

ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ RZECZYWISTYCH NA POWIERZCHNI ELEMENTÓW FORMUJĄCYCH WYZNACZONY PRZY POMOCY KOMPUTEROWEJ SYMULACJI PROCESU ODLEWANIA CIŚNIENIOWEGO

Jacek SAWICKI*, Marek GÓRECKI, Łukasz KACZMAREK***

* Instytut Inżynierii Materiałowej, Politechnika Łódzka

** Division: Information Technology , New York University USA

Streszczenie. Celem określenia rozkładu naprężeń rzeczywistych występujących na powierzchni elementów formujących w niniejszej pracy przeprowadzona została symulacja komputerowa procesu wtrysku ciekłego stopu aluminium do formy analizująca rozkład pól temperatury i ciśnienia oraz zachowanie się strugi ciekłego stopu metalu wewnątrz formy. Dla potrzeb weryfikacji modelu numerycznego dokonano pomiaru ciśnienia wewnątrz formy odlewniczej. Model dynamiczny wyężenia odlewniczej formy ciśnieniowej został opracowany na przykładzie zaprojektowanego detalu, będącego uproszczonym pod względem kształtu rzeczywistego odlewu wytwarzanego przez firmę WIFAMA-PREXER..

1. WSTĘP

Ciśnieniowe odlewanie stopów aluminium jest obecnie podstawową technologią wytwarzania szerokiego asortymentu wyrobów dla potrzeb motoryzacji, lotnictwa, przemysłu AGD itp. Aby sprostać wymaganiom odbiorców w warunkach tak silnej konkurencji, producenci odlewów ciśnieniowych w sposób ciągły muszą doskonalić swoje produkty, obniżać koszt ich wytwarzania oraz szybko i elastycznie reagować na nowe zamówienia.

Optymalizacja konstrukcji i technologii formy ciśnieniowej to skomplikowany problemem z uwagi na złożony charakter mechanizmów zużycia eksploatacyjnego, które obejmuje takie procesy jak: zmęczenie cieplne, zmęczenie mechaniczne, erozja i kawitacja, roztwarzanie składników materiału formy przez ciekły metal, adhezyjne przywieranie odlewu do formy itd. trwałości formy głównie zależy od doboru struktury materiału matrycy i jej warstwy powierzchniowej w taki sposób aby opóźnić powstawanie i propagację pęknięć cieplnych tak długo jak to możliwe. Przyczyny przedwczesnego niszczenia form ciśnieniowych poddanych procesom obróbki powierzchniowej tkwią w niekontrolowanym nakładaniu się naprężeń własnych pochodzących z procesu wytwarzania warstw powierzchniowych z naprężeniami od wymuszeń zewnętrznych generowanych cyklicznie podczas eksploatacji formy. Dlatego też, znajomość rozkładu naprężeń od wymuszeń zewnętrznych generowanych w formie ciśnieniowej podczas całego cyklu odlewania jest niezbędnym elementem mogącym pomóc zwiększyć trwałości formy.

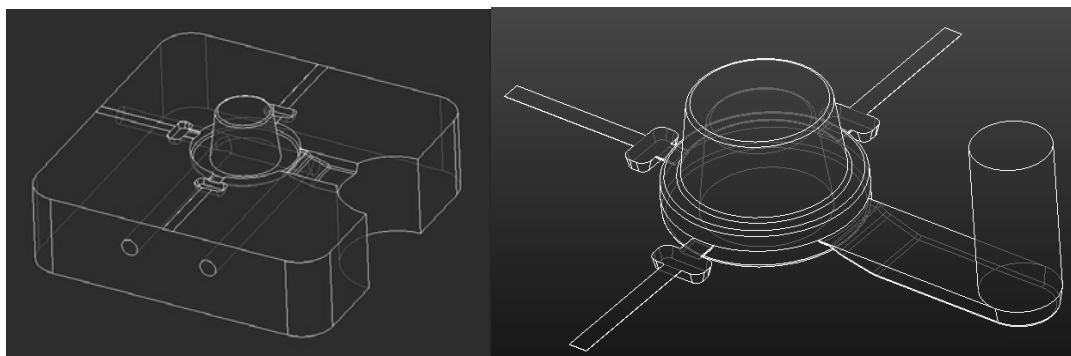
Obecnie prace projektowe można prowadzić w wirtualnej rzeczywistości z wykorzystaniem odpowiednich programów począwszy od fazy projektu całego urządzenia, poprzez analizę konstrukcyjną i technologiczną poszczególnych jego podzespołów. Programy

te umożliwiają uzyskanie bardzo rzeczywistego obrazu (realistycznej wizualizacji) projektowanego zespołu jak również powiązanie poszczególnych współpracujących zespołów i ocenę ich wzajemnej zależności w czasie pracy. Dodatkowo można przeprowadzić symulacje pracy formy i analizę kolizyjności (np. źle wprowadzone pochylenia mogą doprowadzić do uniemożliwienia wyjęcia odlewu z wnęki formy).

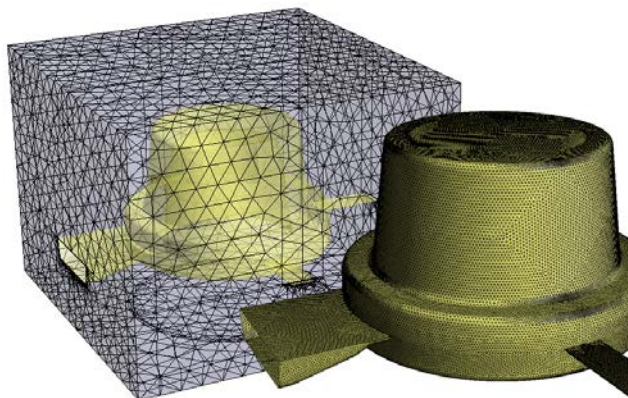
W niniejszej pracy przedstawiono wspomaganie procesu odlewania ciśnieniowego przy użyciu metod numerycznych. Przeprowadzona symulacja komputerowa pozwala na analizę zachowania się strugi ciekłego stopu metalu wewnątrz formy odlewniczej. Dzięki temu w dalszym etapie można było, płynnie dla wybranych z symulacji komputerowej kroków czasowych, określić rozkład naprężeń rzeczywistych występujących na powierzchni elementów formujących oraz w jej wnętrzu.

2. DEFINICJA MODELU NUMRYCZNEGO

Model dynamiczny wyteżenia odlewniczej formy ciśnieniowej został opracowany na przykładzie zaprojektowanego detalu, będącego uproszczonym pod względem kształtu odwzorowaniem rzeczywistego odlewu wytwarzanego przez WIFAMA-PREXER. Do modelowania wykorzystano pakiety oprogramowania: Pro/ENGINEER oraz ANSYS-CFX. Pro/ENGINEER jako pakiet konstrukcyjny w budowie dynamicznego modelu wyteżenia formy posłużył do wykonania modelu 3D odlewu zawierającego odlew z założonym skurczem, układ wlewowy wraz z przelewami oraz odpowietrzenie wnęki formującej (rys.1). Model dyskretny formy został wykonany w programie ANSYS (rys.2).



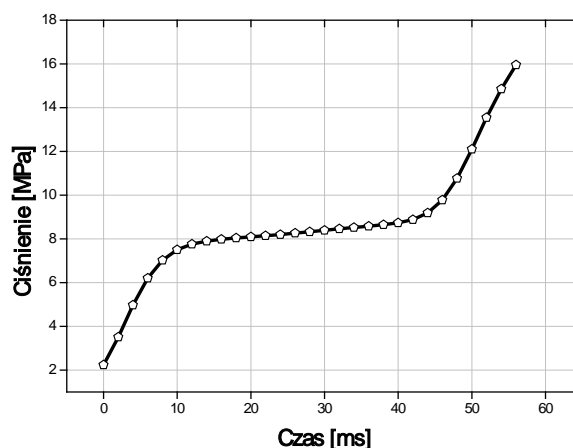
Rys.1. Model formy i technologicznego odlewu



Rys.2. Model dyskretny formy i odlewu

Dane wejściowe symulacji procesu zalewania odnosiły się do rzeczywistych warunków jakie panują podczas tego procesu na stanowisku pomiarowym w firmie WIFAMA-PREXER:

- ciekły stop odlewniczy – AlSi9Cu3 (DIN 226)
- temperatura ciekłego stopu aluminium – 650°C;
- materiał formy – stal narzędziowa do pracy na gorąco X37CrMoV5-1 (DIN 1.2343) poddana obróbce cieplnej do twardości 44-46 HRC;
- charakterystyka ciśnienia tłoka podczas procesu odlewania, wyznaczona eksperymentalnie na maszynie odlewniczej (rys.3).



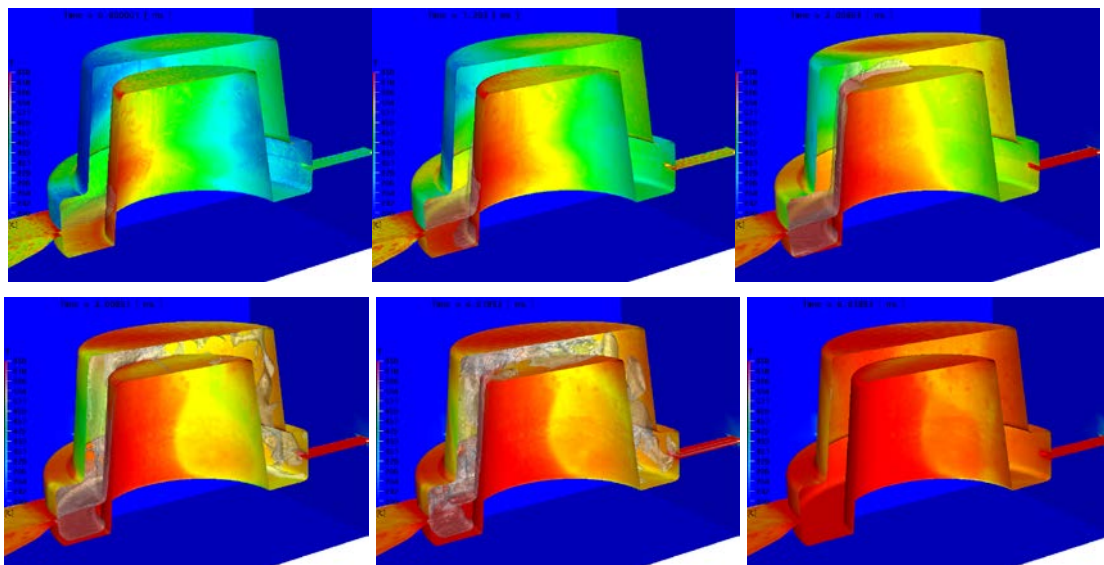
Rys.3. Zmiana ciśnienia na tłoku podczas wtrysku ciekłego stopu aluminium do formy

Przy wykonywaniu symulacji komputerowych zagadnień zmiennych w czasie związanych z przepływem i wymianą ciepła uwzględnione zostały odpowiednie właściwości cieplne stalowej formy oraz przepływowe ciekłego stopu aluminium. Do analizy zjawiska przepływowego został wykorzystany model przepływu dwufazowego (powietrze–ciecz). Równoległe z przepływem rozwiązywane było również pole temperatury w formie powstałe w wyniku oddziaływania gorącego stopu aluminium na ścianki formy odlewniczej. Należy zwrócić tu szczególną uwagę na to, że zjawiska te są bardzo szybko zmienne w czasie. Wymusza to dokonanie analizy dla bardzo małych kroków czasowy wynoszących nawet kilka mikrosekund. Założenie takiego kroku czasowego jest niezbędne by uzyskać rozwiązanie na określonym poziomie dokładności. Obliczenia komputerowe zostały prowadzone do momentu pełnego wypełnienia wnęki formy przez ciekły stop aluminium. W pierwszym etapie założono, że gradient między temperaturą formy a ciekłym stopem aluminium jest rzędu 500°C. Przyjęto, że taki stan odpowiada kilku pierwszym wtryskom ciekłego stopu aluminium do wnętrza formy, co potwierdzone zostało badaniami doświadczalnymi na oprzyrządowanej maszynie odlewniczej. W kolejnym etapie pominięto rozkłady pól temperatury zakładając, że gradient temperatury pomiędzy formą a ciekłym aluminium jest pomijalny. Stan taki występuje już po kilkunastu wtryskach.

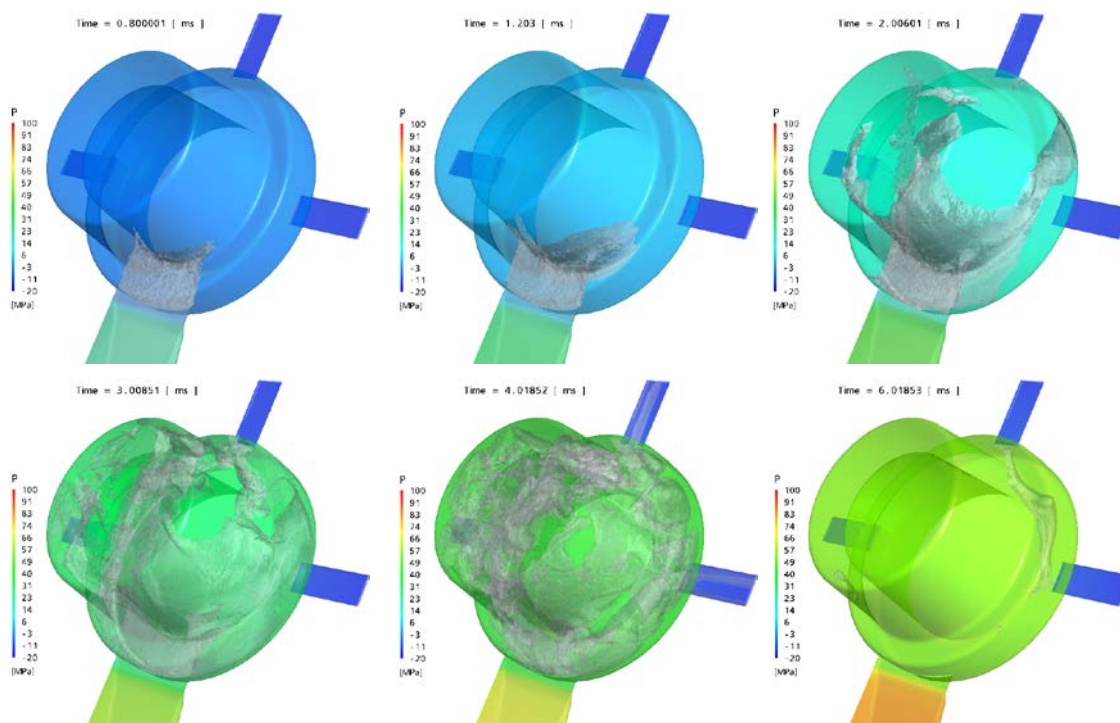
3. WYNIKI SYMULACJI

Przeprowadzona komputerowa symulacja procesu odlewnia ciśnieniowego pozwoliła na uzyskanie rozkładu temperatury (rys.4) i ciśnienia na powierzchni wnęki formującej (rys.5). Dzięki temu w dalszym etapie można było, płynnie dla wybranych z symulacji komputerowej kroków czasowych, określić rozkład naprężeń rzeczywistych występujących na powierzchni elementu formującego oraz w jego wnętrzu (rys.6). Przeprowadzono również analizę naprężeń

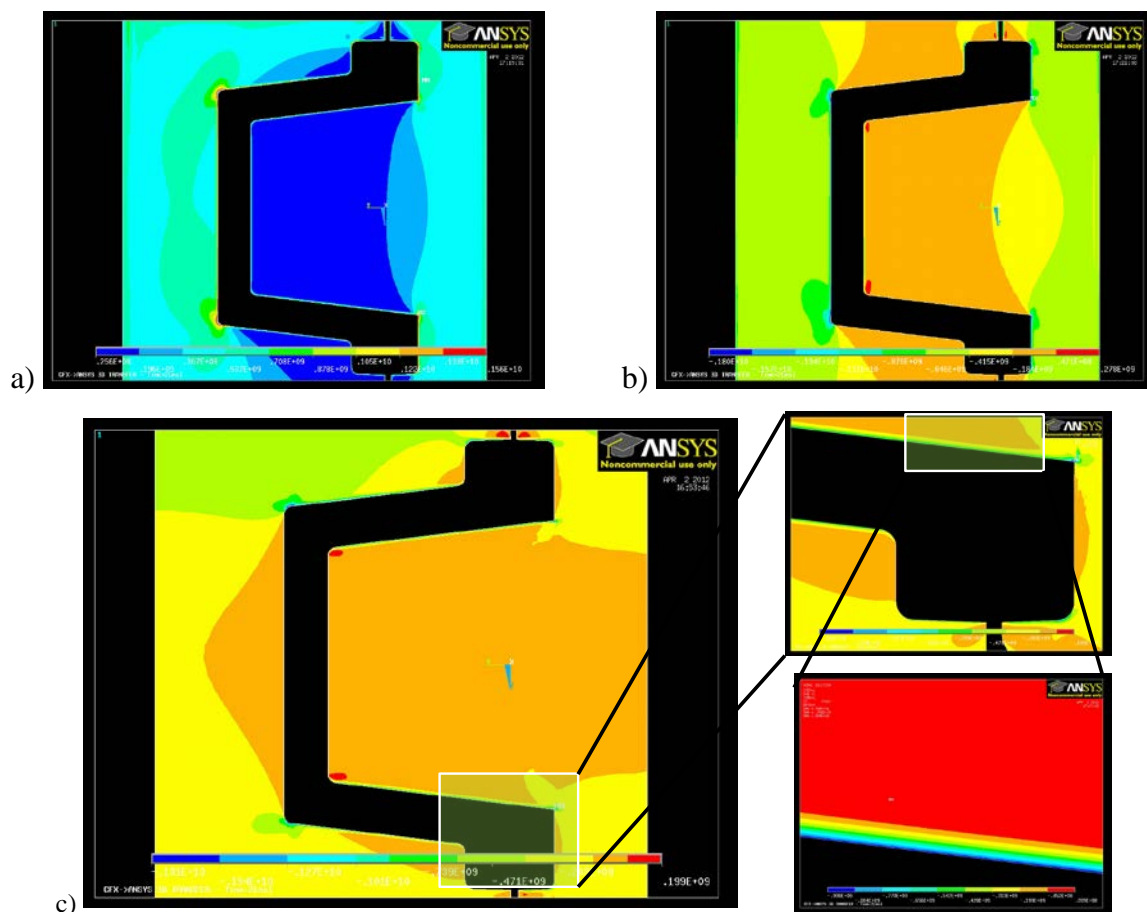
wzdłuż wybranych ścieżek (rys.7). Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono rozkłady naprężeń wzdłużnych analizowanych ścieżek (rys.7) dla dwóch przypadków w/w stanu formy. Przeprowadzono również analizę naprężeń wzdłużnych wzdłuż powierzchni, na którą naciera struga ciekłego aluminium, wyniki przedstawiono na rysunku 9.



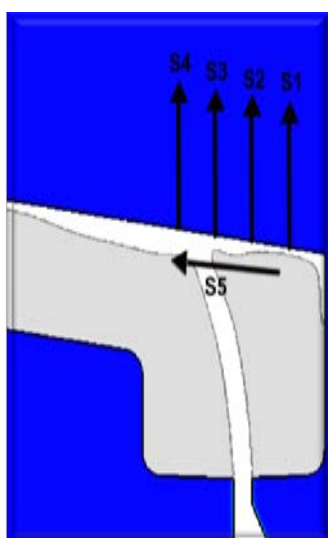
Rys. 4.. Rozkład pól temperatury dla wybranych kroków czasowych



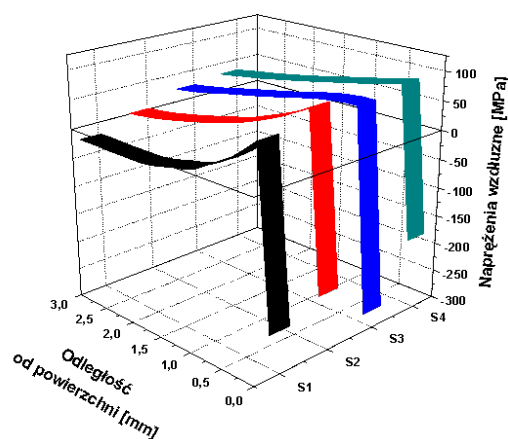
Rys. 5. Rozkład ciśnienia na powierzchni elementów formujących dla wybranych kroków czasowych



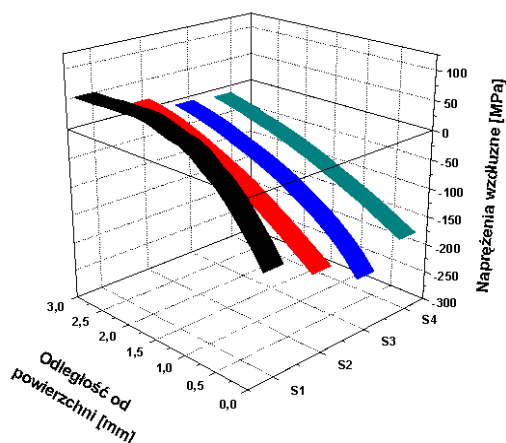
Rys. 6. Mapy rozkładu naprężeń zredukowanych (a), poprzecznych (b), wzdłużnych(c) dla wybranego kroku czasowego.



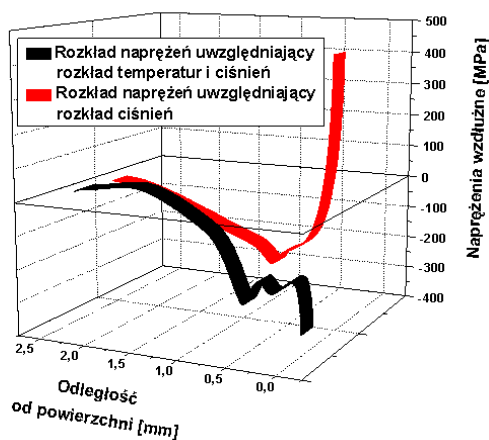
Rys. 7. Wybrane miejsce oraz ścieżki wzdłuż których wyznaczono rozkłady naprężeń od obciążeń zewnętrznych



Rys. 8 . Rozkład naprężeń uwzględniający rozkład temperatur i ciśnień panujących wewnątrz formy odlewniczej po czasie 0,8 ms wyznaczoney wzdłuż ścieżek z rys. 7. Stan przed osiągnięciem stabilizacji temperatury formy



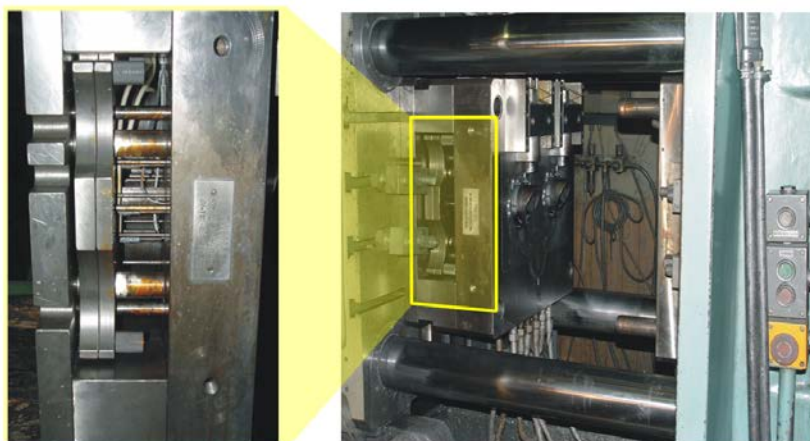
Rys. 9. Rozkład naprężeń uwzględniający rozkład ciśnień panujących wewnątrz formy odlewniczej po czasie 0,8 ms wyznaczoney wzdłuż ścieżek z rys.7. Stan po osiągnięciu stabilizacji temperatury



Rys. 10. Rozkład naprężeń wzdłużnych wewnątrz formy odlewniczej po czasie 0,8 [ms] wyznaczoney wzdłuż ścieżki S5 przedstawionej na rys. 7

4. WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA

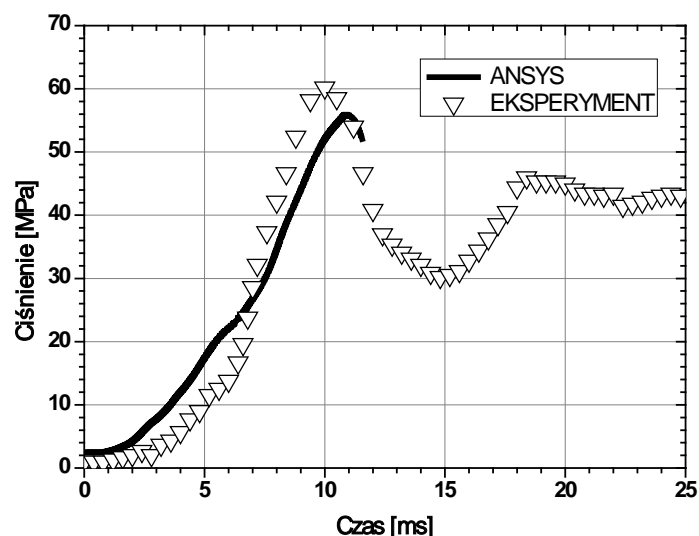
Niezwykle istotnym przy dokonywaniu oceny przeprowadzonych symulacji komputerowych była weryfikacja doświadczalna. Dla potrzeb weryfikacji modelu numerycznego dokonano pomiaru ciśnienia wewnątrz formy odlewniczej. Zaprojektowano i zbudowano stanowisko pomiarowe składające się z maszyny odlewniczej z zimną poziomą komorą typ POLAK CLH 400 o sile zwarcia $400 \times 104 \text{ N}$ z możliwością wizualizacji parametrów wtrysku oraz odpowiednio opomiarowaną odlewniczą formą ciśnieniową (rys.11).



Rys.11. Forma ciśnieniowa wraz z oprzyrządowaniem

Pomiar ciśnienia wewnątrz odlewniczej formy ciśnieniowej dokonano wykorzystując wypychacze, których czoła stanowią powierzchnię formującą podczas wykonywania odlewu. Na wybrane do badań wypychacze naklejono tensometry elektrooporowe, które miały na celu rejestrację zmiany naprężeń podczas procesu odlewania. Ciśnienie panujące wewnątrz formy działa również na czoło wypychacza wywołując naprężenia ściskające oraz jego odkształcenie sprężyste. Zmiana odkształceń wypychacza mierzona była za pomocą tensometrów elektrooporowych Vichay. W celu zwiększenia mierzonego sygnału oraz wyeliminowania ewentualnych naprężeń od zginania oraz samokompensacji temperaturowej na każdy wypychacz naklejono po cztery tensometry. Dwa w kierunku wzdłużnym typ WK-06-250BG-350 i dwa w kierunku poprzecznym typ WK-06-125AD-350, połączone w pełny mostek. Wybrane elementy elektrooporowe służą do badań dynamicznych w wysokich temperaturach i mogą bezpiecznie pracować w zakresie temperatur od -270°C do 290°C . Sygnał z tensometrów mierzony był przez mostek tensometryczny ESAM TRAVELLER Plus 1032-S sprzężony z komputerem, w którym specjalistyczne oprogramowanie obsługujące mostek przetwarzało go na dane wyjściowe.

Zestawienie ciśnień wewnątrz formy przedstawione na rysunku 12 udowadnia słuszność przyjętych modeli numerycznych oraz sposobu rozwiązywania występujących zjawisk cieplno-przepływowych w tym procesie. Widać dużą zgodność przeprowadzonych analiz numerycznych z badaniami eksperymentalnymi, co pozwala na wykorzystanie uzyskanych danych do modelowania stanu naprężeń rzeczywistych z wytworzoną technologiczną warstwą wierzchnią podczas procesu odlewania ciśnieniowego.



Rys.12. Ciśnienie wewnątrz formy odlewniczej

5. WNIOSKI

Dzięki przeprowadzonej analizie symulacji wtrysku - już na etapie projektowym możemy wprowadzić zmiany eliminujące występowanie niekorzystnych zjawisk erozji i kawitacji lub zmniejszyć obszar ich działania. Zmiany w tym obszarze mogą być związane z miejscem usytuowania wlewu, jego geometrią jak i zmianą samego kształtu powierzchni formującej. Zdarza się jednak, że ich wprowadzenie jest niemożliwe, wówczas otrzymane podczas symulacji wyniki mogą sugerować zastosowanie w takich miejscach zabiegów technologicznych, związanych z uszlachetnieniem warstwy wierzchniej, przeciwdziałających występowaniu niepożądanych zjawisk erozji i kawitacji. Warstwa taka musi być odporna chemicznie w stosunku do aluminium i jego stopów oraz dostatecznie twarda, aby zapewnić trwałość i odporność na zużycie.

Wyznaczone rozkłady naprężeń mogą być wykorzystywane jako kryterium doboru TWW i traktowane jako wyznacznik w ich dalszych przemysłowych aplikacjach, między innymi dzięki superpozycji naprężeń w warstwach wierzchnich elementów formujących.

PODZIĘKOWANIA

Badania zostały zrealizowane ze środków Ministra Edukacji i Nauki w ramach projektu badawczego nr N N507 411036.

LITERATURA

- [1] Kula P.: Inżynieria warstwy wierzchniej. Monografie, Łódź 2000.
- [2] Bergstoröm J., Fredriksson D., Johansson M.: The use of tool steels: experience and research. 6th International Tooling Conference, Karlstad University 2002.
- [3] Rico F., Battez A. Cuervo D.: Rolling contact fatigue in lubricated contacts. Tribology International 36, 2003.

-
- [4] Zhuang W., Halford G.: Investigation of residual stress relaxation under cyclic load. *International of fatigue* 23, 2001.
- [5] Navti S.E., Ravindran K., Taylor C., Lewis R.W.: Finite element modelling of surface tension effects using a Lagrangian-Eulerian kinematic description. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, vol.147, p.41-60, January 1997.
- [6] Raoyang Z., Xiaoyi H., Gary D., Shiyi Ch.: Surface tension effects on two-dimensional two-phase Kelvin-Helmholtz instabilities. *Advances in Water Resources*, vol.24, p.461-478, 2001.
- [7] Zhiya Q., Lijun Y., Zhanmin C., Yunan X.: Surface tension prediction of high-temperature melts. *Journal of Alloys and Compounds*, vol.325, p.180–189, 2001.
- [8] Łabędź J.: Metodyka badania wpływu naprężeń własnych na zużycie warstwy wierzchniej. *Trybologia*, Nr4-5/1987.
- [9] Praca zbiorowa, Innowacje w odlewnictwie ciśnieniowym. Część I (2008) – II (2009) III (2010) IV (2011). Instytut Odlewnictwa w Krakowie.
- [10] Sawicki J., Górecki M., Gawroński Z., Kaczmarek Ł.: The computer aided pressure casting die. *Inżynieria Materiałowa* Nr 3 (175) 2010, 708-711.
- [11] Sawicki J., Górecki M., Gawroński Z., Kaczmarek Ł.: Zastosowanie nowoczesnych technik numerycznych do procesu odlewania ciśnieniowego. *Inżynieria Materiałowa* Nr 4 (182), 2011, 707-710.