

DYNAMIKA RUCHU CIEPŁA W MIKROOBSZARACH KOMPOZYTÓW

M. CHOLEWA¹

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

STRESZCZENIE:

W opracowaniu przedstawiono charakter zmian gradientów temperatury w hipotetycznych obszarach kompozytowych zawierających pojedyncze cząstki o kształtach: kuli, sześciangu i czworościanu. Założono trójwymiarowy symetryczny ruch ciepła podczas krzepnięcia przy pełnym fizycznym kontakcie między komponentami. Podjęto próbę opisu charakterystycznej zmienności gradientów wyznaczonej przy wykorzystaniu symulacyjnego programu opartego na metodzie elementów skończonych.

Keywords: micro volume, composite, simulation, gradient, temperature

1. ZWIĄZKI GRADIENTÓW TEMPERATURY I MODUŁU MORFOLOGICZNEGO Z TRANSPORTEM CIEPŁA W KOMPOZYCIE

Badano charakter transportu ciepła kształtującego strukturę osnowy kompozytu. W rozpatrywanej, kontrolnej, objętości mikroobszaru - w centrum hipotetycznego odlewu kompozytowego analizowano pojedyncze cząstki zbrojące o kształcie brył foremnych: kuli, sześciangu, czworościanu. Procesy cieplne zachodzące w kompozycie opisane są równaniami przewodnictwa cieplnego. Nieustalone pole temperatury w dwufazowej, na przykład około eutektycznej, matrycy krzepnącej w przedziale temperatur opisuje równanie Fouriera – Kirchoffa w postaci:

¹dr inż., SEKRMT3@zeus.polsl.gliwice.pl

$$c_1(T_1)\rho_1(T_1)\frac{\partial T_1(r,t)}{\partial t} = \text{div}[\lambda_1(T_1)\text{grad}T_1(r,t)] + L_1\rho_{1L}\frac{\partial S_1(r,t)}{\partial t} \quad (1) [1,2]$$

gdzie:

c_1 [J/kgK] jest ciepłem właściwym, L_1 – ciepłem krystalizacji, ρ_1 [kg/m³] - gęstością masy (indeks „L” odnosi się do stanu ciekłego), λ_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:

$$c_2(T_2)\rho_2(T_2)\frac{\partial T_2(r,t)}{\partial t} = M_m\Delta s \cdot \text{div}[\lambda_2(T_2)\text{grad}T_2(r,t)] + L_2\rho_{2L}\frac{\partial S_2(r,t)}{\partial t} \quad (2) [3,4]$$

gdzie:

c_2 [J/kgK], ρ_2 [kg/m³], λ_2 [W/mK], L_2 – stanowią parametry termofizyczne materiału zbrojenia, S_2 jest funkcja udziału fazy stałej w krzepnącym zbrojeniu; T_2 , r , Δs , t oznaczają temperaturę, uogólnione współrzędne przestrzenne, przyrost grubości zbrojenia oraz czas.

Przy czym przyjmując:

$$L_2\rho_{2L}\frac{\partial S_2(r,t)}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

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 :

$$c_2(T_2)\rho_2(T_2)\frac{\partial T_2(r,t)}{\partial t} = M_m\Delta s \cdot \text{div}[\lambda_2(T_2)\text{grad}T_2(r,t)] \quad (4)$$

Prezentowane rozważania dotyczą podstawowego stanu zakładającego pełny fizyczny kontakt komponentów. 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. Należy także założyć zmienność powierzchni i objętości faz lub z założonym błędem ustalić je na uśrednionym poziomie, przy czym, proponuje się założyć, że właściwości cieplne, różnią się od właściwości zbrojenia w stopniu porównywalnym do różnic między osnową a zbrojeniem. Niestety nie można podobnie potraktować nieciągłości spowodowanych niepoprawnym zwilżeniem. Szczeliny powietrzne mogą wpłynąć istotnie na proces krystalizacji i krzepnięcia z uwagi na termoizolacyjne właściwości gazów zaadsorbowanych lub wydzielonych na powierzchni zbrojenia. Obecnie trwają badania nad oceną wpływu nieciągłości na strukturę i przebieg krystalizacji. Natomiast prezentowane opracowanie jest kolejnym wariantem charakteryzującym obszar wokół cząstki podczas krzepnięcia. O ile charakter i wpływ modułu morfologicznego na podstawowe cechy kompozytów o osnowie aluminiowej wstępnie rozpoznano [3÷6], o tyle poznanie związków gradientów temperatury w osnowie i zbrojeniu z

podstawowymi cechami krzepnącego i eksploatowanego kompozytu są aktualnie opracowywane.

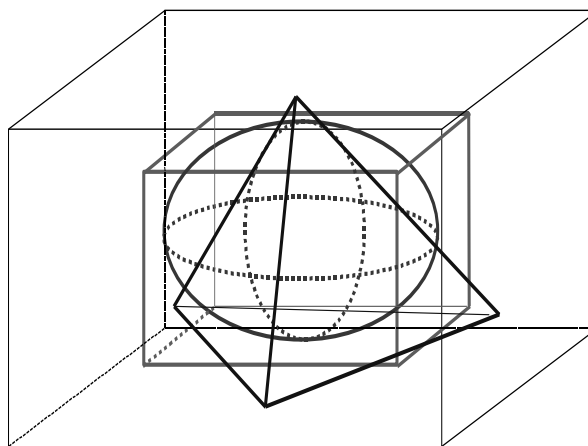
2. METODYKA BADAŃ

Opracowanie jest kontynuacją symulacji krzepnięcia mikroobszarów kompozytowych wykonywanych przy użyciu programu opartego na metodzie elementów skończonych [7]. Modelowy mikroobszar złożony jest z sześcianu stanowiącego osnowę około eutektycznego stopu Al-Si. W centrum obszaru umieszczono kolejno korundowe cząstki o hipotetycznym kształcie brył foremnych: czworościanu, sześcianu i kuli. Otoczenie badanego obszaru stanowił materiał o uśrednionych właściwościach osnowy i zbrojenia reprezentujących termofizyczne właściwości modelowanego obszaru kompozytu zawierającego w 10% swej objętości cząstki Al_2O_3 . Stąd też dla ułatwienia analizy wyników w analizowanym mikroobszarze przyjęto jednakową objętość wszystkich cząstek także równą dziesiątej części objętości całego sześciennego obszaru kompozytowego.

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]

Powyższe związki wynikają bezpośrednio z warunku zachowania stałej objętościowej zawartości zbrojenia. W centrum analizowanego obszaru umieszczono początek układu współrzędnych. Przyjęto następujące temperaturowe warunki początkowe - dla zbrojenia, osnowy, kompozytowego otoczenia, otaczającego powietrza - odpowiednio: 300, 720, 720, 25 °C. Następnie poszczególnym materiałom przyporządkowano odpowiednie właściwości termofizyczne, w większości zmienne w funkcji temperatury, które przyjęto korzystając z bazy danych programu lub wyznaczono z arytmetycznych zależności. Obliczenia przeprowadzono zakładając trójwymiarowy charakter transportu ciepła do otoczenia stanowiącego część układu odlew- forma otoczenie. Wynikiem obliczeń symulacyjnych są rozkłady obliczanych wielkości np.: charakterystycznych temperatur, czasów lub w procedurach postprocesingowych szybkości krzepnięcia na powierzchni odlewu lub w przekrojach, rozkład różnych wielkości kryterialnych. Rozkłady temperatur w badanej przestrzeni, w zakresie czasów i temperatur krzepnięcia, ujęto w tablice a następnie matematycznie opracowano wyniki. Utworzono na ich podstawie wykresy w postaci zależności opisujących ruch ciepła. Otrzymano je przez podzielenie poszczególnych mikroobszarów odpowiednimi przekrojami przy rejestracji zmian temperatur. Sporządzono co najmniej trzy przekroje w każdej cząstce i otoczeniu poczynając od płaszczyzn zawierających geometryczny środek bryły. Analizie poddano głównie gradienty temperatury podczas krzepnięcia kompozytu. Na rysunku 1 podano układ cząstek w przestrzeni sześciennego obszaru osnowy.



Rys.1. Schemat lokalizacji i kształtów cząstek charakteryzujących mikroobszary kompozytowe

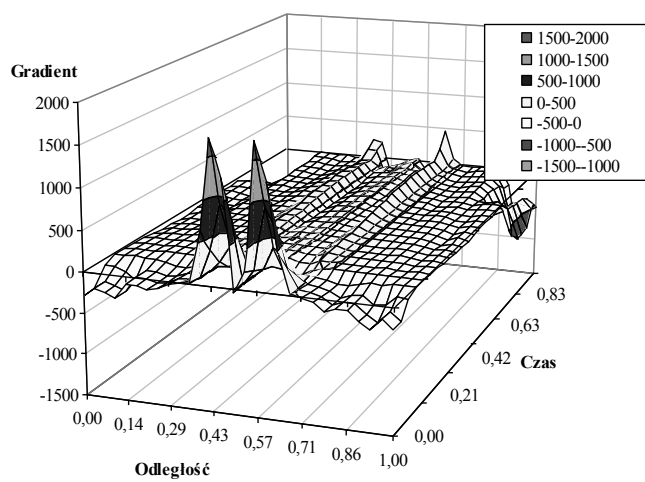
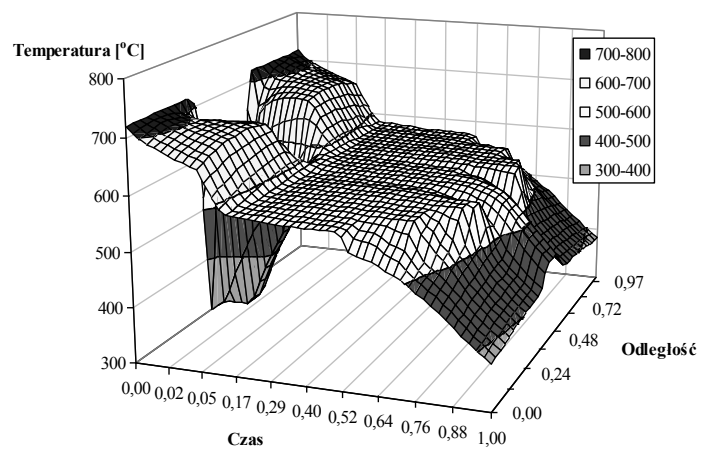
Fig. 1 Diagram of localization and shapes of particles described composite's micro zones.

3. WYNIKI OBLICZEŃ SYMULACYJNYCH I ICH ANALIZA

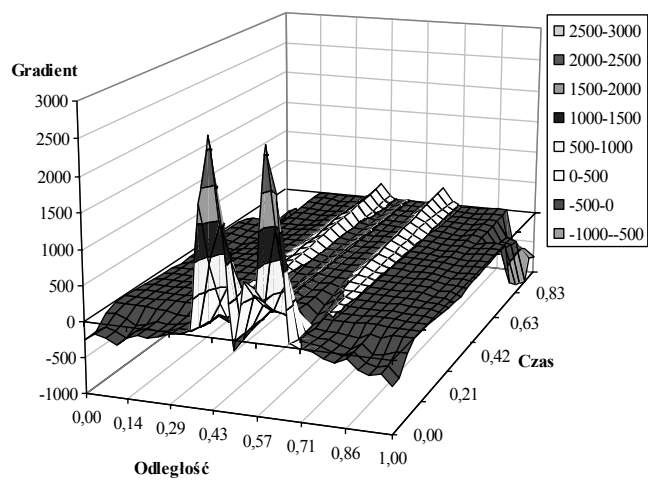
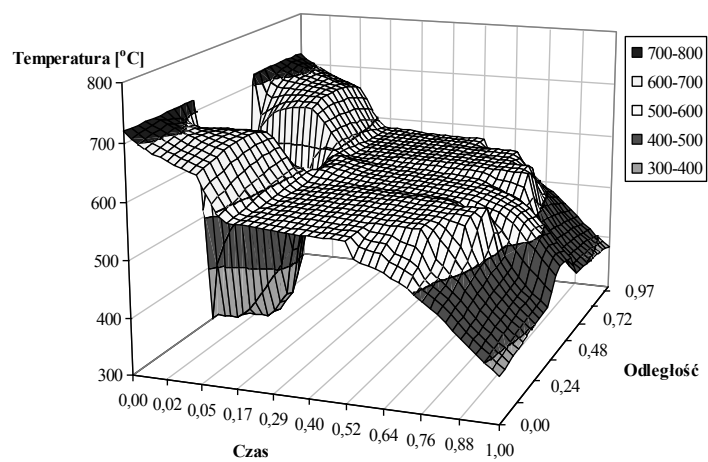
Na zamieszczonych poniżej rysunkach 2 a), b), i c) przedstawiono przykładowe, charakterystyczne wykresy zmian temperatury i gradientu temperatury podczas krzepnięcia badanych mikroobszarów w ich centralnych przekrojach.

Wyselekcjonowane zależności temperaturowe pozornie nie różnią się między sobą w istotny sposób. Jednak odpowiadające im zależności gradientowe wskazują na znaczne zróżnicowanie. 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. Wzrost gradientu w osnowie nie dość, że mniejszy – występuje ponadto w odległościach dwukrotnie większych niż w cząstce (dla ustalonego czasu). Prawdopodobnie jest to spowodowane istotnymi różnicami w przewodnictwie cieplnym komponentów. W końcowym okresie krzepnięcia w obszarze z czworościanem obserwowany jest wyraźny wzrost gradientu w osnowie ale także w cząstce. Prawdopodobnym czynnikiem odpowiedzialnym za taką kinetykę zmian jest geometria zbrojenia – ilość powierzchni oddającej ciepło przypadającej na jednostkę objętości magazynującej ciepło. Wyraźny jest tutaj związek z modulem morfologicznym. Zebrane informacje nie wystarczają do wyciągnięcia daleko idących wniosków czy nawet hipotez.

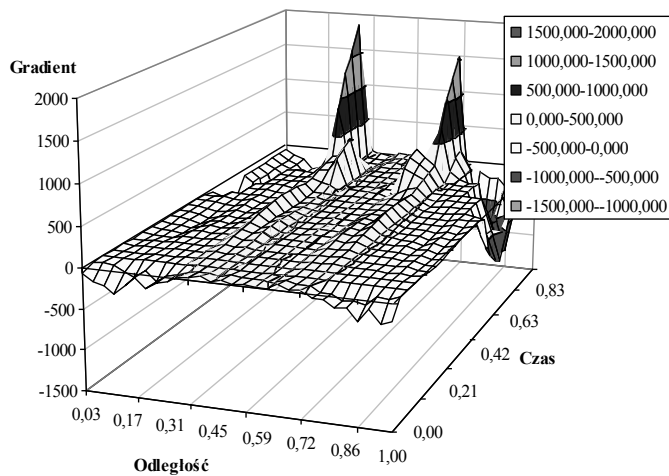
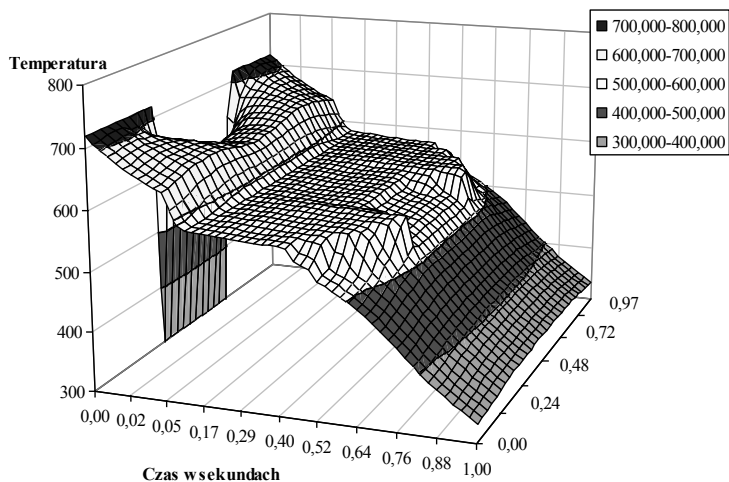
a)



b)



c)



Rys.2. Wybrane, przykładowe wykresy zmian temperatury i gradientu temperatury w funkcji bezwymiarowego czasu krzepnięcia i bezwymiarowej odległości na kierunku oddawania ciepła. Oś cieplna przechodzi przez środek obszaru zawierającego cząstkę: a) kulistą, b) sześcienną, c) czworościenną regularną

Fig 2. Diagrams of temperature and temperature gradient changing in dimensionless time dependent and dimensionless distance dependent on give up heat direction. Heat axis takes place in middle of zone including particle: a) spherical, b) cubic, c) tetrahedral.

Na szczególną uwagę zasługuje typowa dla różnych kompozytów zmienność gradientów charakteryzująca się przyjmowaniem, chwilowych ekstremalnych wartości, nawet o przeciwnych znakach. Powyższą prawidłowość zarejestrowano w różnym stopniu w symulacjach uwzględniających jedno i trójwymiarowy ruch ciepła w przypadku zakładanego pełnego i częściowego zwilżenia przy odmiennych warunkach początkowych i brzegowych. Wydaje się, że próbą czytelnego opisu powinno być wykorzystanie rozkładu tym podobnych funkcji okresowych na szeregi Fouriera, które stosuje się w analizie okresowych funkcji nieharmonicznych, tutaj z uwzględnieniem funkcji tłumiących np. wykładniczych :

$$mc_w \frac{d^2G}{dt^2} = -bG - k \frac{dG}{dt} \quad (5)$$

$$\frac{d^2G}{dt^2} + 2\delta \frac{dG}{dt} + \omega_0^2 G = 0 \quad (6)$$

$$2\delta = \frac{k}{mc_w} \quad ; \quad \omega_0^2 = \frac{b}{mc_w} \quad (7;8)$$

gdzie:

k – jest współczynnikiem proporcjonalności charakteryzującym opory ruchu ciepła spowodowanego obecnością cząstek zbrojących; natomiast b – stałą wymagającą wyznaczenia dla konkretnego przypadku.

Po różniczkowaniu dla drgań harmonicznym tłumionych:

$$g = G_0 e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi) \quad (9)$$

gdzie

ω – pulsacja początkowa drgań tłumionych; ($\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$)

δ – stała tłumienia

e – podstawa logarytmu naturalnego

G_0 – początkowa maksymalna wartość amplitudy gradientu

Dla nieharmonicznych drgań tłumionych:

$$g' = G_0' e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi') \quad (10)$$

$$g'' = G_0'' e^{-\delta t} \sin(2\omega t + \varphi'') \quad (11)$$

$$\dots\dots\dots g^{(n)} = G_0^{(n)} e^{-\delta t} \sin(n\omega t + \varphi^{(n)}) \quad (12)$$

$$g = g' + g'' + \dots + g^{(n)} \quad (13)$$

4. WNIOSKI I UWAGI

Przeprowadzone obliczenia symulacyjne krzepnących mikroobszarów kompozytowych rozpatrywano głównie analizując przede wszystkim gradienty temperatury. Już samo definicyjne pojęcie gradientu kryje w sobie element „dynamiki”. Przekształcone równanie Fouriera wskazując na związki dynamiki ruchu ciepła w układzie osnowa/zbrojenie daje w swym ogólnym zapisie obraz zmian zachodzących w krzepnącym kompozycie także w zależności od modułu morfologicznego.

1. Stwierdzono wysoką zmienność gradientów temperatury w pobliżu granicy kontaktu osnowa/zbrojenie we wszystkich rodzajach hipotetycznych cząstek w zakresie temperatur i czasów krzepnięcia
2. Zmienność objawia się przyjmowaniem wartości dodatnich i ujemnych przy wyraźnym tłumieniu wahań wraz z oddalaniem się od strefy kontaktu
3. Lokalne, chwilowe ujemne wartości gradientów temperatury oraz zmienność elementarnych strumieni cieplnych mogą być spowodowane następującym zespołem czynników:
 - termofizycznymi, odmiennymi właściwościami zbrojenia w stosunku do osnowy;
 - morfologią zbrojenia;
 - specyfiką wydzielania się ciepła krystalizacji w przestrzeni kompozytu i w funkcji czasu
4. Prawdopodobnie istnieje możliwość opisu zachodzących zmian równaniami harmonicznymi drgań gasnących

Wskazane jest dalsze rozwijanie i doskonalenie metod badawczych i metodyki opisu procesów krystalizacji i krzepnięcia w bliskim otoczeniu elementów zbrojących oraz przeprowadzenie badań porównawczych z wykorzystaniem innych programów symulacyjnych.

LITERATURA:

- [1] Majchrzak E. , Mochnacki B.: Metody Numeryczne. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1996
- [2] Mochnacki B, Suchy J. S.: Modelowanie i symulacja krzepnięcia odlewów. P.W.N. Warszawa 1993
- [3] Cholewa M., Gawroński J.: Wpływ geometrii cząstek zbrojących na krzepnięcie mikroobszaru kompozytu, Mat. Konf. Krzepnięcie Metali i Stopów, PAN Katowice, 1998
- [4] Cholewa M.: Opis krzepnięcia mikroobszaru kompozytowego zbrojonego elementami dyspersyjnymi za pomocą modułu morfologicznego, „Kompozyty 2000’ Teoria i Praktyka” PTMK Ustroń 2000r
- [5] Gawroński J. Cholewa M.,: Analiza ruchu ciepła w mikroobszarze kompozytu zbrojonego cząstkami SiC, Mat. Konf. Krzepnięcie Metali i Stopów, PAN Katowice, 1998

- [6] 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,
- [7] Weiss K., Honsel Ch., Gundlach J.: Metoda elementów skończonych w symulacji cieplnej, metalurgicznej oraz mechanicznej Simtec. Przegląd Odlewnictwa 6/1994

DYNAMIC OF HEAT MOVEMENT IN COMPOSITES MICRO ZONE

SUMMARY

In the study was presented character of temperature gradient changing in hypothetical composite's zone including single particle: sphere -, cubic -, tetrahedron – shaped. Symmetrical three dimensions heat movement during solidification with fully contact between components were assumed. The try of describing characteristically gradient changing determined by using simulate program was taken.

Recenzował Prof. Józef Gawroński