

Miroslaw Cholewa¹, Józef Gawroński²

Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Odlewnictwa, ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice

RUCH CIEPŁA W KRZEPNĄCYM MIKROOBSZARZE KOMPOZYTOWYM ZBROJONYM CZĄSTKAMI

Poddano analizie mikroobszar kompozytu, zawierający 27 ceramicznych cząstek (rys. rys. 1 i 2) o zróżnicowanej grupami postaci geometrycznej w otoczeniu typowej metalicznej osnowy. W analizie uwzględniono fazy strefy przejściowej o termofizycznych właściwościach, będących wartościami uśrednionymi pomiędzy osnową a zbrojeniem, oraz niepełną powierzchnię zwilżenia metaliczną osnową. Przedmiotem opracowania jest jedno z dwóch szczególnych skojarzeń, a mianowicie dobrze przewodzące ciepło zbrojenie i słabo przewodząca ciepło osnowa. Założono centralne położenie rozpatrywanego mikroobszaru w przestrzeni odlewu oraz trójwymiarowy ruch ciepła. Treść opracowania stanowi grupa wyników (rys. rys. 4 i 5 oraz tab. 2) utworzona na podstawie prześledzenia zmienności pól temperatur wyznaczonych poprzez symulację komputerową.

Słowa kluczowe: kompozyty, krzepnięcie

THE THERMAL MOTION IN SOLIDIFIED ELEMENTARY AREA OF PARTICLES REINFORCED COMPOSITE

In the issue there were analyzed an elementary area of the composite included 27 ceramic particles (Figs. 1 and 2) with different geometric form in a typical metallic environment. In the analysis there were taken into consideration phases of the transition zone with averaging thermo physical properties between matrix and reinforcement and incomplete metallic matrix wetted surface. The object of the issue is one of two particular association namely: good heat conducting reinforcement and weak heat conducting matrix. There was set up a 3D thermal motion. The content of the issue are the results (Figs. 4 and 5 and Tab. 2) made on the basis of the thermal fields changing tracking what was determined because of computer simulation.

Key words: metal matrix composite, solidification

WPROWADZENIE

Badanie procesu krzepnięcia odlewanych kompozytu metalowego zbrojonego cząstkami dyspersyjnymi ma na celu optymalizację właściwości technologicznych i eksploatacyjnych kompozytu [1-3]. Dzięki ocenie korelacji między osnową a zbrojeniem można optymalizować strukturę osnowy i uwzględnić fizyczny wpływ wszystkich elementów tworzących materiał kompozytowy.

W opracowaniu badano charakter transportu ciepła w odlewanych kompozycie zbrojonym hipotetycznymi cząstkami o różnym kształcie. Celem przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych było utworzenie przestrzennego rozkładu temperatur w zakresie krzepnięcia kompozytu.

Dla potrzeb symulacji stworzono trzy modele geometryczne mikroobszaru kompozytowego. Jako model należy tu rozumieć przestrzeń w skali $k = 500$, zawierającą 10% objętości zbrojenia. Kształt sześciennego modelu złożony jest z elementarnych mikroobszarów. Tworzy go 27 obszarów ($3 \times 3 \times 3$) kompozytowych o stałym udziale objętościowym zbrojenia. Przykład modelu z cząstkami kulistymi pokazano na rysunku 1.

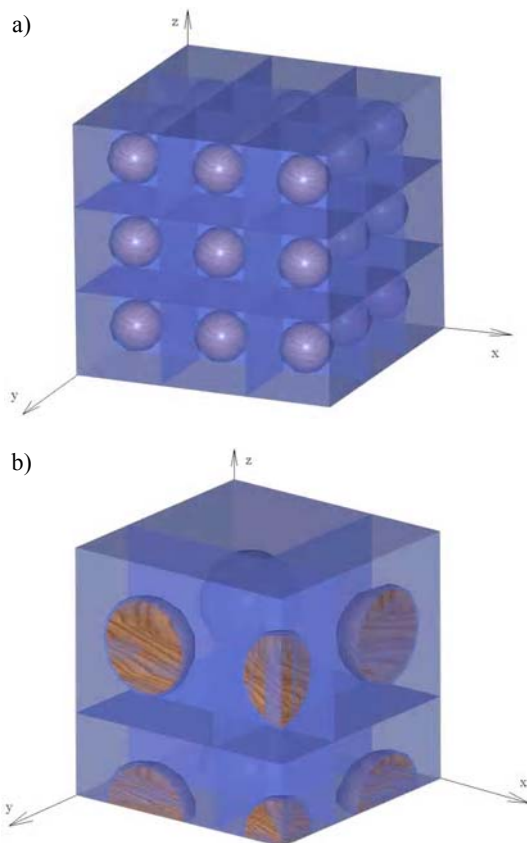
METODYKA BADAŃ

Analizie poddano wycinki czwartej części całego modelowanego obszaru. Przykład obszaru poddanego obliczeniom symulacyjnym złożonego z kulistych cząstek pokazano na rysunku 1b. Każdy z 27 elementów obszaru składał się z cząstki zbrojącej (w postaci kuli, sześcianu lub czworościanu foremego), osnowy i warstwy granicznej. Obszar graniczny został wprowadzony w celu zasymulowania niepełnego zwilżenia cząstki zbrojącej przez materiał osnowy oraz odtwarzał strefę przejściową.

Cząstki zbrojące zostały umieszczone w środku geometrycznym mikroobszaru elementarnego. Wyjątkiem jest przypadek z cząstką zbrojącą w kształcie czworościanu foremego. Jego środek geometryczny nie pokrywa się ze środkiem geometrycznym elementarnego mikroobszaru. Taki stan wynika z proporcji wymiarów oraz asymetryczności cząstki względem układu odniesienia. Przy zachowaniu wspólnego centrum geometrycznego cząstka nie mieści się w przestrzeni elementarnego sześcianu. Centralne przekroje przez obszary utworzone w programie Simtec RWP poddane obliczeniom symulacyjnym pokazano na rysunku 2. W tabeli 1

¹ dr inż., ² prof. zw. dr inż.

zamieszczono warunki początkowe przeprowadzonych obliczeń.



Rys. 1. Elementarne mikroobszary kompozytowe zbrojone cząstkami w kształcie kuli tworzące badany model (a) oraz przykładowy mikroobszar kompozytowy zbrojony cząstkami w kształcie kuli podany obliczeniom symulacyjnym (b)

Fig. 1. a) Elementary composite areas reinforced with globular particles made analyzed model

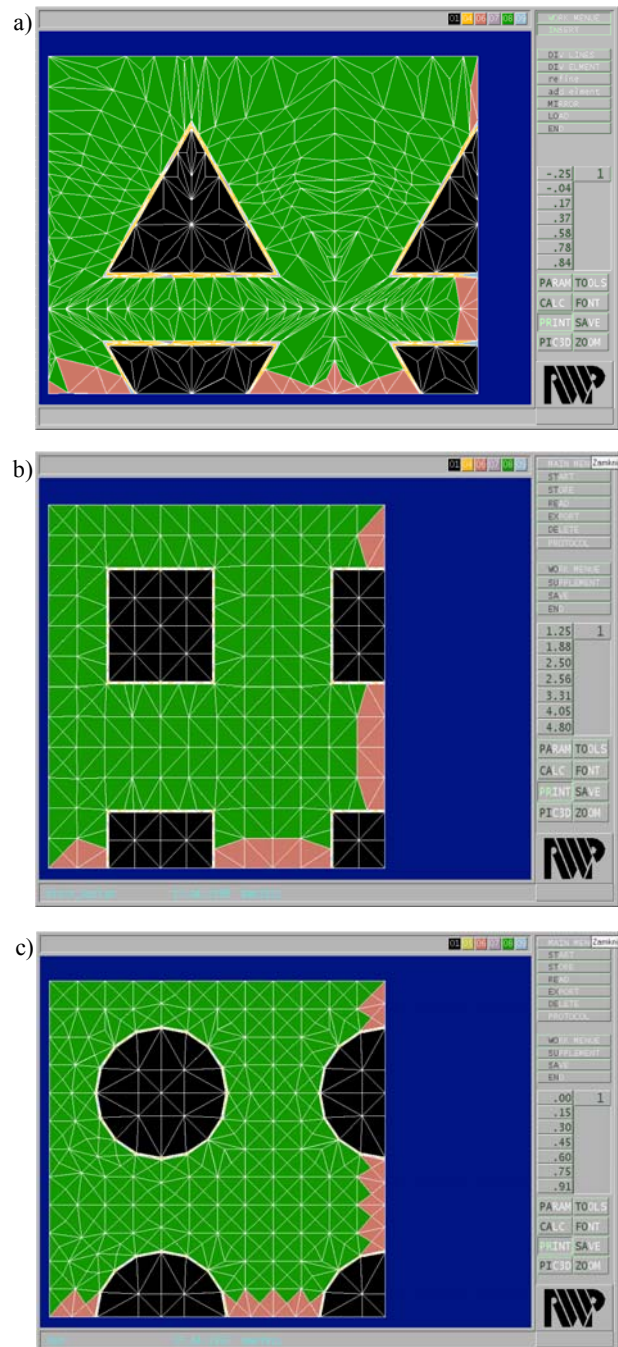
TABELA 1. Parametry początkowe symulacji
TABLE 1. Initial parameters of the simulation

T_L osnowy	T_S osnowy	T_{zal} osnowy	$T_{pocz.}$ cząstki zbrojącej
1454°C	1399°C	1500°C	1300°C

WYNIKI BADAŃ

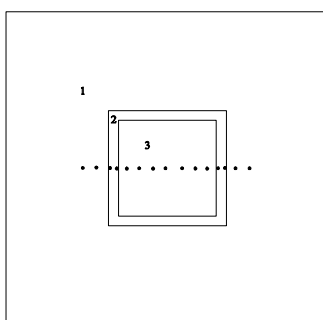
Istotne dane zebrano wzdłuż głównych osi układu współrzędnych, analizując 15 powierzchni pomiarowych w odniesieniu do pozacentralnej cząstki kompozytowej. W sumie zebrano 9 serii danych - po 3 dla każdego przypadku (kula, sześcian, czworościan foremny). Rozmieszczenie punktów pomiarowych przedstawia rysunek 3. Charakterystyczne dane termofizyczne użytych w symulacji materiałów pochodzą z dostępnej literatury. Ideą zastosowanych materiałów było stworzenie skojarzenia, w którym osnowa cechuje się niewielkim przewodnictwem cieplnym, natomiast zbrojenie wysokim. Jako nadrzędną właściwość termofizyczną przyjęto współczynnik przewodzenia ciepła, który dla osnowy był rzędu 30

W/mK. Uznano go jako typowy dla słabo przewodzących stopów, np. stopów żelaza. Dla zbrojenia wybrano materiał o współczynniku przewodzenia rzędu 60 W/mK, który przyjęto jako typowy dla najlepiej przewodzących metaloidów. Jest to jedno ze skrajnych skojarzeń. Drugim skrajnym skojarzeniem podstawowej pary komponentów jest wysoko przewodząca osnowa w złożeniu z termoizolacyjnym zbrojeniem. Ten przypadek jest jednak poza zakresem prezentowanego opracowania.



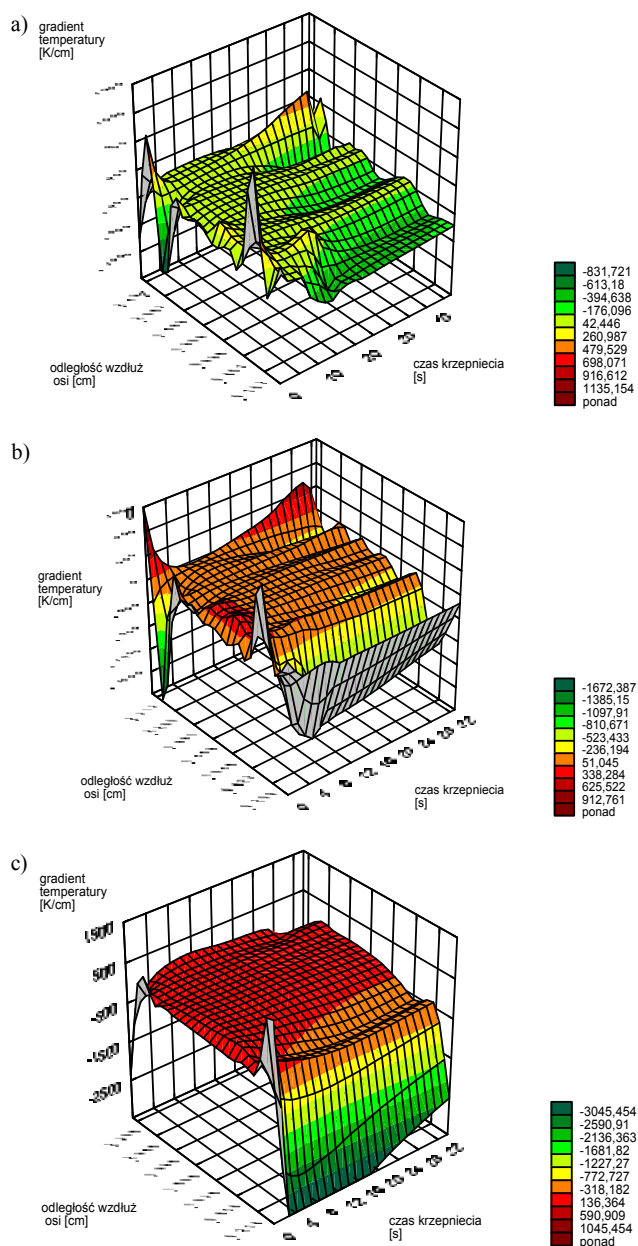
Rys. 2. Centralny przekrój poziomy mikroobszaru kompozytowego zbrojonego cząstkami w kształcie: a) czworościanu, b) sześcianu, c) kuli. Widoczna strefa graniczna

Fig. 2. Central horizontal intersection of composite microregion reinforced with: a) tetrahedral, b) cubic, c) spherical particles. Boundary zone visible



Rys. 3. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w kompozycie: 1 - osnowa, 2 - warstwa graniczna, 3 - cząstka zbrojąca

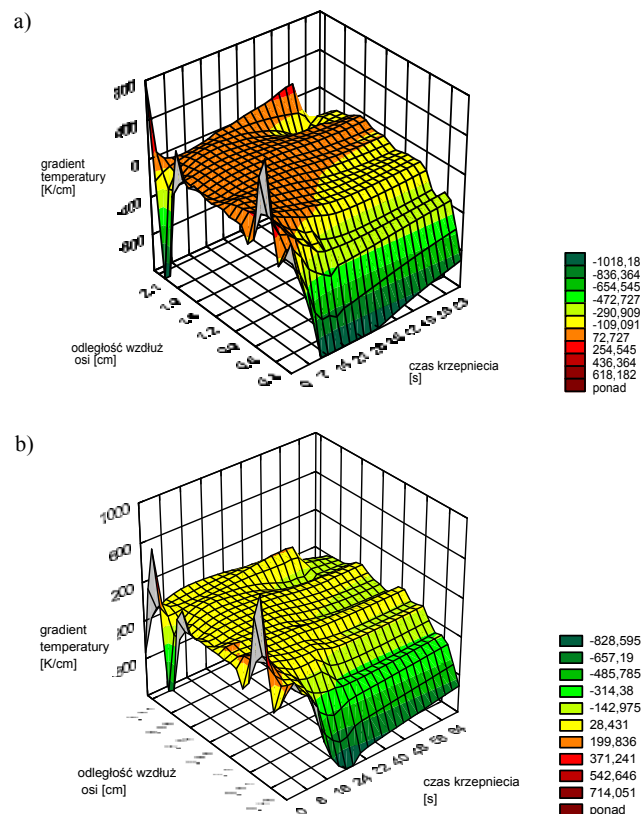
Fig. 3. Arrangement of the measuring points in the composite: 1 - matrix, 2 - transition zone, 3 - reinforced particle



Rys. 4. Gradient temperatury wzdłuż głównej osi oddawania ciepła: a) oś x, b) oś y, c) oś z w funkcji czasu krzepnięcia osnowy. Rozkład dla cząstek w kształcie czworościanu foremnego

Fig. 4. Temperature gradient along the main giving up the heating axis: a) x axis, b) y axis, c) z axis on the solidification time function of the matrix. Distribution for the regular tetrahedron particles

Ponadto w symulowanym przypadku występuje tzw. warstwa graniczna, w której 10% udziału ma powietrze jako odwzorowanie niepełnego zwilżenia oraz 10% faza przejściowa jako odwzorowanie fizycznego lub chemicznego połączenia komponentów. Powyższe założenia miały na celu zobrazowanie dopuszczalnej technologicznie metody wytwarzania, generującej niekorzystne warunki cieplne krzepnącego odlewu kompozytowego.



Rys. 5. Gradienty temperatury wzdłuż głównej osi oddawania ciepła w funkcji czasu krzepnięcia osnowy: a) rozkład dla cząstek w kształcie kuli wzdłuż osi x, b) rozkład dla cząstek w kształcie sześciangu wzdłuż osi x

Fig. 5. Temperature gradient along the main giving up the heating axis on the solidification time function of the matrix: a) for the globular particles along x axis, b) for the cube particles along x axis

Termofizyczne właściwości powietrza przyjęto bezpośrednio z bazy danych programu Simtec. Natomiast w odniesieniu do fazy granicznej przyjęto najprostszy model: materiał o właściwościach pośrednich między osnową a zbrojeniem, uwzględniając jednakowe udziały objętościowe komponentów.

Wszystkie właściwości termofizyczne zamodelowanego skojarzenia przyjęto jako zmienne w funkcji temperatury.

ANALIZA WYNIKÓW

Badany mikroobszar kompozytu podczas krzepnięcia wykazuje typowe cechy badanych dotychczas modeli zawierających cząstki idealne i rzeczywiste w zadaniach

jedno- i dwuwymiarowego ruchu ciepła [4, 5]. Ponadto obecność faz strefy przejścia, jak również niepełny kontakt komponentów nie wpływa istotnie na charakter ruchu ciepła. Elementarny strumień cieplny w kompozycie, zgodnie z równaniem Fouriera-Kirchhoffa, jest funkcją gradientu temperatury. Widoczny jest także wpływ cieplno-geometrycznych cech zbrojenia. Uzyskane wyniki obliczeń wskazują na wyraźne różnice w dynamice oddawania ciepła odmiennych geometrycznie cząstek. Wybrano szczególny przypadek skojarzenia charakteryzującego się wysokim przewodnictwem zbrojenia z niewielkim przewodnictwem cieplnym osnowy. Wartości obliczonych gradientów posiadają uzasadnienie dla użytej skali wielkości. Nie można ich zatem przenosić wprost w rzeczywisty obiekt, niemniej proporcje wielkości mogą wskazywać na rzeczywisty charakter dynamiki ruchu ciepła. Uzyskane wyniki ujęto jako ilorazy w stosunku do sześciennych cząstek wykazujących najmniejsze lokalne zróżnicowanie gradientu (tab. 2).

Specyfika cieplno-geometryczna polega na zróżnicowaniu dynamiki oddawania ciepła z obszarów zawierających cząstki o bardziej w stosunku do kuli rozwiniętej powierzchni. Największe, chwilowe, bezwzględne wartości oraz największe zróżnicowanie wtórnego gradientu temperatury występuje w mikroobszarach zawierających cząstki o kształcie czworościanu foremnego.

TABELA 2. Maksymalne zróżnicowanie gradientów temperatury w zakresie temperatur i czasów krzepnięcia w otoczeniu pojedynczych cząstek z modelowanego obszaru 27 cząstek zbrojących w kompozycie

TABLE 2. Maximal temperature gradients diversification on the temperature range and solidification times in the single particles environment from modeling area of 27 reinforced particles in composite

Rodzaj cząstki	Maksymalne zróżnicowanie gradientu temperatury ΔG , K/cm				$\frac{\Delta \bar{G}}{\Delta G}$ <small>cząst. sześci.</small>
	na kierunku osi x	na kierunku osi y	na kierunku osi z	Średnio $\Sigma/3$	
Czworościan	1088	1674	3115	1959	2,7
Kula	983	830	864	892	1,2
Sześcian	784	800	601	728	1,0

Wynika to z największej powierzchni oddawania ciepła w stosunku do objętości magazynującej ciepło. Czworościan ponadto posiada kształt, którego symetryczne ustawienie w prostokątnym układzie współrzędnych jest niemożliwe. Niemniej, statystycznie, przy wielu cząstkach ma to niewielkie znaczenie. Wysokie zróżnicowanie gradientu temperatury może prowadzić do silnego rozdrobnienia krystalizującej struktury, ale jednocześnie prowadzi do wzrostu cieplnych naprężeń na granicy kontaktu, co przy znacznych różnicach

w rozszerzalności cieplnej komponentów może powodować degradację i destrukcję kompozytu.

Istotnym spostrzeżeniem, wynikającym z przeprowadzonych obliczeń, jest intensywny ruch ciepła do otoczenia modelowanego obszaru. Obszar ten otoczono tzw. „uśrednionym materiałem kompozytowym”, którego właściwości termofizyczne są uśrednione w stosunku do zbrojenia i osnowy. W związku z powyższym nieuśrednione lokalne gradienty temperatury występujące pomiędzy cząstkami znacznie lepiej powinny oddawać rzeczywisty stan cieplny w rozpatrywanym układzie.

W porównaniu do poprzednich badań procesu krzepnięcia kompozytów zaobserwowano oscylacyjny charakter ruchu ciepła we wnętrzu cząstek zbrojących. Może być to spowodowane szczególnym układem przewodnictwa cieplnego komponentów oraz specyfiką rozkładu spektralnego ciepła krystalizacji. W rozpatrywanym przypadku przyjęto wzrastającą liniowo wraz z temperaturą charakterystykę wydzielania ciepła. Wraz z upływem czasu krystalizacji kształtuje się i wzrasta amplituda gradientu temperatury. Czas krystalizacji nie wpływa na częstotliwość zmian. W badanym zakresie oscylacje nie wykazują gaśnięcia z upływem czasu. W cząstce o kształcie czworościanu w kierunku osi z dynamika zmian jest najmniejsza, co jest spowodowane prawdopodobnie malejącą objętością cząstki w kierunku wzrostu wartości osi.

WNIOSKI

1. Potwierdzono zmienny i nieliniowy charakter gradientu temperatury w kompozycie podczas jego krzepnięcia przy uwzględnieniu obecności faz strefy przejścia oraz niepełnego zwilżenia.
2. Stwierdzono związek między cieplno-geometrycznymi właściwościami zbrojenia a dynamiką oddawania ciepła.
3. Stwierdzono oscylacyjną zmienność gradientu temperatury w zakresie czasów i temperatur krzepnięcia osnowy kompozytu zbrojonego cząstkami.

LITERATURA

- [1] Bochenek A., Braszczyńska K., Proces krzepnięcia kompozytów odlewanych magnez-cząstki SiC, Archives of Mechanical Technology and Automatyzation, Poznań 1998, 18.
- [2] Gawronski J., Cholewa M., Szajnar J., Relations between morphology of cast inner structure and technological and functional properties of the cast composite, Acta Metallurgica Slovaca, Kosice 2001, 3(1/2), 7.
- [3] Cholewa M., Gawroński J., Krystalizacja kompozytów zbrojonych cząstkami dyspersyjnymi SiC i Al₂O₃, Mat. Konf. Zjawiska powierzchniowe w procesach odlewniczych, PAN, Pol. Poznańska, Poznań 1996.
- [4] Cholewa M., Gawroński J., Wpływ geometrii cząstek zbrojących na krzepnięcie mikroobszaru kompozytu, Mat. Konf. Krzepnięcie metali i stopów, PAN, Katowice 1998.

- [5] 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.
- [6] Cholewa M., Dynamika ruchu ciepła w mikroobszarach kompozytów, Archives of Foundry, PAN, Katowice 2001, 1(2/2).

Recenzent
Edward Fraś