

## DOŚWIADCZALNE I SYMULACYJNE BADANIE KRZEPNIĘCIA ALUMINIOWEJ OSNOWY KOMPOZYTU

M. CHOLEWA<sup>1</sup>

Zakład Odlewnictwa, Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych  
Wydział Mechaniczny Technologiczny Politechniki Śląskiej  
ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice POLAND

### STRESZCZENIE

W opracowaniu poddano ocenie wyniki badania kinetyki ruchu ciepła podczas krzepnięcia osnowy kompozytu w otoczeniu pojedynczej cząstki zbrojącej o regularnym kształcie. W celu umożliwienia porównania wyników w analizie przyjęto makromodel (rys.1.). Założono niezmiennosc stosowania praw fizyki przy wielkościach typowych dla kompozytów zbrojonych cząstkami dyspersyjnymi. Na podstawie pomiaru temperatury w doświadczeniu oraz pola temperatury uzyskanego z symulacji wyznaczono pochodne temperatury po czasie i kierunku, co pokazano na rys. 3. Pomimo istotnych różnic w wynikach wykazano zgodność w ocenie procesu i możliwości wzajemnego uzupełniania się obu metod w analizie procesu krzepnięcia.

*Key words: composite, solidification, experimental, simulation, comparison*

### 1. WPROWADZENIE

Kształtowania struktury kompozytu w strefie przejścia daje potencjalne możliwości optymalizacji właściwości użytkowych kompozytu. Głównie dotyczy to ograniczenia warunków destrukcji odlewane go kompozytowego elementu. Badanie procesu krzepnięcia osnowy kompozytu jest obecnie możliwe jedynie metodami symulacyjnymi. Wynika to z

---

<sup>1</sup> dr inż., [sekrmt3@zeus.polsl.gliwice.pl](mailto:sekrmt3@zeus.polsl.gliwice.pl)

nano- lub mikrometrowej wielkości strefy przejściowej. Przeprowadzenie symulacji przy różnym stopniu digitalizacji badanego obszaru oraz przy różnej wielkości badanego obszaru daje zbliżone wyniki [1, 2] Ponadto można uwzględnić wpływ kształtu cząstek zbrojących [3, 4]. Stosowane do analizy prawa ruchu ciepła posiadają uzasadnienie wówczas, jeśli wielkość badanego obszaru nie wpływa na termofizyczne i chemiczne cechy badanych substancji tj. zachowując ich charakterystyczne atomowe właściwości. Jeśli przyjąć metodę symulacji komputerowej jako wiodącą w badaniu procesu krzepnięcia kompozytu wskazane jest zidentyfikowanie różnic w wynikach uzyskiwanych na drodze symulacji i doświadczenia. Poniższe opracowanie jest próbą zidentyfikowania różnic w wynikach uzyskanych przyjętymi metodami. W analizie posłużono się wspólnym makro modelem w doświadczeniu i symulacji.

## 2. BADANIA WŁASNE

Celem badań jest sprawdzenie fizycznego modelu kinetyki ruchu ciepła w podstawowym układzie możliwie najwierniej oddającym specyfikę mikroobszaru kompozytowego. Przedmiotem weryfikacji jest charakter zmian pochodnych temperatury w krzepnącym metalu w obecności ceramicznego elementu zbrojącego.

Podstawowym, teoretycznym przypadkiem reprezentującym mikroobszar kompozytowy jest kulista cząstka zbrojąca, otoczona osnową. Przeprowadzenie symulacji opartej na podobnym modelu nie stwarza trudności w przeciwieństwie do wykonania eksperymentu. Jednoczesne przeprowadzenie doświadczenia fizycznego i symulacji wymusza poza specjalnie dobraną geometrią badanego układu także szczególny dobór skojarzeń materiałowych możliwych do równoległej realizacji symulacji i doświadczenia.

Badaniom poddano, układ symetrycznie osiowy złożony z poniższych składników wymienionych w kolejności odpowiadającej rosnącej odległości od centrum układu:

- Walcowej, umownej cząstki zbrojącej umieszczonej centralnie w początku układu współrzędnych. Przyjęto korundowy materiał termoizolacyjny - jako przykład zbrojenia o minimalnym przewodnictwie cieplnym
- Otaczającej osnowy o cechach wysokiego przewodnictwa cieplnego. Przyjęto technicznie czyste aluminium (Al 99,99)
- Przegrody miedzianej umożliwiającej najlepszy kontakt cieplny elementarnego obszaru kompozytowego z otoczeniem kompozytowym
- Ośrodek tworzący kompozytowe otoczenie osnowy i zbrojenia o uśrednionych cechach komponentów oraz
- Siluminowej kokili otaczającej krzepnący układ.

Ponadto przyjęto:

1. Początek układu współrzędnych odpowiadający centralnemu punktowi kołowego układu
2. Pionową oś symetrii układu
3. Poziome płaszczyzny izolujące ruch ciepła pochodzący od pionowych składowych strumieni ciepłych

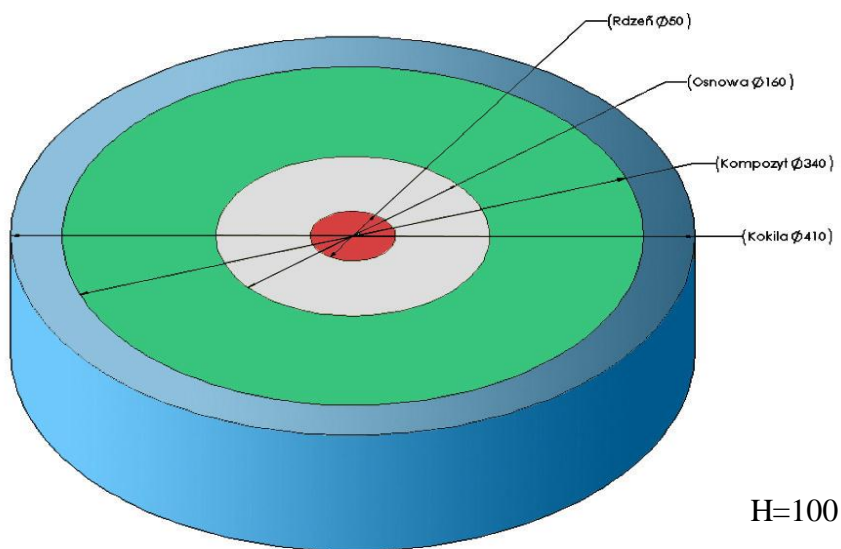
Weryfikacja doświadczalna podstawowych symulacji została przyjęta według następujących założeń:

1. Istnieje statystyczna geometryczno-ciepłna powtarzalność mikroobszarów: „cząstka-osnowa” w przestrzeni kompozytu
2. Badany obszar znajduje się w centrum odlewu a jednostkowe strumienie ciepłe są jednakowe we wszystkich kierunkach
3. Zbrojenie stanowi 10 % objętości kompozytu

Warunki początkowe:

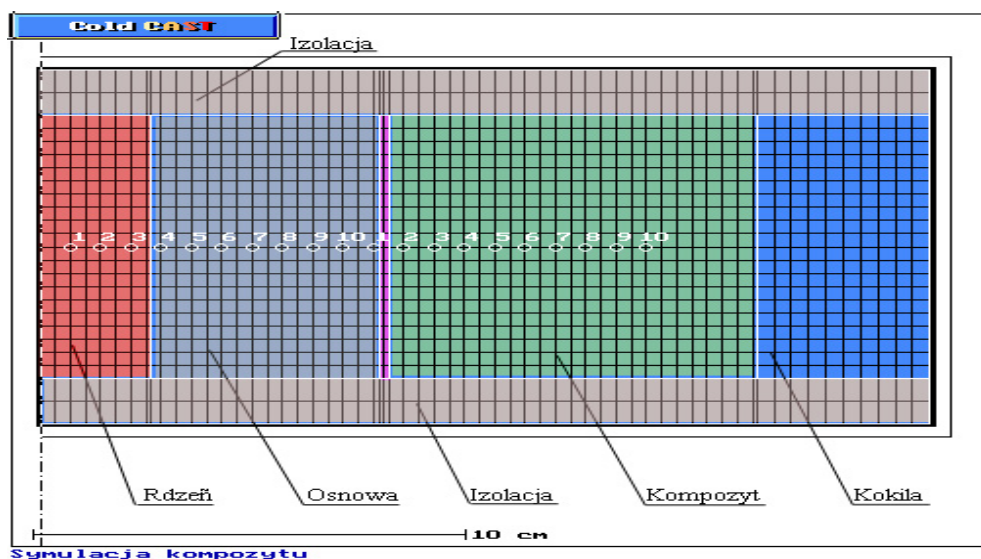
- 1 Temperatura rdzenia  $300^{\circ}\text{C}$
- 2 Temperatura osnowy  $720^{\circ}\text{C}$
- 3 Temperatura otoczenia kompozytowego  $720^{\circ}\text{C}$
- 4 Temperatura kokili  $300^{\circ}\text{C}$
- 5 Temperatura płyt izolujących odpływ ciepła w kierunku pionowym  $300^{\circ}\text{C}$

Badane skojarzenia materiałowe pokazano schematycznie na rys. 1



Rys. 1. Schemat badanego układu kompozytowego.  
Fig. 1. Scheme of tested composite system

Wynikiem doświadczenia jest pole temperatury w przestrzeni cząstki i jej otoczeniu tj. w osnowie przy możliwie najbardziej zbliżonych do rzeczywistych warunkach transportu ciepła z układu dwóch komponentów. Realizacja zadania polega na rejestracji temperatury mierzonej przez 15 termopar równomiernie umieszczonych na współśrodkowych równo oddalonych okręgach leżących jednocześnie wzdłuż linii spiralnej zapewniającej ułożenie jednej termopary na właściwym dla niej kierunku oddawania ciepła. Termopary umieszczono w połowie wysokości odlewu. Następnie wykonano symulację analogiczną do przeprowadzonego eksperymentu. Geometrię symulowanego obszaru pokazano na rys. 2. Rzeczywiste, początkowe temperatury eksperymentu nieznacznie odbiegały od założonych, co widoczne jest na wykresach pól temperatur przedstawionych na rysunku 3. Na kolejnych rysunkach podano pola temperatur w funkcji czasu krzepnięcia na kierunku oddawania ciepła oraz w tych samych współrzędnych pochodne temperatury po czasie i kierunku. Obrazują to rysunki 3 a) c) i e). Dla porównania doświadczenia z symulacją zamieszczono także po prawej stronie wykresy wynikowe uzyskane na podstawie obliczeń symulacyjnych - rysunki 3 b), d) i f). Na rysunku czas podano w sekundach a wielkość promienia definiuje się za pomocą 10 punktów pomiarowych odległych od siebie o 7 [mm]. Rzeczywista długość na kierunku oddawania ciepła w prezentowanym układzie współrzędnych wynosi 70 [mm] i odpowiada 10 punktom pomiarowemu.

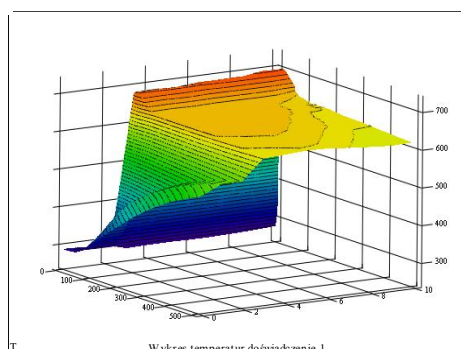


Rys. 2. Przykładowe okno programu symulacyjnego przedstawiające modelowany układ  
 Fig. 2. The example window of simulation software showing modeled system

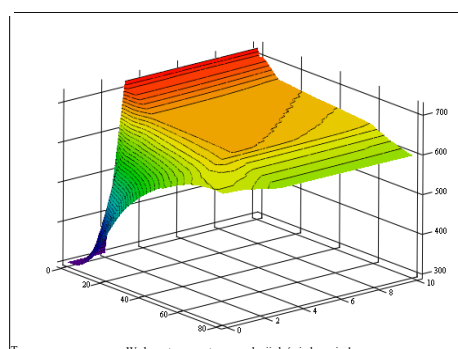
### 3 ANALIZA WYNIKÓW

Pierwotnymi wynikami doświadczenia i symulacji są pola temperatur. Na ich podstawie tworzy się pola rozkładu pochodnych temperatury. Zatem precyzja pomiaru temperatury wyznacza precyzję ostatecznych wyników tworzonych na podstawie zarejestrowanych zmian temperatury. Typowe niedoskonałości pomiaru temperatury wynikają z istoty pomiaru i stosowanych czujników. Termoelementy wprowadzają zakłócenia pomiaru, które tworzą trzy współzależne grupy:

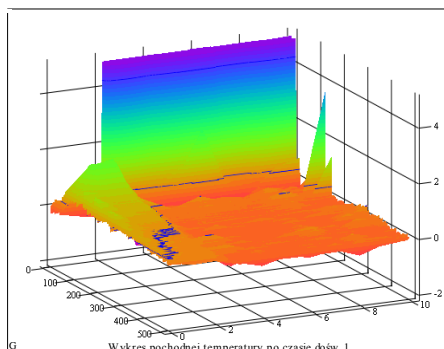
1. Bezwładność pomiarową złącza, na którą wpływa objętość i termofizyczne właściwości złącza
2. Nieskompensowane, radiacyjne działanie przewodów tworzących termoparę
3. Skończona wielkość złącza pomiarowego zaburzającego ruch ciepła



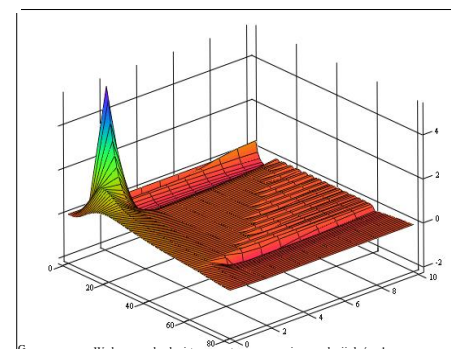
a)



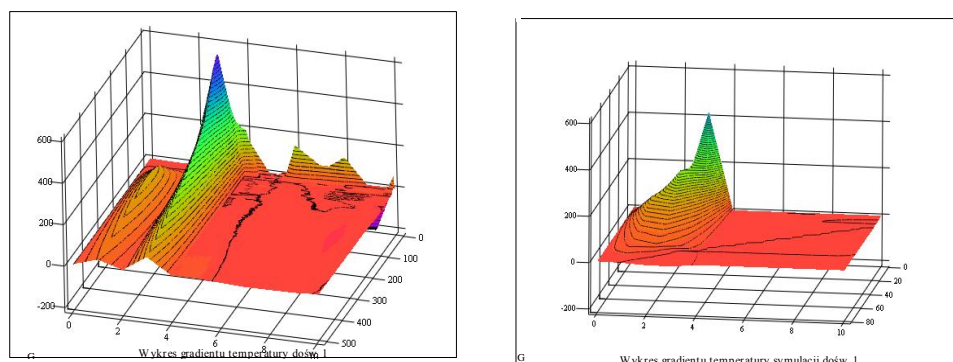
b)



c)



d)



e) f)  
 Rys. 3. Powierzchnie: temperatury, pochodnej temperatury po czasie i gradientu temperatury w funkcji czasu i kierunku ruchu ciepła w zakresie temperatur i czasów krzepnięcia obszaru kompozytowego zawierającego zbrojenie o małym współczynniku przewodzenia ciepła.  $T=f(t,r)$  [ $^{\circ}\text{C}=f(s, 7 \text{ mm})$ ] - a) i b);  $dT/dt=f(t,r)$  [ $\text{K/s}=f(s, 7 \text{ mm})$ ] - c) i d);  $dT/dr=f(t,r)$  [ $\text{K/cm}=f(s, 7 \text{ mm})$ ] - e) i f). Wykresy a), c) i e) odnoszą się do doświadczenia, natomiast b), d) i f) symulacji. Założono zróżnicowane temperatury początkowe komponentów -  $T_z < T_o$ ,  $\Delta T = 420 \text{ K}$

Fig. 3. Surface diagrams: temperature, time derivative of temperature and temperature gradient in dependences of time and direction of heat motion in range of solidification times of composite with low heat conductive force  $T=f(t,r)$  [ $^{\circ}\text{C}=f(s, 7 \text{ mm})$ ] - a) i b);  $dT/dt=f(t,r)$  [ $\text{K/s}=f(s, 7 \text{ mm})$ ] - c) i d);  $dT/dr=f(t,r)$  [ $\text{K/cm}=f(s, 7 \text{ mm})$ ] - e) i f). Diagrams a), c) and e) are experimental, b), d) and f) are results of simulations.

Weryfikacja doświadczalna jest kompromisem między ideą a rzeczywistością i możliwościami pomiarowymi. Cechą charakterystyczną układu jest współistnienie w procesie krzepnięcia dwóch obszarów ciekłego metalu oraz trzech obszarów ciał stałych: Takiemu układowi odpowiadają cztery powierzchnie kontaktu ciał stałych z ciekłymi, w których zakłada się idealny kontakt fizyczny będący wynikiem doskonałego zwilżenia. Uzasadnia to znaczny - blisko 3 krotnie krótszy czas krzepnięcia osnowy badanego obszaru wynikający z symulacji w porównaniu do doświadczenia. Ponadto bezwładność czujników temperatury powoduje przesunięcie w czasie rejestrowanych temperatur oraz spłaszczenie szczególnie dynamicznych zmian temperatury.

1. Analiza rozkładu temperatury:

- Początkowa temperatura rejestrowana w układzie symulowanym odpowiada wypełnieniu formy metalem o temperaturze  $720 \text{ }^{\circ}\text{C}$  - w obecności elementów nagranych zgodnie z założeniem do  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Na odpowiednich wykresach rys. 3 a) i b) widoczne jest zróżnicowanie stanu początkowego, które w doświadczeniu (rys. a)) objawia się obniżeniem

maksymalnej temperatury początkowej poniżej wymaganej wartości 720 °C oraz zróżnicowaniem temperatury w poszczególnych punktach pomiarowych, co wynika z losowo zmiennych lokalnych objętości metalu zapelniającego wnękę formy. Należy podkreślić, że przyjęty symulacyjny model nie uwzględnia zapelniania wnęki formy metalem i jego wpływu na rozkład temperatur w odlewie

- Charakterystyczny przystanek temperatury związany z ciepłem krystalizacji występuje na obu wykresach razem z jego maksimum, które w przypadku doświadczenia jest przesunięte w kierunku osnowy, co może wskazywać na niewiele większy od przyjętego współczynnik przewodzenia ciepła ceramicznego zbrojenia
  - Kształt doświadczalnej powierzchni nagrzewania zbrojenia wykazuje lokalne maksimum równoległe do osi czasu, co wynika z różnych szybkości nagrzewania warstwy przy powierzchniowej zbrojenia w stosunku do jego wnętrza
  - Podobny choć znacznie mniejszy efekt występuje w powierzchni wykresu wynikającej z symulacji
  - Prostoliniowym odcinkom izoterm z symulacji odpowiadają zniekształcone odcinki izoterm doświadczalnych, co jest wynikiem niejednorodnego pola temperatur początkowych wywołanych losowym charakterem zapelniania wnęki formy.
  - Pozostałe fragmenty wykresów są w pełni analogiczne i nie wymagają komentarza
2. Rozkład pochodnych temperatury
- 1 Opisane powyżej rozkłady temperatury znajdują swoje wyeksponowane obszary na powierzchniach pochodnych temperatury po czasie i kierunku
  - 2 Początkowe doświadczalne niskie temperatury osnowy wywołują wysokie wartości powierzchni derywacyjnej, które jako efekty brzegowe należałoby odrzucić
  - 3 Lokalne maksimum równoległe do osi czasu występujące w przestrzeni cząstki złożone z dwóch grzbietów wyraźnie widocznych w symulacji jest związane z różnicami prędkości nagrzewania przypowierzchniowych części zbrojenia. Aczkolwiek oba wykresy wskazują na taki stan to powierzchnia doświadczalna jest bardziej wydłużona w czasie i wartość maksymalna jest także mniejsza a wyróżnienie drugiego lokalnego maksimum jest wątpliwe
  - 4 Nierównomierność powierzchni na wykresie z symulacji rozciągająca po przekątnej układu (czas-kierunek) nie posiada odpowiednika na powierzchni doświadczalnej, co jest spowodowane odmiennym od założonego w symulacji wydzielaniem spektralnego ciepła krystalizacji. Obszar posiada nieco większe zróżnicowanie pochodnej jednak nie układa się ono wzdłuż granicznej linii przekątnej, co wynika ze szczególnego układu podziału współrzędnych na wykresie dotyczącym symulacji. Krzepnięcie następuje tam równomiernie ze

wzrostem wartości osi wyznaczających poziomą płaszczyznę współrzędnych. W doświadczeniu nie uzyskano podobnej - szczególnej równomierności

- 5 Kolejne lokalne maksimum na powierzchni doświadczalnej położone w pobliżu początku układu współrzędnych jest wynikiem zaburzeń początkowych obserwowanych na wykresie temperatur i nie można mu nadać interpretacji związanej z modelem fizycznym
  - 6 Lokalne minimum na powierzchni symulacji występujące na początku i końcu zakresu krzepnięcia jest wyraźne na powierzchni doświadczalnej tylko dla początku zakresu krzepnięcia
3. Rozkład gradientu temperatury
- 1 Różnice występujące na początku czasu krzepnięcia są spowodowane opisanymi poprzednio efektami brzegowymi związanymi z losową zmiennością temperatury podczas zalewania
  - 2 Opisane uprzednio podwójne maksimum związane z różnicami nagrzewania przypowierzchniowych oraz wewnętrznych przestrzeni cząstki zbrojącej posiada także tutaj swój odpowiednik
  - 3 Podobnie jak w przypadku powierzchni derywacyjnej odpowiednie efekty są wydłużone w zakresie czasu krzepnięcia dodatkowo na początkowe maksimum nałożony został efekt początkowy, co spowodowało zwiększoną w stosunku do symulacji wartość graniczną obserwowanego maksimum
  - 4 Analogicznie do wykresów temperatury na powierzchni doświadczalnej wyraźniejsze jest drugie lokalne maksimum, którego centrum jest przesunięte w głąb zbrojenia o ok. 30%. Jak należało oczekiwać pochodna kierunkowa lepiej oddaje zmiany związane ze zmiennością temperatury w przestrzeni

#### 4. WNIOSKI

1. Metody badawcze: zarówno doświadczalna jak i symulacyjna obarczone są właściwymi sobie niedoskonałościami. Trudny do wyeliminowania wpływ zapełniania formy na rozkład temperatury istotnie może wpływać na ocenę zachodzących zjawisk nie posiadając swojego fizycznego odpowiednika w warunkach tworzenia kompozytu - w mikroskali
2. Dzięki nieścistościom dotyczącym różnych obszarów badanego procesu wyniki uzyskane na drodze doświadczalnej i symulacyjnej wzajemnie się uzupełniają
3. Potwierdzono jakościowo przyjęty model kinetyki ruchu ciepła w układzie z cząstką o regularnym kształcie
4. Spośród czynników, wpływających na proces krzepnięcia kompozytu należy wskazać na termofizyczne korelacje między komponentami, temperatury początkowe tworzenia kompozytów oraz proporcje między ilością komponentów.



5. Istnieje możliwość kształtowania szybkości i gradientów temperatury, co stwarza możliwość regulowania strukturą kompozytu w bezpośrednim sąsiedztwie zbrojenia.

#### **LITERATURA**

- [1] Cholewa M.: Szczególny przypadek kinetyki cieplnej w modelu krzepnącego kompozytu: ceramiczna cząstka-metalowa osnowa, 12th 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 Zakopane 2003, 147
- [2] Cholewa M.: Kinetyka ruchu ciepła w układzie cząstka ceramiczna – osnowa metalowa, PTMK Kompozyty, Teoria i Praktyka' 2004,
- [3] Cholewa M.: Korelacje między cieplno-geometrycznymi właściwościami zbrojenia w kompozytach dyspersyjnych, K. M. i S, PAN Katowice, 2000, v. 2, nr 44, 57
- [4] Cholewa M.: Wybrane właściwości kompozytu zbrojonego cząstkami w funkcji morfologii zbrojenia, K. M. i S, PAN Katowice, 2000, v. 2, nr 44, s. 65

#### **EXPERIMENTAL AND SIMULATION TESTS OF COMPOSITE'S ALUMINIUM MATRIX SOLIDIFICATION**

#### **SUMMARY**

Results of heat motion kinetics during solidification composite's matrix in surrounding of one forcing particle with regular shape have been evaluated in the article. In the aim of possibilities of comparison in the analysis the macro-model (fig. 1.) have been assumed. Invariability of using physics rights for typical value of composites forced with dispersible particles also has been assumed. Basis on the measured temperature and field of temperature from simulation, time and direction derivative of temperature have been determined what have been showed in fig. 3.

Recenzował Prof. Józef Gawroński