

Janusz Grabian<sup>1</sup>

Wyższa Szkoła Morska, Instytut Nauk Podstawowych Technicznych, ul. Podgórna 51/53, 70-205 Szczecin

## CHARAKTERYSTYKA TECHNOLOGICZNA ZBROJENIA KOMPOZYTÓW NASYCANYCH

Zbrojenie metalowych kompozytów nasycanych w postaci nieuporządkowanych włókien ceramicznych jest trudne lub wręcz niemożliwe do opisu geometrycznego. W pracy przedstawiono metodę wyznaczania charakterystyki technologicznej zbrojenia. Charakterystyka ta jest podstawą do wyznaczenia podstawowych parametrów procesu nasycania: ciśnienia oraz czasu.

### TECHNOLOGICAL CHARACTERISTIC OF REINFORCEMENT OF INFILTRATED COMPOSITES

It is difficult, if not impossible, to describe geometrically the reinforcement of metal-infiltrated composites, consisting of disordered ceramic fibres. The paper presents a method of determining the technological characteristic of the reinforcement. The characteristic makes up a basis for determining basic parameters of the infiltration process: pressure and time.

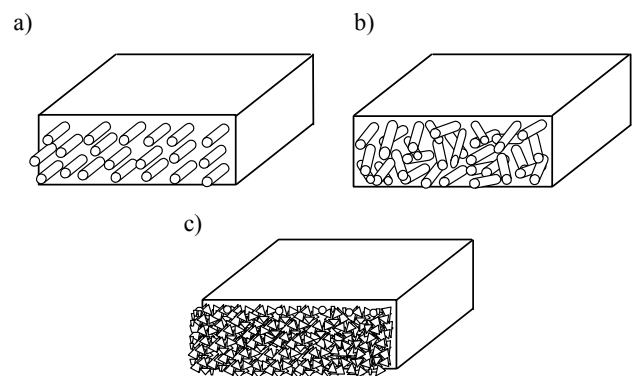
#### WSTĘP

Kompozyty nasycane są wytwarzane w procesie wypełniania ciekłym metalem zbrojącej struktury porowatej, zwanej także preformą. Jest ona w specjalnym procesie technologicznym formowana w kształtki o wymaganej formie geometrycznej. Kształtki takie wypełniać mogą całość lub część gotowego wyrobu. Dla najczęściej stosowanych układów materiałów zbrojenia, osnowy metalowej oraz fazy gazowej proces nasycania nie jest procesem samoczynnym. Do wymuszenia ruchu ciekłego metalu konieczne jest ciśnienie o wartości w granicach 20÷150 MPa [1].

Projektowanie procesu wytwarzania kompozytu nasycanego wymaga jednoznacznego wyznaczenia wartości optymalnych parametrów technologicznych, gwarantujących uzyskanie odlewu o wymaganej jakości. Ze względu na złożone zjawiska, występujące w procesie nasycania struktur zbrojących ciekłym metalem osnowy, korzystne byłoby wyznaczenie charakterystyki technologicznej stosowanego zbrojenia. Charakterystyka ta uwzględniałaby jego budowę geometryczną, szczególnie w tych przypadkach, gdzie jej opis geometryczny jest trudny lub wręcz niemożliwy. Celem niniejszej pracy jest przedstawienie charakterystyki zbrojenia, które nie może być opisane geometrycznie. Charakterystyka ta umożliwi dobór wartości ciśnienia i czasu nasycania jako funkcji wymaganej gęstości kompozytu.

#### ZBROJENIE ODLEWANYCH KOMPOZYTÓW NASYCANYCH

Kształtki zbrojenia stosowanego do wytwarzania metalowych kompozytów nasycanych są wykonywane z materiałów ceramicznych ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , SiC, BN, TiC), metalowych lub grafitu. Najczęściej stosowaną postacią tworzyw zbrojących kompozyty nasycane są włókna o średnicach dochodzących do 200  $\mu m$ . Zbrojenia te stosowane w postaci tzw. włókien długich układanych równolegle służą do wytwarzania elementów konstrukcyjnych o dominującym jednym wymiarze (druty, pręty, rury, kształtowniki itp.).

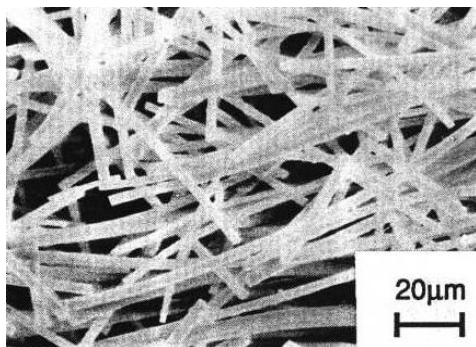


Rys. 1. Struktury zbrojące kompozytów nasycanych: a) o włóknach ułożonych równolegle, b) o włóknach nieuporządkowanych, c) w postaci pian lub spiekanych cząstek

Fig. 1. Reinforcement structures of infiltrated composites: a) with parallel fibres, b) with disordered fibres, c) in the form of foam or sintered particles

<sup>1</sup> dr inż.

Inną postacią włókien używanych do zbrojenia metalowych kompozytów nasycanych są tzw. nieuporządkowane włókna krótkie o średnicy  $3\div 15\ \mu\text{m}$ . Spotyka się również ceramiczne struktury zbrojące w postaci pian lub spiekanych cząstek. Rodzaje zbrojeń przedstawiono schematycznie na rysunku 1. Na rysunku 2 pokazano fragment kształtki zbrojącej, utworzonej z nieuporządkowanych włókien ceramicznych  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Porowatość kształtki wynosi 85% [2].



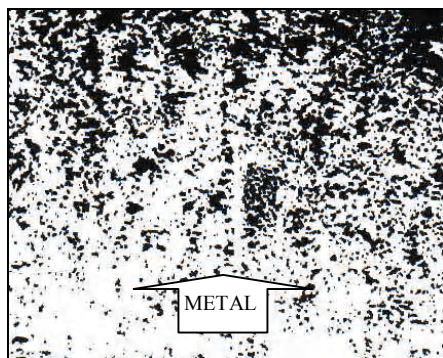
Rys. 2. Fragment kształtki zbrojącej z nieuporządkowanych włókien ceramicznych  $\text{Al}_2\text{O}_3$  typu Saffil

Fig. 2. A fragment of a reinforcing preforms of disordered ceramic fibres  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Saffil type

## PROCES NASYCANIA ZBROJENIA CIEKŁYM METALEM

Proces nasycania zbrojenia w postaci przestrzennych struktur utworzonych z nieuporządkowanych włókien ceramicznych charakteryzuje się występowaniem następujących po sobie stadiów:

- I. Pokonanie ciśnienia inicjacji i wpłynięcie metalu w przestrzeń (kanały) o najkorzystniejszych warunkach przepływu. Miejsca te znajdują się w obszarach o lokalnie zmniejszonej gęstości „upakowania” włókien ceramicznych.
- II. Wypełnienie obszarów zbrojenia ceramicznego o zwiększonym oporze hydraulicznym.
- III. Wypełnienie przestrzeni kapilarnych, utworzonych przez stykające się lub zlokalizowane w niewielkiej od siebie odległości poszczególnie włókna.



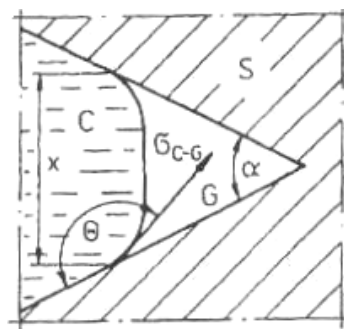
Rys. 3. Stadium I i II wypełnienia kształtki zbrojącej ciekłym metalem

Fig. 3. Stage I and II of the reinforcing profile filling preform infiltration by liquid metal

Stadium I i II przebiega w charakterystyczny sposób, co przedstawiono na rysunku 3.

Wobec złej na ogół zwilżalności zbrojenia przez metal wartość ciśnienia kapilarnego w III stadium nasycania, wyznaczona za pomocą równania Younga-Laplace'a, wynosi zgodnie z rysunkiem 4

$$p_{kap} = \frac{2\sigma}{x} \cos\left(\theta - \frac{\alpha}{2}\right), \text{ N/m}^2 \quad (1)$$



Rys. 4. Zachowanie się cieczy w kapilarze o kształcie klina o kącie wierzchołkowym  $\alpha$ , kąt zwilżania  $\theta > 90^\circ$

Fig. 4. Behaviour of a liquid in a wedge-shaped capillary space with the tip angle  $\alpha$ , wetting angle  $\theta > 90^\circ$

Miarą nasycenia zbrojenia jest gęstość uzyskanego kompozytu. Zależy ona od ich parametrów procesu: ciśnienia nasycania, czasu nasycania, temperatur metalu i zbrojenia oraz ich zmian w czasie. Wartości ciśnienia i czasu są ściśle od siebie zależne i powiązane z wartością uzyskiwanej gęstości kompozytu oraz geometrią zbrojenia. W celu uzyskania optymalnego przebiegu procesu konieczna jest możliwość otrzymania zależności pomiędzy wymienionymi jego parametrami a geometryczną charakterystyką zbrojenia. Skutki niewłaściwego doboru wartości ciśnienia pokazuje rysunek 5.

Zagadnienie przepływu ciekłej osnowy metalowej w kapilarach zbrojenia należy zatem rozpatrywać w skali makroskopowej, badając skuteczność nasycania całej objętości zbrojenia.

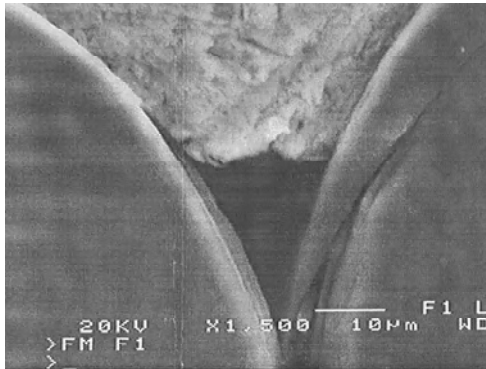
## SPOSÓB WYZNACZANIA CHARAKTERYSTYKI TECHNOLOGICZNEJ ZBROJENIA

Sposób wyznaczania charakterystyki zbrojenia trudnego do geometrycznego opisu polega na wykonaniu niewielkiej serii próbek z użyciem niskotopliwego metalu jako osnowy, a następnie przeprowadzeniu odpowiednich obliczeń wg określonej procedury. Efektem tego działania jest możliwość określania zależności wiążących parametry technologiczne dla dowolnego wybranego metalu osnowy projektowanego kompozytu technicznego [2].

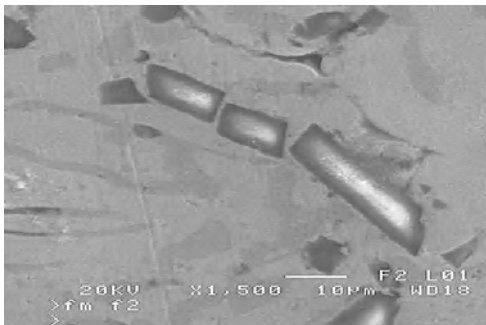
Przeprowadzona w ramach badań realizowanych wspólnie z Zakładem Odlewnictwa Politechniki Poznań-

skiej analiza procesu nasycania wykazała, że stanowiąca o skuteczności procesu nasycania zbrojenia gęstość materiału kompozytowego wzrasta do pewnej wartości  $\rho_{\max}$  i przekraczanie odpowiadającej jej wartości ciśnienia  $p_{\max}$  nie powoduje istotnych przyrostów gęstości materiału kompozytowego. Podobnie przebiega zmiana gęstości materiału kompozytowego w funkcji czasu nasycania (działania stałego ciśnienia) [3]. „Testowanie” wybranego zbrojenia przeprowadzono z użyciem cieczy modelowej, jaką jest stop Wooda. Jako zbrojenie kompozytu technicznego wybrano zbrojenie ceramiczne typu SIBRAL składające się z nieuporządkowanych włókien glinokrzemianowych o średnicy  $5\div 15\ \mu\text{m}$ .

a)



b)



Rys. 5. Skutki niewłaściwego doboru ciśnienia nasycania: a) ciśnienie zbyt niskie, b) ciśnienie zbyt wysokie

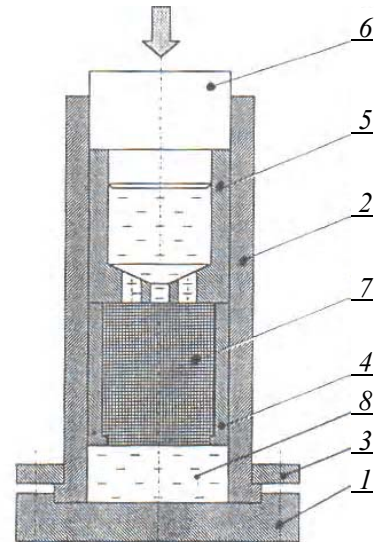
Fig. 5. Effects of improper choice of infiltration pressure: a) pressure too low, b) pressure too high

Badania przeprowadzono na przyrządzie, przedstawionym na rysunku 6, który umożliwiał wykonywanie cylindrycznych próbek kompozytowych o wymiarach  $\varnothing 41 \times 45\ \text{mm}$ . Próbę przeprowadzono w warunkach izotermicznych. Przyrząd, kształtkę zbrojącą oraz metal utrzymywano w temperaturze  $100^\circ\text{C}$ . Wykonano dwie serie próbek, wyznaczając gęstość kompozytu modelowego w funkcji ciśnienia ( $0\div 19\ \text{MPa}$ ) oraz czasu ( $0\div 2000\ \text{s}$ ).

Krzywą  $\rho = f_1(p)$  oraz krzywą  $\rho = f_2(\tau)$  wyznaczono dla najmniej korzystnej przestrzeni wnikania cieczy, za którą przyjęto, na podstawie analizy kształtów kapilar utworzonych przez stykające i krzyżujące się włókna, przestrzeń o kształcie stożka.

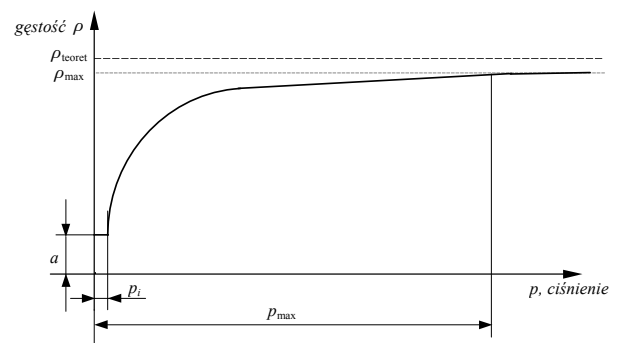
Krzywa opisująca przebieg zmian gęstości  $\rho$  w funkcji ciśnienia  $p$  w czasie dążącym do nieskończoności, nazwana dalej charakterystyką dynamiczną zbrojenia, jest hiperbolą, przedstawioną na rysunku 7 i opisaną wzorem

$$f_1(p) = 8,3607 - \frac{171,8268}{p^3} \quad (2)$$



Rys. 6. Schemat przyrządu do nasycania kształtek ceramicznego zbrojenia ciekłą osnową modelową: 1 - podstawa, 2 - tuleja, 3 - płyta dociskająca, 4 - oprawka próbki zbrojenia, 5 - tłok z komorą przelewową, 6 - stempel, 7 - próbka zbrojenia, 8 - ciekły metal osnowy

Fig. 6. A device for infiltrating ceramic reinforcement profiles with model liquid matrix: 1 - base, 2 - sleeve, 3 - pressing plate, 4 - reinforcement sample holder, 5 - piston with an overflow chamber, 6 - stamp, 7 - reinforcement sample, 8 - liquid metal of matrix



Rys. 7. Wyznaczenie charakterystyki zbrojenia  $\rho = f_1(p)$

Fig. 7. Determination of the reinforcement characteristic  $\rho = f_1(p)$

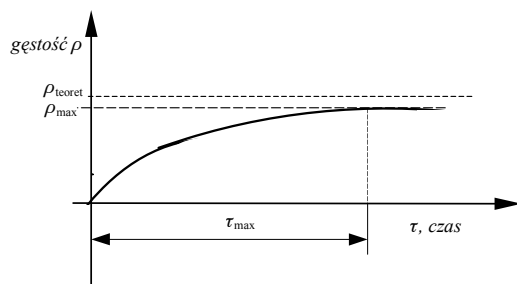
Gęstość próbki kompozytowej w zależności od czasu nasycania  $\rho = f_2(\tau)$  wyznaczono, wychodząc z równania określającego prędkość przepływu cieczy (metal) w kapilarze pod ciśnieniem  $p$

$$\frac{dl}{d\tau} = -\frac{p \cdot d^2}{32\eta \cdot l} \quad (3)$$

uzyskując zależność

$$f_2(\tau) = 8,4166 - 0,215 \cdot \exp(-0,0039\tau) \quad (4)$$

przedstawioną na rysunku 8 i nazwaną charakterystyką kinetyczną zbrojenia.



Rys. 8. Kinetyczna charakterystyka zbrojenia  $\rho = f_2(\tau)$

Fig. 8. Kinetic characteristic of the reinforcement  $\rho = f_2(\tau)$

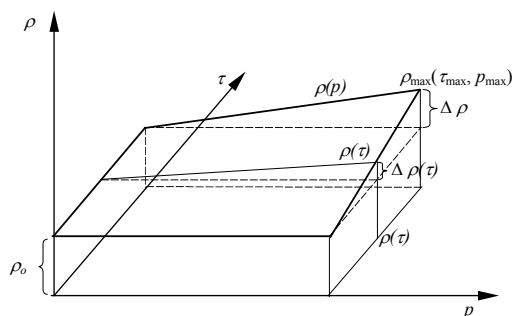
Powyższe krzywe aproksymowano dla dalszych rozważań prostymi. Pominięto odcinki krzywych, gdzie zmiany parametrów wymuszających nie powodują istotnych zmian gęstości kompozytu. Nie uwzględniano również odcinków krzywych odpowiadających małym wartościom parametrów wymuszających. Funkcję  $\rho = f_1(p)$  aproksymowano prostą

$$f_1(p) = 8,201 + 1,938 \cdot 10^{-3} p \quad (5)$$

Funkcję  $\rho = f_2(\tau)$  aproksymowano prostą

$$f_2(\tau) = 8,201 + 8,5317 \cdot 10^{-4} \tau \quad (6)$$

Krzywe opisane powyższymi równaniami regresji posłużyły do wyznaczenia zakresów stosowalności prostych ograniczonych wartościami  $p_{\max}$  i  $\tau_{\max}$ .



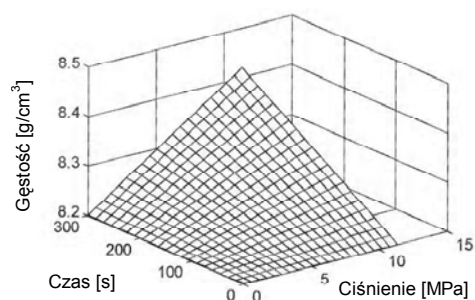
Rys. 9. Zasada wyznaczania technologicznej charakterystyki zbrojenia na podstawie charakterystyki dynamicznej i kinetycznej

Fig. 9. Principle of determination the reinforcement characteristic based on the dynamic and kinetic characteristic

Wyznaczone proste  $f_1(p)$  i  $f_2(\tau)$  są zgodnie z rysunku 9 podstawą do wyznaczenia powierzchni  $\rho(p, \tau)$ , nazwanej technologiczną charakterystyką zbrojenia, opisaną równaniem

$$\rho(p, \tau) = \beta \cdot \rho_{\max} + \frac{(1-\beta)\rho_{\max}}{p_{\max} \cdot \tau_{\max}} \cdot p \cdot \tau \quad (7)$$

Powierzchnia ta jest charakterystyczna dla badanego zbrojenia. Na rysunku 10 przedstawiono technologiczną charakterystykę badanego zbrojenia typu „SIBRAL”, testowanego stopem Wooda jako cieczą modelową. Charakterystyka ta stała się podstawą wyznaczenia parametrów nasycania badanego zbrojenia stopem AlSi11. Uzyskane wyniki zweryfikowano eksperymentalnie [4].



Rys. 10. Technologiczna charakterystyka zbrojenia typu SIBRAL

Fig. 10. Technological characteristic of the SIBRAL-type reinforcement

## WNIOSKI

- Zależności gęstości kompozytu nasycanego cieczą modelową od ciśnienia  $p$  i czasu nasycania  $\tau$  stanowią odpowiednio dynamiczną i kinetyczną charakterystykę zbrojenia.
- Charakterystyki te pozwalają na wyznaczenie technologicznej charakterystyki zbrojenia, która stanowi punkt wyjścia do wyznaczania parametrów nasycania  $p$  i  $\tau$  tego zbrojenia za pomocą osnowy stanowiącej stop techniczny na podstawie parametrów fizykochemicznych układów: modelowego i technicznego. Doświadczalne wyznaczenie charakterystyki zbrojenia powinno być warunkiem zastosowania tego zbrojenia jako komponentu nasycanego materiału kompozytowego.

Pracę zrealizowano w ramach grantu uczelnianego WSM w Szczecinie.

## LITERATURA

- [1] Clyne T.W., Withers P.J., An Introduction to Metal Matrix Composites.
- [2] Grabian J., Jackowski J., Infiltration of AK11 alloy into composite reinforcement of aluminosilicate fibres, *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji* 1999, 19, 1, 31-39.
- [3] Grabian J., Jackowski J., Szwecy M., Kinetyka nasycania zbrojeń odlewanych kompozytów metalowych, *IV Konferencja nt. Zjawiska powierzchniowe w procesach odlewniczych, Poznań-Koło* 1998, 67-74.

- [4] Grabian J., Sposób wyznaczania parametrów nasycania kompozytów metalowych, *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyki* 2000, 20, 1, 45-54.

Recenzent  
Michał Szweycer