were taken under consideration in the analysis of the destruction components effects.