

## ZWILŻALNOŚĆ I INFILTRACJA ELEMENTÓW ZBROJĄCYCH W ODLEWNICZYCH KOMPOZYTACH Z OSNOWĄ METALICZNĄ

A. PATEJUK, M. GABRYLEWSKI  
Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45C, Białystok Polska

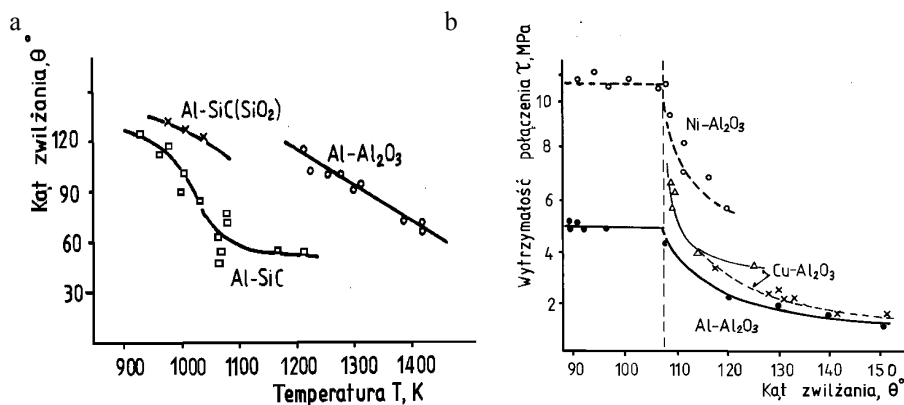
### STRESZCZENIE

Technologiczne problemy związane z wytwarzaniem materiałów kompozytowych z osnową metalową zbrojoną włóknami węglowymi zostały przedstawione szerzej w pracy [1]. Niniejszy artykuł zawiera analizę zjawisk towarzyszących zwilżaniu w układzie materiał osnowy kompozytu – elementy zbrojące.

*Key words: wettability, carbon fibres, composite material*

### 1. WSTĘP

Przy wytwarzaniu materiałów kompozytowych metodą odlewniczą, między ciekłym materiałem osnowy a trudnotopliwymi włóknami powinno wystąpić zjawisko zwilżania. Dane literaturowe [1, 2] wskazują, że dla uzyskania dobrego połączenia pomiędzy osnową a zbrojeniem w większości materiałów kompozytowych, niezbędne jest zapewnienie kąta zwilżalności poniżej  $108^\circ$  – rys 1a [3, 4]. Analiza wykresów (rys. 1b) wskazuje, że wytrzymałość połączenia metaliczna osnowa-zbrojenie, przy kątach zwilżalności poniżej  $108^\circ$  utrzymuje się na stałym poziomie. Delannay F. i inni [5] wskazuje, że właściwość ta jest bezpośrednio związana z fizycznymi i chemicznymi właściwościami warstw powierzchniowych komponentów w chwili tworzenia granicy fazowej materiału kompozytowego. Przy czym w tym przypadku ustabilizowanie się poziomu wytrzymałości połączenia, przy zwilżaniu poniżej kąta zwilżania  $108^\circ$ , spowodowane jest zerwaniem ciągłości odpychającej ujemnej chmury elektronowej metalu z ujemną powierzchniową warstwą anionową fazy zbrojącej.



Rys. 1. Kąt zwilżania [2, 3]; a – wpływ temperatury, b – wpływ na wytrzymałość połączenia  
 Fig. 1. Angle of wettability [2, 3]; a - influence of temperature, b - influence on endurance of connection

## 2. INFILTRACJA ELEMENTÓW ZBROJENIA PRZEZ CIEKŁĄ OSNOWĘ METALICZNĄ

Przy wytwarzaniu kompozytów z osnową metalową zbrojonych włóknami czy cząstkami, z uwagi na prostotę, bardzo dogodne są metody odlewania. Warunkiem otrzymania dobrego kompozytu jest zajście procesu infiltracji, tzn. wnikania ciekłej osnowy metalicznej między elementy zbrojące. Wprowadzenie ciekłego metalu między te elementy jest procesem złożonym, zależnym od szeregu czynników, z których najbardziej istotnym jest ciśnienie wewnątrz ciekłego metalu. Ścisłej rzecz biorąc o infiltracji ciekłej metalicznej osnowy między elementy zbrojenia decyduje różnica ciśnień, spowodowana siłami kapilarnymi, na froncie ciekłego metalu. Od tej różnicy ciśnień zależy czy infiltracja będzie samorzutna (układ zwilżający), czy też będzie wymagać zastosowania zewnętrznego ciśnienia na ciekły metal (układ nie zwilżający). W większości przypadków metal nie zwilża materiału zbrojenia i trzeba stosować dodatkowe ciśnienie na ciekły metal (odlewanie pod ciśnieniem).

Oszacowanie różnicy ciśnień na froncie ciekłego metalu jest bardzo istotne z punktu widzenia potrzeb inżynierii materiałowej. Wyrażenia opisujące ich wartość bazują na równaniu Young-Kelvina:

$$p = \sigma_{cg} K \cos\theta \quad (1)$$

gdzie:  $p$  - różnica ciśnień na froncie ciekłej osnowy,  $\sigma_{cg}$  - napięcie powierzchniowe na granicy ciekły metal - gaz (zamiast atmosfery gazowej między elementami zbrojącymi może być również jakaś ciecz),  $K$  - krzywizna powierzchni rozdziału ciecz - gaz,  $\theta$  - kąt zwilżania.

Zwykle  $K$  jest nieznane. Zakłada się w związku z tym geometryczny rozkład włókien (np. siatka kwadratowa, heksagonalna) i szacuje krzywiznę kanałów między

włóknami. Infiltracja włókien zachodzić może przy istnieniu różnicy ciśnień na froncie ciekłego metalu (pomijają się siły tarcia i siły grawitacji). Tylko odpowiednia wartość tej różnicy między stanem początkowym (ciekły metal i włókno otoczone najczęściej przez atmosferę gazową) i końcowym (kompozyt) z energetycznego punktu widzenia powoduje zmianę granicy rozdziału włókno-gaz na granicę rozdziału włókno - ciekły metal. Energia  $L$  tego procesu na jednostkę objętości metalu wynosi [6]:

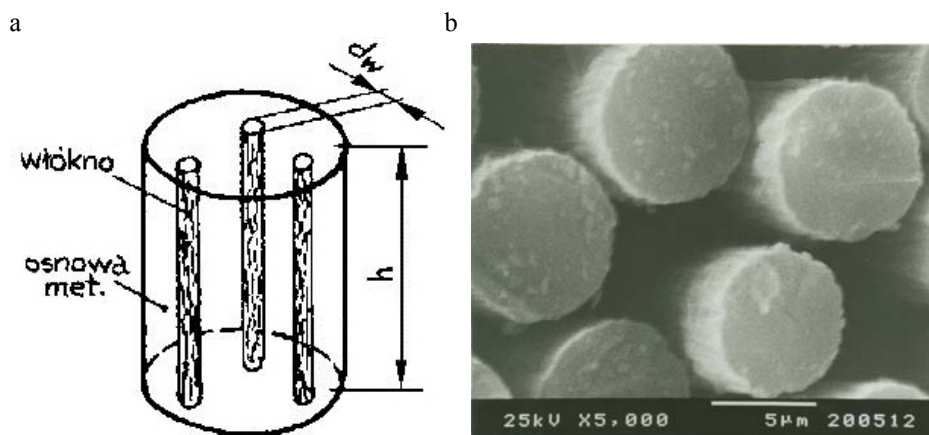
$$L = (\sigma_{sc} - \sigma_{sg}) S_w \quad (2)$$

gdzie:  $S_w$  - powierzchnia elementów zbrojących na jednostkę objętości metalu osnowy.

Energia ta jest równa pracy jaką wykonuje przemieszczający się ciekły metal zwiększając objętość o  $\Delta V$  przy ciśnieniu  $p$ . Praca ta jest równa  $L = p\Delta V$ , a przy jednostkowej objętości  $\Delta V = 1$  wynosi  $L = p$ , co pozwala wyrażenie (7) przekształcić w zależność:

$$p = (\sigma_{sc} - \sigma_{sg}) S_w \quad (3)$$

Samorzutne zwilżanie zachodzi jeśli wartości  $L$  i  $p$  są ujemne (układ zwilżający), kiedy  $\sigma_{sc} < \sigma_{sg}$ . Wartości  $S_w$  zależą od kształtu elementów zbrojących i ich udziału objętościowego. Jeśli elementami zbrojącymi są włókna o średnicy  $d_w$  i udziale objętościowym  $V_w$ , wartość  $S_w$  określa się na podstawie rys. 2.



Rys. 2. Rozmieszczenie włókien w kompozycie: a- schemat, b – uzyskane w badaniach  
Fig. 2. The distribution of fibres in composite: a- scheme, b - in experiment

Powierzchnia włókien  $= \pi d_w h n$ , gdzie:  $n$  - ilość włókien w kompozycie. Objętość osnowy = objętość kompozytu minus objętość włókien. Jeśli oznaczy się  $V$  jako objętość kompozytu to:

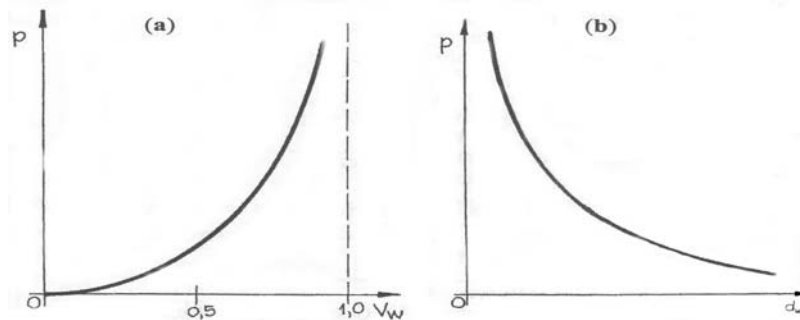
$$S_w = \frac{\pi d_w h n}{V - \frac{\pi d_w^2}{4} h n} = \frac{\pi d_w h n}{\frac{\pi d_w^2}{4} h n \left( \frac{V}{\frac{\pi d_w^2}{4} h n} - 1 \right)} = \frac{4}{d_w \left( \frac{1}{V_w} - 1 \right)} = \frac{4V_w}{d_w(1-V_w)} \quad (4)$$

gdzie:  $V_w$  - udział objętościowy włókien  $\left( V_w = \frac{\frac{\pi d_w^2}{4} h n}{V} \right)$

Ciśnienie  $p$  na froncie ciekłego metalu dla tego przypadku będzie wyrażone zależnością:

$$p = \frac{4V_w}{d_w(1-V_w)} (\sigma_{sc} - \sigma_{sg}) \quad (5)$$

Jak widać z powyższej zależności, przy stałej wartości różnicy napięć powierzchniowych  $(\sigma_{sc} - \sigma_{sg})$  ciśnienie panujące na froncie ciekłej osnowy rośnie ze wzrostem udziału objętościowego włókien  $V_w$  (rys. 3a) a maleje ze wzrostem średnicy włókien  $d_w$  (rys.3b).



Rys. 3. Wpływ udziału objętościowego włókien (a) i ich średnicy (b) na ciśnienie na froncie ciekłej fazy osnowy

Fig. 3. Influence of volumetric part of fibres (a) and their diameter (b) on pressure on front of liquid phase of matrix

Jeśli elementami zbrojącymi kompozytu są cząstki sferyczne (kuleczki) o średnicy  $d_k$  i udziale objętościowym  $V_k$  to wartości  $S_k$  oblicza się z zależności wprowadzonych jak niżej:

Powierzchnia cząstek =  $\pi d_k^2 n$ ; gdzie:  $n$  - ilość cząstek

Objętość osnowy =  $V - \frac{\pi d_k^3}{6} n$ ; gdzie:  $V$  - objętość kompozytu

$$S_k = \frac{\pi d_k^2 n}{V - \frac{\pi d_k^3}{6} n} = \frac{\pi d_k^2 n}{\frac{\pi d_k^3}{6} n \left( \frac{V}{\frac{\pi d_k^3}{6} n} - 1 \right)} = \frac{6}{d_k \left( \frac{1}{V_k} - 1 \right)} = \frac{6V_k}{d_k(1 - V_k)} \quad (6)$$

gdzie:  $V_k$  - udział objętościowy kulistych cząstek  $\left( V_k = \frac{\pi d_k^3 n}{6V} \right)$

Ciśnienie  $p$  na froncie ciekłego metalu dla tego przypadku będzie określone zależnością (7):

$$p = \frac{6V_k}{d_k(1 - V_k)} (\sigma_{sc} - \sigma_{sg}) \quad (7)$$

Tak jak w przypadku włókien, ciśnienie na froncie ciekłej osnowy będzie rosło ze wzrostem udziału objętościowego cząstek kulistych i malało ze wzrostem ich średnicy. Wartość członu  $(\sigma_{sc} - \sigma_{sg})$ , jeśli znane jest  $\sigma_{cg}$ , szacuje się z pracy adhezji  $L_a$ :

$$L_a = \sigma_{cg} + \sigma_{sg} - \sigma_{sc} \quad (8)$$

lub jeśli układ jest niezwilzalny - z kąta kontaktu osnowy z elementem zbrojącym  $\theta$  - zależność (9) [7]:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{sg} - \sigma_{sc}}{\sigma_{cg}} \quad \text{lub} \quad \sigma_{cg} \cos \theta = \sigma_{sg} - \sigma_{sc} \quad (9)$$

### 3. PODSUMOWANIE

Ciśnienie na froncie ciekłego metalu zmienia się w trakcie procesu infiltracji. W układach zwilżających ( $\sigma_{sg} > \sigma_{sc}$ ), metal będzie najpierw „wciągany” do przestrzeni o dużym  $S_w$  (wąskie kanały) a później do przestrzeni gdzie siły wciągające będą mniejsze tj. o małym  $S_w$  (szerokie kanały). Ponieważ  $S_w$  maleje z czasem to ciśnienie  $p$  (które jest ujemne) wzrasta z czasem. Natomiast w układach nie zwilżających ( $\sigma_{sg} < \sigma_{sc}$ ) wartość  $S_w$  rośnie z czasem i metal będzie płynął szerokimi kanałami a tylko w ostatnim momencie będzie wprowadzany do wąskich kanałów między elementami zbrojącymi. Ciśnienie  $p$ , które jest dodatnie (gdyż energię trzeba dostarczyć) w tym przypadku rośnie z czasem. Posługując się wzorami (5) czy (7) należy brać pod uwagę następujące zjawiska [6]:

1. W trakcie infiltracji osnowa często pokrywa się związkami chemicznymi takimi jak tlenki, azotki itp. Szczególnie jest to istotne przy dużym powinowactwie metalu osnowy do gazów powietrza.
2. Jeśli ciekły metal wywołuje reakcję na granicy z włóknem (czy innym elementem zbrojącym) to należy wprowadzić zmiany w wartościach  $\sigma_{sg}$  i  $\sigma_{sc}$ .
3. Jeżeli powierzchnia włókna nie jest gładka to dodatkowo należy wprowadzić współczynnik  $f_1$  jako mnożnik dla  $S_w$ .

#### LITERATURA

- [1] Patejuk A.: Wpływ parametrów technologicznych na właściwości kompozytu typu Al.-WW. III Seminarium „Kompozyty '98”. Warszawa (1998), 124-132.
- [2] Tressler R.: Powierzchnosti razdiela w mietaliczeskich kompozitach. Mir. Moskwa 1978.
- [3] Bukat A., Rutkowski W.: Teoretyczne podstawy procesu spiekania. Wyd. Śląsk. Katowice 1972.
- [4] Hyla I., Śleziona J., Myalski J.: Technologia wytwarzania i właściwości wybranych stopów aluminium zbrojonych cząstkami ceramicznymi. Inżynieria Materiałowa 6 (1993) 180÷184.
- [5] Laurent V., Chatain D., Eustathopoulos N.: Wettability for SiC by Al and Al-Si Alloys. J. of Mat. Science. 22 (1987) 244.
- [6] A. Mortensen, J.A. Cornie: On the infiltration of Metal Matrix Composites. Metallurgical Transactions A, Volume 18A, June 1987.
- [7] Gabrylewski M., Patejuk A.: Zjawiska zwilżania i infiltracji w procesie wytwarzania kompozytów z osnową metaliczną. Aparatura Badawcza i Dydaktyczna. T.X. Nr 4 (2005) 302-309.

#### THE PHENOMENON OF WETTABILITY AND INFILTRATION IN METAL MATRIX COMPOSITES PRODUCING

#### ABSTRACT

Some of the problems connected with producing metal matrix composites reinforced with carbon fibres, has been shown in this work. Our article contains the analysis of phenomena connecting with wettability of configuration between matrix composite and reinforcement elements.

Recenzował: Prof. Jan Piwnik