

## WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI KOMPOZYTU ZBROJONEGO CZĄSTKAMI W FUNKCJI MORFOLOGII ZBROJENIA

M. CHOLEWA<sup>1</sup>  
Katedra Odlewnictwa, Politechnika Śląska

### STRESZCZENIE

W opracowaniu zawarto metodykę opisu morfologii zbrojenia w odniesieniu do cieplnych mechanizmów kierujących procesem krzepnięcia w kompozycie. Wykazano zależność zakresu temperatur krzepnięcia od postaci morfologicznej i cieplnych właściwości zbrojenia.

### 1. ZNACZENIE MORFOLOGICZNYCH WŁAŚCIWOŚCI ZBROJENIA I SPOSÓB ICH OPISU

W większości kompozytowych zastosowań mamy do czynienia z cząstkami wzmacniającymi, których cechą charakterystyczną jest statystyczna równoosiowość. Przy takich elementach nie można wyróżnić charakterystycznego wymiaru dominującego w całej populacji. Przyjęto, pewne uzupełnienie wielkości opisujących, rozproszone (dyspersyjne) elementy wzmacniające. Przyjęta klasyfikacja obejmuje wiskery, cząstki, krótkie włókna itp. rodzaje zbrojenia (z pominięciem materiałów koloidalnych). Opisywanie elementów wzmacniających i ich właściwości oraz innych korelacji z osnową wyłącznie udziałem masowym, czy też objętościowym oraz ziarnistością jest niewystarczająco dokładne.

Zarówno w materiałach kompozytowego charakteryzujących się izotropią jak i anizotropią strukturalną znaczny wpływ na ich trwałość i mechaniczną stabilność ma stopień rozdrobnienia struktury. Na ogół im bardziej drobnokrystaliczna struktura, tym mniejsze prawdopodobieństwo zaistnienia destrukcji osnowy. Za kształtowanie struktury osnowy kompozytu odpowiedzialne są wszystkie komponenty składowe oraz kształt krzywej szybkości odprowadzania ciepła w procesach przemian fazowych i stygnięcia. Elementy zbrojące są odpowiedzialne za zmiany, „deformacje” w

---

<sup>1</sup> Dr inż. e-mail [sekrmt3@zeus.polsl.gliwice.pl](mailto:sekrmt3@zeus.polsl.gliwice.pl)

transportu ciepła w porównaniu do analogicznej sytuacji dotyczącej samej osnowy bez zbrojenia. Fizyczne właściwości elementów zbrojących takie jak: ciepło właściwe, współczynnik przewodzenia ciepła oraz gęstość decydują o charakterze ruchu ciepła.

Przy zdefiniowanych właściwościach cieplnych zbrojenia to rzeczywista, statystycznie reprezentatywna postać geometryczna elementów wzmacniających wpływa na szereg zjawisk związanych z tworzeniem struktury kompozytu.

Stan ciekły kompozytu jako skutek poprawnego zwilżenia zależy od stabilności cieplnej ciekłej osnowy i od całkowitej powierzchni rozwinięcia zbrojenia. Przy zbyt dużej powierzchni rozwinięcia w stosunku do objętości osnowy i jej pojemności cieplnej - proces poprawnego zwilżania załamuje się radykalnie. Także w procesach transportu ciepła całkowita objętość zbrojenia reprezentowana jest pojemnością cieplną, którą determinuje współczynnik akumulacji ciepła. Współczynnik przewodnictwa cieplnego, natomiast, charakteryzuje przewodzenie ciepła z jednostki powierzchni prostopadłej do strumienia cieplnego. Intensywność transportu ciepła zależy od pojemności cieplnej zbrojenia reprezentowanej objętością elementu zbrojącego i jego powierzchni zewnętrznej (przy ustalonej różnicy temperatur). W sensie ilościowym pojęcia cieplne w kompozycie należy odnieść do udziału objętościowego i powierzchni rozwinięcia zbrojenia, czyli wprost do jego morfologii (w szczególności w odniesieniu do cząstek rzeczywistych). Na podstawie wielu własnych badań [1÷4] opisano specyfikę wpływu postaci geometrycznej zbrojenia na intensywność transportu ciepła. Wykonano w tym celu szereg obliczeniowych analiz za pomocą programów symulacyjnych. Przeprowadzono płaskie oraz przestrzenne symulacje krzepnięcia mikroobszarów z idealnymi cząstkami zbrojącymi o kształcie podstawowych figur i brył foremnych jak również z cząstkami o kształcie rzeczywistym. Morfologię cząstek: grafitu, krzemionki, korundu i karborundu określono empirycznie za pomocą analizy ilościowej.

W symulacyjnych analizach, płaskich i przestrzennych, w prostokątnych układach współrzędnych, posłużono się idealnymi przekrojami cząstek w postaci trójkątów, kwadratów, sześciokątów i kół (w analizach 2D) oraz cząstkami w postaci czworościanów, sześcianów i kul (w analizach 3D). Takie przyjęcie geometrii i morfologii cząstek pozwala uszeregować cząstki według wielkości powierzchni rozwinięcia w stosunku do ich objętości, a zatem także w sensie cieplnym, przewodności cieplnej w odniesieniu do odpowiadającej jej pojemności cieplnej. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych uzyskano wyniki w postaci rozkładów temperatur, szybkości przyrastania warstwy zakrzepłej, czasów krzepnięcia i gradientów temperatury. Jak wykazały badania wszystkie wskazane wielkości różnią się istotnie w zależności od wielkości powierzchni rozwinięcia, przy jednakowej objętości (w 3D) lub w zależności od długości obwodu przekroju, przy stałej powierzchni przekroju (w 2D) [1÷4].

Zaproponowano, aby cieplny wpływ elementów zbrojących przedstawiać za pomocą wskaźnika, który z uwagi na wpływ stopnia rozwinięcia powierzchni nazwano „Modułem morfologicznym” ( $M_m$ ) [5]:

$$M_m = \frac{F}{V} \quad (1)$$

Gdzie: F, V to odpowiednio powierzchnia zewnętrzna oraz objętość zbrojenia dyspersyjnego.

Wielkość wskazująca ile powierzchni (oddawania) ciepła przypada na jednostkę objętości magazynującej ciepło już w na wstępie wszystkich analiz może przybliżać charakter i właściwości kompozytu. Przez analogię do modułu krzepnięcia jest to jego odwrotność. Istota różnicy polega w sensie obu pojęć. W kompozycie moduł morfologiczny wskazuje na wielkość powierzchni oddawania ciepła (powierzchni rozwinięcia strefy między komponentami) przypadającą na jednostkową ilość ciepła zmagazynowaną w zbrojeniu (proporcjonalną do objętości)

Przyjmując jako stan początkowy tworzenia kompozytu układ, w którym istnieje wyrównanie temperatury osnowy i zbrojenia oraz pełny kontakt fizyczny, wielkość strumienia cieplnego przypadającego na jednostkę powierzchni w kierunku  $n$  jest iloczynem skalarnym wektora  $n$  i gradientu temperatury:

$$q_n(r, t) = -\lambda \bar{n} \circ \text{grad} T(r, t) \quad [\text{W/m}^2] \quad (2)$$

Ilość ciepła przepływającego przez powierzchnie  $\Delta F$  w czasie  $\Delta t$

$$Q_n(r, t) = -\lambda \bar{n} \circ \text{grad} T \Delta F \Delta t \quad [\text{J}] \quad (3)$$

gdzie:

$\lambda$  – oznacza współczynnik przewodnictwa cieplnego,  
 $r$  – uogólniona zmienna przestrzeni,  $t$  – czas,  $T$  – temperaturę,  
 $F$  – powierzchnię transportu ciepła.

W ogólnym ujęciu równanie energii, zgodnie z I Zasadą Termodynamiki, dla dyspersyjnych elementów zbrojących można przyjąć jako:

$$c\rho \frac{\partial T(r, t + \Delta t) - T(r, t)}{\Delta t} \Delta V = \frac{\partial}{\partial r} \left[ \lambda \Delta F \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right] \Delta r \quad (4)$$

Dla  $\Delta t \rightarrow 0$

$$c\rho \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} \Delta V = \frac{\partial}{\partial r} \lambda \left[ \Delta F \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right] \Delta r \quad (5)$$

gdzie:

$c$ ,  $\rho$ , i  $V$  – oznacza odpowiednio ciepło właściwe, gęstość masy i objętość magazynującą ciepło

Biorąc pod uwagę właściwości geometryczne i morfologiczne zbrojenia, które są praktycznie niezależne od zmian temperatury z czasem i położenia:

$$c\rho \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = \frac{\Delta F}{\Delta V} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \lambda \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right] \Delta r \quad (6)$$

gdzie można wyróżnić stałą –  $M_m = \frac{\Delta F}{\Delta V}$ , która określa wpływ postaci morfologicznej zbrojenia.

Badano dynamikę transportu ciepła kształtującego strukturę osnowy kompozytu W rozpatrywanej, kontrolnej, objętości mikroobszaru - w centrum odlewu kompozytowego umieszczono cząstkę zbrojącą o kształcie brył foremnych: kuli, sześciangu, czworościanu lub o kształcie rzeczywistym - przykładowo węgla krzemu SiC. Procesy cieplne zachodzące w kompozycie opisane są równaniami przewodnictwa ciepła. Nieustalone pole temperatury w dwufazowej, na przykład około eutektycznej, matrycy, krzepnącej w przedziale temperatur opisuje równanie Fouriera – Kirchhoffa w postaci:

$$c_1(T_1)\rho_1(T_1) \frac{\partial T_1(r,t)}{\partial t} = \text{div}[\lambda_1(T_1) \text{grad}T_1(r,t)] + L_1\rho_{1L} \frac{\partial S_1(r,t)}{\partial t} \quad (7) [5,6]$$

gdzie:

$c_1$  [J/kgK] jest ciepłem właściwym,  $L_1$  – ciepłem krystalizacji,  $\rho_1$  [kg/m<sup>3</sup>] - gęstością masy (indeks „L” odnosi się do stanu ciekłego),  $\lambda_1$  [W/mK] – współczynnikiem przewodzenia ciepła,  $S_1$  – jest funkcja udziału fazy stałej;  $T_1$ ,  $r$ ,  $t$  oznaczają temperaturę, uogólnione współrzędne przestrzenne oraz czas.

Natomiast dla zbrojenia:

$$c_2(T_2)\rho_2(T_2) \frac{\partial T_2(r,t)}{\partial t} = M_m \Delta s \cdot \text{div}[\lambda_2(T_2) \text{grad}T_2(r,t)] + L_2\rho_{2L} \frac{\partial S_2(r,t)}{\partial t} \quad (8)$$

gdzie:

$c_2$  [J/kgK],  $\rho_2$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\lambda_2$  [W/mK],  $L_2$  – stanowią parametry termofizyczne materiału zbrojenia,  $S_2$  jest funkcja udziału fazy stałej w krzepnącym zbrojeniu;  $T_2$ ,  $r$ ,  $\Delta s$ ,  $t$  oznaczają temperaturę, uogólnione współrzędne przestrzenne, przyrost grubości zbrojenia oraz czas.

Przy czym przyjmując:

$$L_2\rho_{2L} \frac{\partial S_2(r,t)}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

dla  $T_{\text{sol } 2} \geq T_{\text{zal } 1}$ , dla zbrojenia dyspersyjnego bez przemian fazowych- gdy cząstki nie ulegają nadtopianiu ani stopieniu, po wyrównaniu zróżnicowanych temperatur początkowych :

$$c_2(T_2)\rho_2(T_2) \frac{\partial T_2(r,t)}{\partial t} = M_m \Delta s \cdot \text{div}[\lambda_2(T_2) \text{grad}T_2(r,t)] \quad (10)$$

## 2. Dyskusja Wyników

Prezentowane rozważania dotyczą podstawowego stanu zakładającego pełny fizyczny kontakt komponentów. Czynniki, które sprzyjają zwilżaniu to między innymi substancje powierzchniowo czynne. Zgodnie z istotą działania ich ilość winna zapewniać modyfikowanie zjawisk powierzchniowych. Dla zapewnienia poprawnego zwilżenia, wystarczają dziesiąte części promila substancji powierzchniowo czynnych - także dla cząstek syntetycznego grafitu, o szczególnie rozwiniętej powierzchni zewnętrznej. Tak niewielka ilość pozwala na uzyskanie stabilnej, ciekłej dyspersji w czasie krótszym od typowych zabiegów metalurgicznych np.: rafinacji, czy modyfikacji. Krótki czas zwilżania pozwala na regulowanie przebiegiem reakcji oraz ilością jej produktów. Dla wybranych materiałów kompozytowych ilość produktów można zaniżyć do wartości porównywalnych z ilością zużytych substancji powierzchniowo- czynnych. Ilość produktów potwierdzających poprawność zwilżenia a także objętość obszarów braku zwilżenia można szacować na poziomie jednego rzędu poniżej udziału zbrojenia. Ponadto jako pożądane przyjmuje się - nieciągłe, punktowe rozłożenie faz strefy przejścia. W takich przypadkach można uwzględnić odpowiednią poprawkę w przedstawionych równaniach. Można także założyć zmienność powierzchni i objętości faz lub z niewielkim błędem ustalić je na uśrednionym poziomie przy czym właściwości cieplne nie różnią się od zbrojenia w stopniu porównywalnym do różnic między osnową a zbrojeniem. Niestety nie można podobnie potraktować nieciągłości spowodowanych niepoprawnym zwilżeniem. Szczeliny powietrzne mogą wpłynąć znacznie na proces krystalizacji i krzepnięcia głównie z uwagi na termoizolacyjne właściwości gazów zaadsorbowanych lub wydzielonych na powierzchni zbrojenia. Jednak właściwe technologie wytwarzania kompozytów nie dopuszczają istnienia porowatości gazowych, przynajmniej w pobliżu zbrojenia.

Praktyczne znaczenie modułu morfologicznego polega na rozszerzeniu informacji o właściwościach kompozytu oraz użytych w nim komponentów zbrojących. Podanie ilości i ziarnistości dowolnego materiału zbrojącego mówi niewiele o wielkości powierzchni rozdziału faz. Z wyjątkiem przypadku pełnego geometrycznego podobieństwa elementów różniących się wyłącznie wielkością. Ilość powierzchni kontaktu komponentów przypadająca na jednostkę objętości zbrojenia ( $M_m$ ) może wskazywać na szereg zależności w procesach krystalizacji i krzepnięcia. Są one kształtowane przez przedstawiony ruch ciepła. Moduł morfologiczny to prawdopodobnie również wielkość przybliżająca także właściwości technologiczne (np. reologiczne) a z pewnością eksploatacyjne.

**LITERATURA**

- [1] Cholewa M., Gawroński J.: Wpływ geometrii cząstek zbrojących na krzepnięcie mikroobszaru kompozytu, Mat. Konf. Krzepnięcie Metali i Stopów, PAN Katowice, 1998
- [2] Cholewa M., Gawroński J. : Analiza ruchu ciepła w mikroobszarze kompozytu zbrojonego cząstkami SiC, Mat. Konf. Krzepnięcie Metali i Stopów, PAN Katowice, 1998
- [3] Cholewa M.: Kształtowanie struktury osnowy kompozytu z osnową aluminiowo - krzemową, Mat. Konf. Krzepnięcie Metali i Stopów, PAN Katowice, Opole 1999
- [4] Cholewa M.: Właściwości makrostruktury osnowy kompozytu zbrojonego cząstkami dyspersyjnymi o odmiennych cechach geometryczno-cieplnych Inter. Scientific Conf."Achievements in the Mechanical and Material Engineering", Materials Science Committee of the Polish Academy of Science, The faculty of Mechanical Engineering of the Silesian Technical University. Gliwice 1999,
- [5] Majchrzak E. , Mochnacki B. : Metody Numeryczne. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1996
- [6] Mochnacki B, Suchy J. S.: Modelowanie i symulacja krzepnięcia odlewów. P.W.N. Warszawa 1993

**THE SELECTED PROPERTIES OF PARTICLES REINFORCING  
COMPOSITE AS A FUNCTION OF MORPHOLOGY OF REINFORCEMENT****SUMMARY**

In this study was included description of reinforcement morphology with reference to thermal mechanisms of solidification process in composite. There was shown a dependence of solidification temperatures range with morphological and thermal properties of reinforcement.

Reviewed by prof. Stanisław Jura