

WPŁYW MORFOLOGII ZBROJENIA NA KINETYKĘ KRZEPNIĘCIA MIKROOBSZARÓW KOMPOZYTOWYCH

M. CHOLEWA¹

Zakład Odlewnictwa, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych
Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska
ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice

STRESZCZENIE

Badano kompozyt AlSi-SiCp porównując gradient temperatury i szybkość krzepnięcia przy zmiennej powierzchni kontaktu komponentów i zmiennej wartości powierzchni przypadającej na jednostkę objętości zbrojenia (M_m). Przyjęto 10% udział objętościowy zbrojenia. Założono zróżnicowaną temperaturę początkową komponentów ($T_z < T_o$). Porównano kinetykę krzepnięcia mikroobszarów zawierających po jednej cząstce w kształcie brył foremnych w otoczeniu sześciennego osnowy.

Keywords: casting, composite, dispersion, solidification, simulation

1. ZNACZENIE KINETYKI RUCHU CIEPŁA W STREFIE GRANICZNEJ KOMPONENTÓW

Struktura strefy granicznej decyduje o właściwościach i trwałości eksploatacyjnej kompozytu. Większość parametrów strukturalnych także w eutektykach siluminowych jest definiowana w funkcji gradientu temperatury i szybkości krzepnięcia [1÷18]. Prognozowanie i optymalizowanie struktury osnowy kompozytu wymaga zbadania pochodnych temperatury po czasie i kierunku w bezpośrednim otoczeniu cząstek zbrojących oraz w dalszych jej obszarach. Poddano analizie zmienność obu pochodnych w funkcji kierunku ruchu ciepła i zakresu czasu krzepnięcia badanych elementarnych obszarów kompozytowych. Poza wyidealizowanym kształtem cząstek zbrojących przyjętym w symulacjach przyjęto typowe, przemysłowe skojarzenie komponentów tworzących kompozyt. Ciepłone oddziaływania związane z morfologią cząstek i ich wielkością za pomocą związku:

¹ dr inż., miroslaw.cholewa@polsl.pl

$$M_m = \frac{S_{cz}}{V_{cz}}$$

gdzie: S_{cz} i V_{cz} to odpowiednio powierzchnia i objętość cząstki zbrojenia.

2. CHARAKTERYSTYKA WARUNKÓW PRZEPROWADZONYCH SYMULACJI

Modelowy mikroobszar złożony jest z sześcianu stanowiącego osnowę okołoeutektycznego stopu Al-Si. W centrum obszaru umieszczono karborundowe cząstki o kształcie: czworościanu, sześcianu i kuli. Przyjęto przestrzenny ruch ciepła. W ten sposób centralnie ułożone cząstki stanowią założone, lokalne centra ciepłe krzepnącego odlewu. Otoczenie osnowy wraz z cząstką stanowił materiał o uśrednionych właściwościach osnowy i zbrojenia reprezentujących termofizyczne właściwości modelowanego obszaru kompozytu zawierającego jak poprzednio 10% zbrojenia SiC. Symulacje krzepnięcia mikroobszarów kompozytowych wykonano przy użyciu kodu symulacyjnego opartego na metodzie elementów skończonych Simtec RWP [19].

Podczas procedury modelowania geometrii posłużono się skalą podobieństwa $k=10^3$ i przyjęto następujące proporcje wymiarów:

- długość krawędzi sześcianu osnowy: - 5,28
- długość krawędzi czworościanu zbrojenia: - 5,00
- długość krawędzi sześcianu zbrojenia: - 2,45
- średnica kuli zbrojenia: - 3,04 [cm].

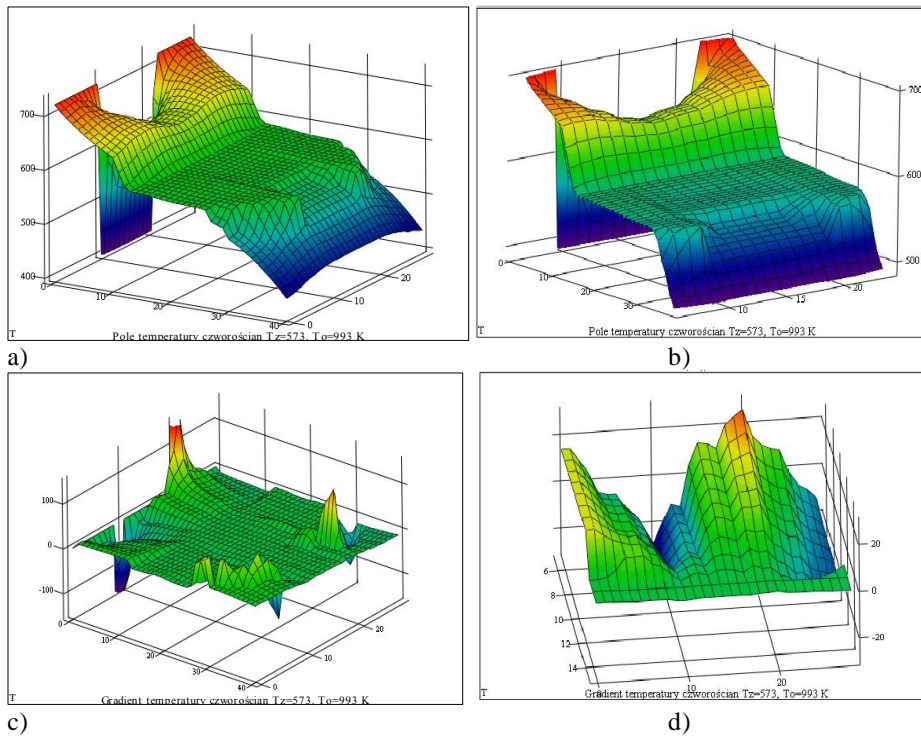
Cząstkom zbrojącym przypisano odpowiednie wartości modułu opisującego wielkość i kształt. Dla czworościanu, sześcianu oraz kuli moduł wynosi: $M_{mz}=2,94$, $M_{msz}=2,45$ oraz $M_{mk}=1,97$ [cm^{-1}]. Przyjęto następujące temperaturowe warunki początkowe - dla zbrojenia, osnowy, kompozytowego otoczenia, otaczającego powietrza - odpowiednio: 300, 720, 720, 25 °C. Przyjmując dane termofizyczne bezpośrednio z bazy danych programu przeprowadzono obliczenia. W przedstawionych wynikach obliczeń wykorzystano wyznaczone przez procedury preprocesingowe pola temperatur. Pozostałe wielkości związane z kinetyką ruchu ciepła wyznaczone poza programem. Takie postępowanie wynika ze specyfiki programu, który w użytej wersji nie uwzględnia znaku obliczanych pochodnych.

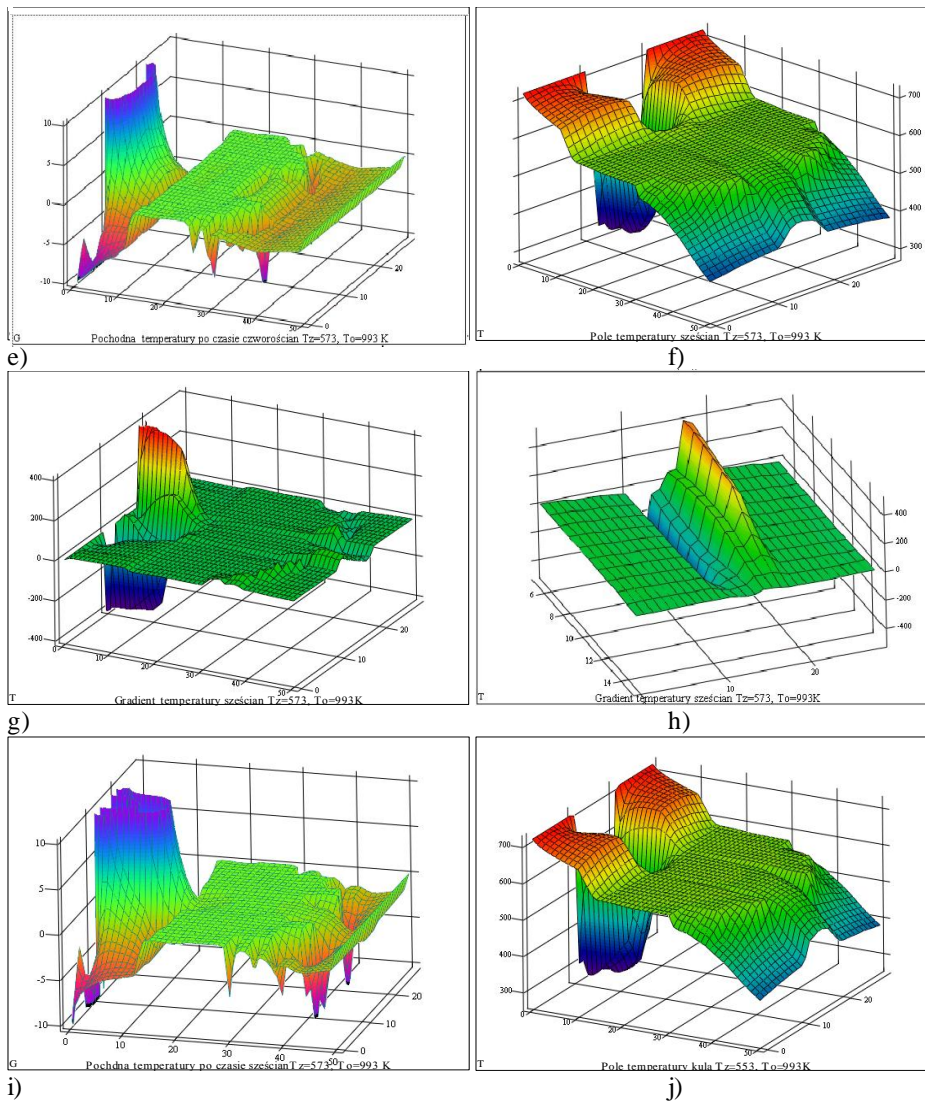
3. WYNIKI BADAŃ

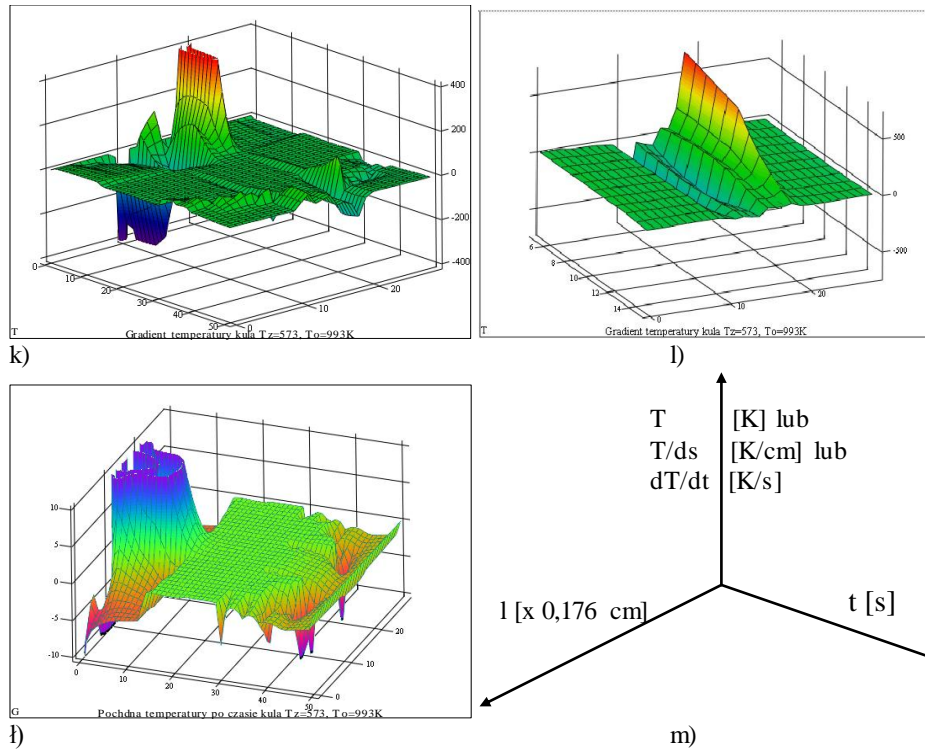
Analizowany przypadek jest z punktu widzenia właściwości termofizycznych mało zróżnicowanym cieplnie skojarzeniem komponentów. Jako zbrojenie przyjęto w analizie węgiel krzemu, czyli ceramikę o bardzo wysokim przewodnictwie cieplnym. Poniżej zamieszczono wyniki uzyskane dla reprezentatywnych centralnych płaszczyzn przekrojów. Analizie poddano gradient temperatury i szybkość zmian temperatury. W każdym punkcie rozpatrzono czas osiągnięcia temperatury likwidus oraz solidus.

Dokładnie w tym zakresie odpowiadającym przedziałowi krzepnięcia wyznaczono gradient temperatury w osnowie dla poszczególnych brył. Badano jego zmienność w funkcji czasu krzepnięcia. Wykresy badanych wielkości ujęto w funkcji odległości od powierzchni granicznej odbierającej ciepło i czasu krzepnięcia.

W analizowanym mikroobszarze wraz z czasem następuje wyłącznie spadek temperatury. Jednak lokalne różnice w transporcie ciepła nie dają się opisać tak prostym związkiem. Różnice są spowodowane oddziaływaniem oporu cieplnego zbrojenia. Na wykresach z rysunku 1 przedstawiono przykładowe, charakterystyczne zmiany temperatury i jej pochodnych po czasie i kierunku podczas krzepnięcia badanych mikroobszarów w ich centralnych przekrojach. Oś cieplna odpowiadająca osi kierunku na wykresach zaczyna się na jednej krawędzi umownej osnowy i kończy się na drugim przeciwległym jej brzegu dzieląc obszar na 30 odcinków jednostkowych. Konsekwencją takiego przyjęcia osi jest osiowa lustrzana symetria gradientu temperatury. W matematycznym sensie jest to prawidłowe, lecz w sensie fizycznym w połowie wykresu należy uwzględnić zmianę znaku zgodnie z zasadą zwrotu wektorów: odwrotny znak gradientu do znaku strumienia cieplnego.







Rys. 1. Wybrane, przykładowe wykresy zmian temperatury i gradientu temperatury w funkcji czasu krzepnięcia i odległości na kierunku oddawania ciepła. Oś ciepła przechodzi przez środek obszaru zawierającego cząstkę: a)÷e)czworoboczną regularną; f)÷i) sześcienną; oraz j)÷l) kulistą. Zależności temperatury: a), b) oraz f), j) $T=f(l, t)$. Zależności gradientu temperatury: c), d), oraz g), h) i k) $G=f(l, t)$. Zależności pochodnej temperatury po czasie: c), i), l) $v=f(l, t)$, m) układ osi współrzędnych

Fig. 1. Selected examples of temperature and thermal gradient changes in function of solidification time and distance in heat flow direction. Heat axis goes through the center of region containing reinforcing particle with geometry of: a)÷e) regular tetrahedron, f)÷i) cube, j)÷l) sphere. Temperature relations a), b) and f), j) $T=f(l, t)$. Thermal gradient relations c), d), and g), h), k) $G=f(l, t)$. Temperature derivative after time relations c), i), l) $v=f(l, t)$, m) co – ordinate system

4. Dyskusja Wyników

W przypadku cząstek o zwartym kształcie – kuli i sześcianu gradienty temperatury w początkowym okresie w warstwach przypowierzchniowych są największe. Ich wysoka zmienność dotyczy w głównej mierze powierzchni cząstek. Najszybciej wyrównanie temperatury następuje w obszarze z cząstką czworoboczną (rys. 1 a) i b)). Jest to widoczne przed osiągnięciem temperatury likwidus oraz po

wyjściu osnowy poza temperaturę solidus. Spadek temperatury zbrojenia podczas krzepnięcia osnowy – szybszy niż w osnowie jest spowodowany brakiem wydzielania ciepła krystalizacji. W przypadku obszaru z cząstką sześcienną efekt wyrównania temperatury następuje znacznie później (8÷12% zakresu t_{L-S}). Jako moment wyrównania temperatury komponentów przyjęto maksimum temperatury zbrojenia, które aczkolwiek nie daje prostoliniowości izotermy jednak stanowi pewne przybliżenie równości temperatur. Istotna jest oscylacja temperatury zbrojenia wokół chwilowej temperatury osnowy. Na rys. 1 a) i b) zbrojenie osiągając maksimum posiada temperaturę nieznacznie niższą niż osnowa. Wejście w temperaturę likwidus osnowy jest wcześniejsze o 2% w stosunku do zbrojenia. W rozważanym przypadku izoterma likwidus w całym obszarze – osnowy i zbrojenia jest linią prostą opóźnioną, co najmniej o wskazane 2%. W dalszej kolejności osnowa utrzymuje stałą temperaturę w całej dziedzinie a temperatura zbrojenia nieznacznie maleje następnie rośnie. Po minięciu lokalnego maksimum znajdującego się przed osiągnięciem przez otaczającą osnowę T_{sol} maleje do końca badanego zakresu początkowo szybciej niż osnowa a potem wolniej – nie wyrównując temperatury do przyjętego końca czasu krzepnięcia w zakresie dziedziny funkcji oraz zniekształcając nieznacznie pole temperatury w całej przestrzeni obszaru.

W przypadku cząstki sześcienną wszystkie efekty wymienione poprzednio są zbliżone jednak różnice są istotne. Początkowe wyrównanie temperatur następuje później tuż przed wejściem osnowy w zakres temperatury krzepnięcia. Oscylacyjna zmienność temperatury jest relatywnie mniejsza, co objawia się między innymi węższym w przestrzeni zróżnicowaniem temperatur po minięciu temperatury solidus osnowy. Ciepłe zmiany w osnowie polegają na wydłużeniu zakresu czasu krzepnięcia, który w przestrzeni między cząstkami jest dłuższy o 6% a w pobliżu cząstki o 12%. Zróżnicowanie temperatury na końcu czasu krzepnięcia objętego dziedziną funkcji jest większe niż w czworościanie i dotyczy mniejszej powierzchni. Temperatura osnowy przy czworościanie osiąga po minięciu krzepnięcia niższą wartość a zakres zmian jest rozleglejszy. W przypadku cząstki o bardziej rozwiniętej powierzchni wyrównywanie temperatury w osnowie jest szybsze i zachodzi w większej części osnowy.

Ruch ciepła w obszarze zawierającym cząstkę kulista niewiele odbiega od przypadku z sześcianiem. Wyrównanie temperatury komponentów wraz z osiągnięciem maksymalnej temperatury w zbrojeniu następuje po upływie 6% czasu od osiągnięcia przez osnowę temperatury likwidus. Zmiany w zakresie czasu krzepnięcia są zbliżone do występujących w obszarze z sześcianiem. Oscylacje temperatury zbrojenia wokół chwilowej temperatury osnowy są niewidoczne, ale widoczne jest najwyraźniej z rozpatrywanych przypadków opóźnienie zaistniałych zmian temperatury tj. nadążanie zmian cieplnych w cząstce za zmianami w jej otoczeniu. Zróżnicowanie temperatur w obszarze jest większe niż w układzie z sześcianiem. Ponadto po upływie czasu z zakresu dziedziny układ posiada najwyższe lokalne wartości temperatury z przebadanych obszarów.

Jeszcze jeden szczególny efekt związany z geometrią zbrojenia wynika z wykresów rozkładu temperatury. W układzie z cząstką czworościenną po osiągnięciu

przez cząstkę temperatury maksymalnej - temperatura osnowy i cząstki, w pobliżu granicy kontaktu jest najwyższa. Odpowiada to otoczeniu temperatury likwidus. Już przy wyjściu z zakresu krzepnięcia osnowa ma wyższą temperaturę niż zbrojenie. W obszarze z cząstką sześcienną przy osiągnięciu przez osnowę temperatury likwidus cząstka ma chwilowo wyższą temperaturę niż osnowa, potem już tylko niższą aż do końca zakresu krzepnięcia. Widoczny jest niewielki obszar gdzie temperatura osnowy przy cząstce jest niższa niż w obszarze osnowy oddalonym od cząstki. Po wyjściu poza zakres krzepnięcia cząstka posiada wyższą temperaturę niż osnowa. W odniesieniu do układu z cząstką kulistą cząstka zarówno w okolicach temperatury likwidus, jak solidus zbrojenie posiada niższą temperaturę niż otaczająca osnowa. Jak wynika z przedstawionych wykresów uśrednione gradienty temperatury wyraźnie zmieniają się w bezpośrednim otoczeniu cząstek zbrojących. Największe zmiany dotyczą stanu początkowego – wyrównywania temperatury oraz początku i końca krzepnięcia. Obecność tych zmian można wyjaśnić odmiennymi właściwościami termofizycznymi komponentów a zróżnicowanie ich wielkości morfologią. Od geometrycznego centrum cząstki do jej granicy oraz od granicy w głąb osnowy można zaobserwować malejącą zmienność gradientów. Gradienty te ustalają się w miarę oddalania od granicy kontaktu cząstka – osnowa. Dążenie do wyrównania temperatury jest najbardziej skuteczne w obecności cząstki czworościennej. W pozostałych obszarach z cząstką sześcienną i z kulą - są niewielkie różnice w wyrównywaniu temperatury, jednak występują większe zakresy wysokiego gradientu i szeregując je wzrastająco należy po czworościanie umieścić w kolejności sześcian i kulę. Ponadto w obszarze z cząstką czworościenną cała dziedzina jest przestrzenią istotnej zmienności gradientu, podczas gdy w pozostałych obszarach jest to zaledwie bezpośrednie sąsiedztwo cząstek zbrojących. W przebiegu zmienności analizowanym względem czasu można wyróżnić cztery charakterystyczne zakresy:

1. Początkowy – wyrównywania temperatury komponentów, najbardziej zróżnicowanego gradientu w otoczeniu cząstki zbrojącej, co związane jest z najwyższymi temperaturami w badanym układzie i związku z tym największym ich zróżnicowaniem. Widoczna jest zależność wielkości zróżnicowania od kształtu zbrojenia – objętość zamknięta pod powierzchnią funkcji gradientu jest największa dla cząstki kulistej, a najmniejsza dla czworościennej.
2. Obszar bezpośrednio poprzedzający wejście w zakres temperatury likwidus-solidus szczegółowo pokazano na rys. d i h). Wiąże się on ze zmianą znaku gradientu wzdłuż osi kierunku ruchu ciepła. Gradient początkowo zmierza do zera przed granicą z cząstką, osiąga przeciwny znak na granicy zmieniając się sięga ekstremalnie wysokiej wartości w pobliżu drugiej granicy, po czym tuż za nią ponownie zmienia znak. Zmiana znaku następuje po obu stronach cząstki tuż przed wejściem w obszar temperatury likwidus. Wyrównanie gradientu ma miejsce na poziomie zerowym. Intensywność zmian gradientu jest największa kolejno w kuli, sześcianie i czworościanie natomiast przestrzeń zmian - zarówno zakresu czasu jak i odległości: jest największa jest w obszarach z cząstką - w malejącej kolejności: kula, sześcian, czworościan. Na granicach arbitralnie przyjętych przedziałów proporcja

największych gradientów temperatury odniesionych do gradientu w obszarze z cząstką czworościenną jest następująca:

$$i = \frac{G_k}{G_{cz}} = 25,6 \quad i = \frac{G_{sz}}{G_{cz}} = 14,7$$

gdzie: indeksy k, cz i sz odnoszą się do gradientów w obszarach z cząstkami odpowiednio: kulistą, czworościenną i sześcienną

3. Zakres środkowy - zmniejszonego opadania powierzchni lub jej stabilizacją na poziomie zerowym. Stabilizacja jest spowodowana wydzielaniem ciepła krystalizacji. W tym zakresie występują lokalnie minimalne oraz maksymalne – oscylacyjnie zmienne wartości funkcji w odniesieniu do przestrzeni, ale także i czasu. Przykładem gdzie zmiany są najwyraźniejsze jest obszar z cząstką o kształcie kuli – rys. k). Grzbiety występujące po granicach zbrojenia wynikają z niewielkiego zróżnicowania temperatur komponentów, co głównie wynika z różnic w przewodności cieplnej
4. Końcowy – gdzie po wyjściu z zakresu krzepnięcia i związanymi z tym lokalnie ekstremalnymi wartościami gradientu w osnowie następuje przejście do stabilizacji funkcji na poziomie bliskim zeru. W objętości cząstki posiadającej przeważnie wyższą temperaturę niż osnowa oraz w jej otoczeniu występują po granicach ekstremalne wartości gradientu szybko gasnące w funkcji kierunku i czasu. Są to stany analogiczne występujących w zakresie początkowym jednak ze zmienionym znakiem. Tym razem przepływ ciepła odbywa się z przeciwnym zwrotem – od cząstki do osnowy.

W przebiegu zmienności pochodnej temperatury po czasie (dT/dt) początkowe efekty są najsilniejsze. Powierzchnia funkcji odpowiadająca metalowej osnowie charakteryzuje się większą zmiennością w porównaniu do obszaru cząstki, co także ma swoje źródło w różnicach w przewodnictwie cieplnym – dając szybszą reakcją osnowy na zmiany temperatury, tym samym mniejszą bezwładnością cieplną. Im większa powierzchnia kontaktu komponentów tym szybciej zachodzą wszystkie ciepłe zjawiska: nagrzewania zbrojenia, skróceniu ulega czas osiągnięcia maksymalnej temperatury, przy czym jej maksymalna wartość jest też wyższa. Występuje zmienność szybkości nagrzewania i stygnięcia cząstki czworościennej, co przedstawiono wcześniej wskazując na oscylacyjną zmienność temperatury. Duża szybkość nagrzewania czworościanu w funkcji czasu świadczy tym razem wysokiej dynamice, która wśród badanych cząstek jest najwyższa. Ponadto im większa powierzchnia cząstki tym mniejsze zróżnicowanie w zakresie czasu krzepnięcia przy samej powierzchni cząstki i na brzegach badanego obszaru. Ogólnie w całym zakresie czasu krzepnięcia występuje jego wydłużenie wraz ze zmniejszaniem się powierzchni zbrojenia. Maksymalne wydłużenie zakresu czasu krzepnięcia między cząstką czworościenną a kulistą wynosi prawie 28% a różnica między zakresami czasu krzepnięcia między obszarami z cząstką kulistą i sześcienną jest niewielka.

5. WNIOSKI

1. Przyjmując stały udział objętościowy zbrojenia wraz ze wzrostem powierzchni kontaktu komponentów przypadającym na jednostkę objętości zbrojenia - M_m obserwuje się istotny wpływ kształtu cząstek na rozkład temperatury i pochodnych temperatury po czasie i kierunku
2. Obszarem o najwyższej zmienności pochodnych temperatury jest granica kontaktu komponentów
3. Lokalnie w otoczeniu cząstki, w funkcji kierunku, przed osiągnięciem temperatury likwidus gradient temperatury zmienia znak
4. Wraz ze zmniejszaniem powierzchni strefy granicznej i modułu M_m rośnie gradient temperatury w cieczy przed osiągnięciem temperatury likwidus, zwiększa się także szybkość lokalnych wzrostów bądź spadków temperatury
5. Dobierając wartość modułu M_m oraz parametry termofizyczne komponentów można tworzyć kompozyty dyspersyjne o cechach charakterystycznych dla tzw. odlewania suspensyjnego z mikroochładzalnikami wewnętrznymi. Przykładem takiego rozwiązania jest przedstawiony przypadek obszaru kompozytowego zawierającego cząstkę czworościenną węgla krzemu w otoczeniu siluminowej okołoeutektycznej osnowy - tworzonych w przepływie, przy zróżnicowanych temperaturach początkowych komponentów
6. Zasięg sterowania kinetycznymi parametrami ruchu ciepła obejmować może całą objętość osnowy, co pokazano na przykładzie obszaru z cząstką czworościenną
7. Przy udziale objętościowym powyżej zbadanych 10% istnieje możliwość sterowania morfologią strukturalną całej osnowy kompozytu. Istnieje ponadto wysokie prawdopodobieństwo, że 10% poziom skutecznych oddziaływań można znacznie obniżyć.

LITERATURA

- [1] Flemings M.: *Solidification processing*, Met. Trans. New York, Mc Graw-Hill Book Co., v. 5, 1974
- [2] Fraś E.: *Krzepnięcie metali i stopów*, WN PWN, Warszawa 1992.
- [3] Kurz W., Fisher D. J.: *Fundamentals solidification*, Trans, Tech. Publ., Paris 1984.
- [4] Pietrowski S.: *Siluminy*, Wyd. Pol. Łódzkiej, Łódź 2001
- [5] Ares A.E., Schvezov C.E.: *Solidification Parameters During the CET in Lead – Tin Alloys*, Metall. And Mater. Trans.v. 31A, 2000 s. 1611
- [6] Rutter J., W., Chalmers B.: *Canadian Journal of Physics*, 1953, 31
- [7] Tiller W.A., Jackson K., A., Rutter J., W., Chalmers B.: *Acta Metall.*, 1953, 1, 428
- [8] Kac A., M.: *Priblizionnyj rascziot dendrytnowo strojenija otliwki*, Lit. Proizw., v. 7, 1980, s. 2
- [9] Ma D., Sam P.R.: *Erstarrungsmodell für den Primurabstand von Hellen und Dendriten*, Giesserei-Forschung, 1992, v. 44, nr2, s. 80

- [10] Miyata Y., Suzuki T., Uno J.: *Cellular and Dendritic Growth-cz. I i II*, Metall. Trans. v. 16A, 1985, s. 1799
- [11] [www.mse.mtu.edu/aluminium-silicon alloycastings](http://www.mse.mtu.edu/aluminium-silicon_alloycastings)
- [12] Brown S., Spittle J.A., Janes J.D.: *The mould Filling and Solidification of a complex Foundry Casting*, J.O.M., 2002
- [13] Mollard F., Flemings M.: Transactions of the Metallurgical Society of AIME, v. 239, 1967, s. 1526
- [14] Rappaz M., Gandin C.A.: *Probabilistic Modeling of Microstructure Formation in Solidification Processes*, Acta Metall. Mater., v. 41, 1993, s. 345
- [15] Liu J., Zhan Y., Shang B.: *Lamellar eutectic stable growth – I. Modeling*, Acta Metall. Mater., v. 38, 1990, s. 1625
- [16] Kurtz W., Fisher D. J.: Acta Metall., v. 28, 1980, s. 777
- [17] Khan S., Eliot R.: *Solidification kinetics of the unmodified aluminum – silicon flake structure*. Acta Metall. Mater., v. 41, 1993, s. 2433
- [18] Khan S., Ourdjini A., Eliot R.: *Interflake spacing – growth velocity relationship in Al-Si and Al-CuAl₂ eutectic alloys*, Mater. Sci. Technol. v. 8, 1992, s. 516
- [19] Weiss K., Honsel Ch., Gundlach J.: *Metoda elementów skończonych w symulacji cieplnej, metalurgicznej oraz mechanicznej Simtec*. Przegląd Odlewnictwa 6/1994

REINFORCEMENT MORPHOLOGY INFLUENCE ON SOLIDIFICATION KINETICS OF COMPOSITE MICRO REGIONS

SUMMARY

AlSi-SiCp composite was studied comparing thermal gradients and solidification rate at various contact surface between the components and variable surface area corresponding to volume unit (M_m). 10% reinforcement content was assumed. Different initial temperature of components was set ($T_z < T_o$). Solidification kinetics was compared for regions containing particles with different geometry.

Recenzował Prof. Jan Szajnar