

NUMERYCZNA SYMULACJA NAPRĘŻEŃ I DEFORMACJI W ODLEWACH – MOŻLIWOŚCI I KOSZTY ANALIZY

Grabski J., Strzałko J.

Numerical simulation of residual stress and deformations of casting are discussed. Some examples of deformations results of motor wheel castings are presented. Cost of numerical analysis are mentioned.

1. WPROWADZENIE

Symulacja komputerowa jest jednym z podstawowych narzędzi w procesie zarządzania jakością. Wspomagane komputerowo projektowanie, symulacja procesu odlewania, analiza naprężeń w odlewie są kolejnymi etapami umożliwiającymi skuteczną poprawę jakości wyrobu [1].

Modelowanie numeryczne procesu odlewania obejmuje, między innymi, wymianę ciepła w układzie odlew-forma. Umożliwia ono określenie zmian pola temperatury w odlewie, a w konsekwencji pozwala na prognozowanie stanu jego naprężeń wewnętrznych oraz wyznaczenie odkształceń [1-8].

Rynek oprogramowania typu CAD/CAM/CEA stale się rozszerza. Rosną też możliwości oferowanego oprogramowania i sprzętu. Stwarza to szansę dla powszechniejszego wykorzystania symulacji komputerowej w przygotowaniu procesu produkcyjnego. Bariery są jeszcze wysokie koszty wyspecjalizowanego oprogramowania oraz brak pewności co do poprawności rezultatów otrzymanych drogą symulacji. Wiarygodność wyników będzie jednak wzrastać wraz z rozpowszechnianiem systemów symulacji i poszerzaniem grona specjalistów od strategii obliczeń, modelowania zjawisk, doboru parametrów dla procedur rozwiązujących, itp. Dla przyswojenia tych umiejętności konieczne jest doświadczenie zdobywane w trakcie używania konkretnego oprogramowania. Interesujące uwagi na temat można znaleźć w pracy [9].

2. SYSTEMY WSPOMAGANIA PROJEKTOWANIA I SYMULACJI KOMPUTEROWEJ W ODLEWNICTWIE

Do najbardziej znanych programów, przeznaczonych do numerycznego modelowania zjawisk termomechanicznych zachodzących w procesie odlewania, zaliczyć można systemy: **MAGMA**, **SIMTEC**, **ProCAST**, **PAM-QUIKCAST**, **Flow-3D**, **NOVACAST**, **CASTech**, **AFSolid3D**, **SIMULOR**. W Polsce, na Politechnice Częstochowskiej rozwijany jest system **NuscaS** [3-5].

Wymienione programy umożliwiają symulację: napełniania formy, krzepnięcia metalu, przepływy ciepła pomiędzy odlewem formą i otoczeniem, powstawania deformacji i naprężeń w odlewach. Istnieje także grupa programów CAE przeznaczonych do procesu odlewania wyrobów z tworzyw sztucznych (np.: **MODFLOW**).

Prócz tych wyspecjalizowanych programów do analizy numerycznej niektórych zjawisk zachodzących podczas odlewania wykorzystywane są standardowe systemy MES takie jak: **ABAQUS**, **ANSYS**, **COSMOS**, **NASTRAN**, itp.

Poniżej przedstawione zostaną podstawowe informacje o programach **SIMTEC** i **MAGMA** oraz ich zastosowaniach w odlewnictwie.

2.1. Systemy SIMTEC i MAGMA

Program był rozwijany od 1984 roku przez niemiecką firmę RWP, a następnie **SIMTEC** (centrum badawcze pozostaje w Niemczech). Aktualnie jego producenci szczycą się 350 instalacjami

systemu na świecie, przy czym dominuje on w europejskim przemyśle samochodowym.

Podstawowe moduły **SIMTEC** dokonują: automatycznej generacji siatki elementów (ANG), analizy zagadnienie napełniania formy (FILL), obliczeń pól temperatur (TFB), obliczeń naprężeń, odkształceń (SPA), postprocesingu (EDA).

Programy **SIMTEC** mogą również przewidywać odległości gałęzi w dendrytach, deformacje odlewów i form. Dzięki wykorzystaniu siatki MES możliwy jest eksport naprężeń resztkowych do innych pakietów MES i wykorzystanie tych rezultatów w dalszych analizach wytrzymałościowych.

W Polsce system **SIMTEC** jest wykorzystywany w Instytucie Odlewnictwa Politechniki Śląskiej oraz w firmach CAD CAM Solution i Newtech Engineering sp.z o.o.

W systemie **MAGMA** wykorzystana jest metoda różnic skończonych (MRS). Podstawowa konfiguracja systemu (**MAGMASOFT**) pozwala na symulację odlewania w formach jednorazowych i w formach trwałych z uwzględnieniem krzepnięcia oraz prognozowaniem położenia wad. Dodatkowe moduły umożliwiają, między innymi, wyznaczenie: naprężeń cieplnych (**MAGMAstress**), symulację odlewania pod wysokim i niskim ciśnieniem, odlewania i krzepnięcia w formach obracanych, itp.

W pracy [6] opisana została próba porównania możliwości pakietów **MAGMA** i **SIMTEC** i skonfrontowania otrzymanych rezultatów z wynikami doświadczalnych pomiarów naprężeń resztkowych w odlewającym bloku silnika. Wymienione są także główne wady i zalety podejścia użytego w każdym z tych programów. Metoda elementów skończonych (**SIMTEC**) jest bardziej efektywna przy wyznaczaniu naprężeń i odkształceń

Zagadnienia dotyczące problemów sterowania rozkładem temperatur są opisane w pracy [7]. W omawianych tam badaniach symulacyjnych użyte były systemy **MAGMA** i **ABAQUS**. Przewaga **ABAQUSa** w tego rodzaju zastosowaniach wynika z otwartości tego systemu – pozwala on na dołączanie własnych algorytmów.

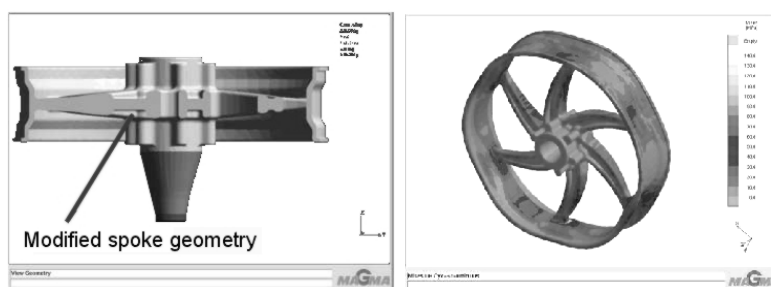
3. PRZYKŁADY NUMERYCZNEGO MODELOWANIA DEFORMACJI I NAPRĘŻEŃ WEWNĘTRZNYCH W ODLEWACH

W pracy [1] zostały opisane kolejne kroki projektowania odlewu felgi oraz symulację procesu jej odlewania przy pomocy pakietu **MAGMA**. Ponadto zostały w niej przedstawione rezultaty optymalizacji systemu chłodzenia odlewu oraz rozptywu metalu w formie. Na rysunkach 1 i 2 są pokazane wyniki zaczerpnięte z tej pracy.

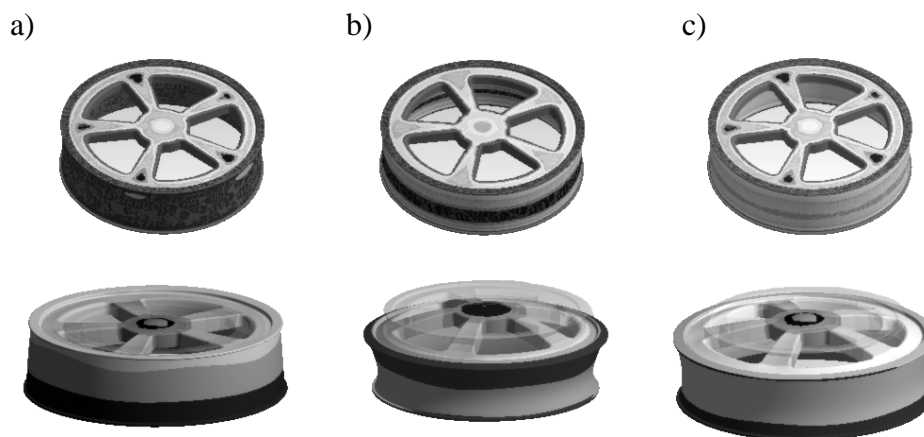
Korzystając z dostępnego oprogramowania MES (w katedrze dysponujemy systemem COSMOS/M) przeprowadzono obliczenia deformacji odlewu felgi w wyniku stygnięcia odlewu (bez rozpatrywania krzepnięcia odlewu). Na rys. 3 pokazane są wyniki otrzymane dla trzech różnych wariantów chłodzenia kokili: a) na powierzchni czołowej felgi, b) i c) na powierzchni czołowej i bocznej przy różnej intensywności chłodzenia. Przedstawiony jest rozkład temperatur w odlewie oraz deformacje od obciążeń termicznych dla każdego z trzech przypadków.



Rys. 1. Deformacje felgi po procesie odlewania [1]



Rys. 2. Przykładowy efekt modyfikacji geometrii odlewu (deformacje felgi po modyfikacji jej geometrii) [1]



Rys. 3. Wpływ intensywności chłodzenia na deformacje felgi

4. KOSZTY NUMERYCZNEJ SYMULACJI PROCESU ODLEWANIA

Jak wspomniano wcześniej podejmowane próby symulacji procesu odlewania są coraz bardziej skuteczne. Jednakże nadal numeryczne modelowanie zjawisk termomechanicznych w odlewie i formie, dla rzeczywistych odlewów jest operacją czasochłonną i kosztowną. Składają się na to wysokie koszty oprogramowania (koszt licencji rzędu 80000 €), niezbędnego sprzętu, a także czasochłonności symulacji [7].

Tabela 1. Koszt licencji podstawowych modułów programu *NASTRAN*

Moduł	Koszt licencji [\$]		
	tygodniowy	miesięczny	roczny
Nastran Basic	1298	4555	27300
Nastran Dynamics	369	1280	7680
Nastran Nonlinear	525	1820	10920
Nastran Heat Transfer	369	1280	7680

Koszty związane z częściową symulacją zjawisk rozchodzenia się ciepła w zastygłym odlewie oraz jego oddziaływanie mechaniczne i termiczne z formą obrazuje cennik licencji oprogramowania.

Przykładowe ceny podawane przez firmę MSC.Software Corporation [10] są zamieszczona w tabeli 1. Jak wynika z tabeli łączny koszt tygodniowego wydzierżawienia licencji podanych tu modułów, potrzebnych dla przeprowadzenia symulacji deformacji pod wpływem obciążeń termicznych, wynosi ok. 2500 \$.

5. PODSUMOWANIE

Wyniki symulacji komputerowej mogą być wykorzystane przy projektowaniu układu chłodzącego. Odpowiedni dobór i sterowanie chłodzenia pozwala na zmniejszenie naprężeń w wyrobie po procesie odlewania.

Numeryczne modelowanie zjawisk termomechanicznych w odlewie i formie, dla rzeczywistych odlewów, jest operacją czasochłonną i kosztowną.

Wykorzystanie metod przetwarzania równoległego i rozproszonego rozwiązuje niektóre problemy i stwarza realne możliwości przeprowadzenia symulacji odlewania.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schroth A., Schemme D. Simulation in modern quality management systems. Simulation assists the implementation of quality management systems in foundries. http://www.magma-soft.de/compresso-3.4.7/data/SimInModernQualManagSystems_CP_T1-2003.pdf. (published in Casting Plant + Technology, vol. 19, No. 1, (2003).
2. Perzyk M., Waszkiewicz S., Kaczorowski M., Jopkiewicz A. Odlewnictwo. WNT, Warszawa (2000).
3. Szczygiol N. Modelowanie numeryczne zjawisk termomechanicznych w krzepącym odlewie i formie odlewniczej. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, seria Monografie, nr 71, Częstochowa 2000.
4. Parkitny R., Szczygiol N., Nagórka A., Szwarz G. Modelowanie numeryczne oddziaływań termomechanicznych odlewu i formy odlewniczej. Materiały 8. Konferencji "Informatyka w Technologii Metali 'KomPlasTech'2001' ", Korbielów, (2001), 19-26.
5. Nagórka A. Mesh refinement and time step selection in numerical finite element simulations of solidification. Archives of Foundry, 4,14, (2004).
6. Čech J., Palán K., Zalaba R., Švaříček K., Bařinová. Comparison of the experimental and the simulation method of establishing residual stress in Al-alloys. Archives of Foundry, 4,14, (2004).
7. Kluska-Nawarecka S., Połcik H. Problemy modelowania i sterowania procesem krzepnięcia stopów aluminium i stopów miedzi. Archives of Foundry, 4,14, (2004).
8. Ciesielski M., Mochnacki B., Suchy J.S. Numerical model of axially-symmetrical casting solidification. Part 2. Archives of Foundry, 4,14, (2004).
9. Jasiński P. Analiza chłodzenia elementów maszyn strumieniem gazu po nawęglaniu próżniowym. Rozprawa doktorska, Łódź 2005.