

## COMPUTER SIMULATION OF CASTABILITY TRIALS

### Summary

*This work presents the properties of nickel based superalloy HAYNES 282 (H282), its commercial properties and applications in high temperature environment. This alloy is usually used after working processing and machining. The Foundry Research Institute performs research work to adapt this alloy for casting. Among many problems associated with this subject, the very important one is to prepare correct casting technology for this alloy. The use of computer simulation requires information on thermophysical data of the alloy. There is lack of some properties data at temperature above 1000°C and there is no possibility to perform such studies in the country. That is the reason to use castability trial in inverse analysis for determining the desired properties. The verification of casting simulation was performed by casting of simple geometry details.*

**Key words:** high temperature alloys, nickel based alloys, castability trial, computer simulation

## SYMULACJA KOMPUTEROWA TECHNOLOGICZNEJ PRÓBY LEJNOŚCI

### Streszczenie

*Opisano właściwości nadstopu niklu typu HAYNES 282 (H282), jego cechy użytkowe i możliwe zastosowania do pracy w wysokiej temperaturze. Stop ten dotąd stosowany jest wyłącznie po przeróbce plastycznej, a elementy wykonywane są przez obróbkę ubytkową. W Instytucie Odlewnictwa w Krakowie prowadzone są próby zastosowania tego stopu jako tworzywa odlewniczego. Podstawową trudnością jest opracowanie poprawnej technologii odlewniczej. Aby można było stosować komputerowe wspomaganie symulacyjne, potrzebna jest znajomość odpowiednich właściwości termofizycznych. Dla stopu H282 brakuje dostępnych danych w zakresie temperatur powyżej 1000°C, a ich bezpośredni pomiar w warunkach krajowych jest niemożliwy. Dlatego technologiczną próbę lejności wykorzystano do pośredniego wyznaczenia koniecznych danych, wykonując tzw. analizę odwrotną. Na tej podstawie opracowano technologię odlewniczą prostych detali i zweryfikowano ją doświadczalnie.*

**Słowa kluczowe:** stopy do pracy w wysokiej temperaturze, nadstopy niklu, próba lejności, symulacja komputerowa

### 1. Wprowadzenie

Stop HAYNES 282 (H282) to nowy, przerabiany plastycznie, nadstop niklu, przeznaczony do zastosowania na części konstrukcyjne eksploatowane w wysokich temperaturach, zwłaszcza na części turbin gazowych pracujących w powietrzu i na lądzie.

Stop ten charakteryzuje się wyjątkowym połączeniem wytrzymałości na pełzanie, stabilności cieplnej, spawalności i podatności na obróbkę mechaniczną, których nie dają inne aktualnie dostępne stopy przemysłowe. Posiada on – według danych wytwórcy – doskonałą wytrzymałość na pełzanie w zakresie temperatur od 649 do 927°C, przewyższającą wytrzymałość stopu Waspaloy i zbliżoną do stopu R-41. Szersze informacje na temat właściwości i zastosowania nadstopów niklu, w tym stopów typu HAYNES można znaleźć między innymi w [1-6].

Wysoka wartość wytrzymałości na pełzanie stopu H282 została uzyskana przy stosunkowo niskim udziale objętościowym umacniającej fazy  $\gamma'$ , dając stop o doskonałej odporności na pęknięcie podczas starzenia po zgnioście (problem występujący zazwyczaj w nadstopach). Dodatkowo, niska kinetyka wydzielenia fazy  $\gamma'$  nadaje stopowi doskonałą plastyczność w stanie po wyżarzaniu. W konsekwencji, stop H282 posiada doskonałą spawalność i obrabialność.

Stop H282 jest przeznaczony do zastosowania w postaci blach grubych i cienkich, taśm, folii, wlewków, prętów, spawanych drutów, rur i tubingów. Dostarczany jest w sta-

nie po wyżarzaniu, w którym charakteryzuje się dobrą formowalnością.

Typowa temperatura przesycania zawiera się w zakresie 1120°C do 1150°C. Po obróbce mechanicznej elementu wymagane jest dwustopniowe utwardzanie przez starzenie dla uzyskania w stopie wysokiej wytrzymałości. Obróbka ta obejmuje następujące etapy:

- wygrzewanie w temperaturze 1010°C przez 2 godziny i chłodzenie na powietrzu,
- wygrzewanie w temperaturze 790°C przez 8 godzin i chłodzenie na powietrzu.

Właściwości stopu H282 sprawiają, że nadaje się on do pracy w krytycznych warunkach w turbinach gazowych, gdzie stosowany jest na wyroby z cienkiej blachy, pierścienie bez szwu i zgrzewane iskrowo doczołowo obudowy sprężarek, elementy zespołu komory spalania oraz inne części turbin. W nowoczesnych samolotowych turbinach gazowych nowy stop jest przydatny na części dysz wylotowych. W turbinach gazowych pracujących na lądzie, stop H282 nadaje się na części układu rur, przez które przepływa gorący gaz.

Nominalny skład chemiczny stopu (% wagowo) jest następujący: Cr - 20%, Co - 10%, Mo - 8,5%, Ti - 2,1%, Al - 1,5%, Fe do 1,5%, Mn do 0,3%, Si do 0,15%, C - 0,06%, B - 0,005%.

Zagadnieniem, jakim od kilku lat zajmuje się Instytut Odlewnictwa w Krakowie (wraz z partnerem amerykańskim), jest zastosowanie stopu H282 jako tworzywa odlewniczego z przeznaczeniem na odlewy części maszyn i urzą-

dzeń, pracujące w wysokiej temperaturze w różnych gałęziach gospodarki, w tym i w urządzeniach rolniczych i przetwórstwa rolnego. Jedną z wielu trudności, na jakie się napotyka, jest zagadnienie lejności tego stopu.

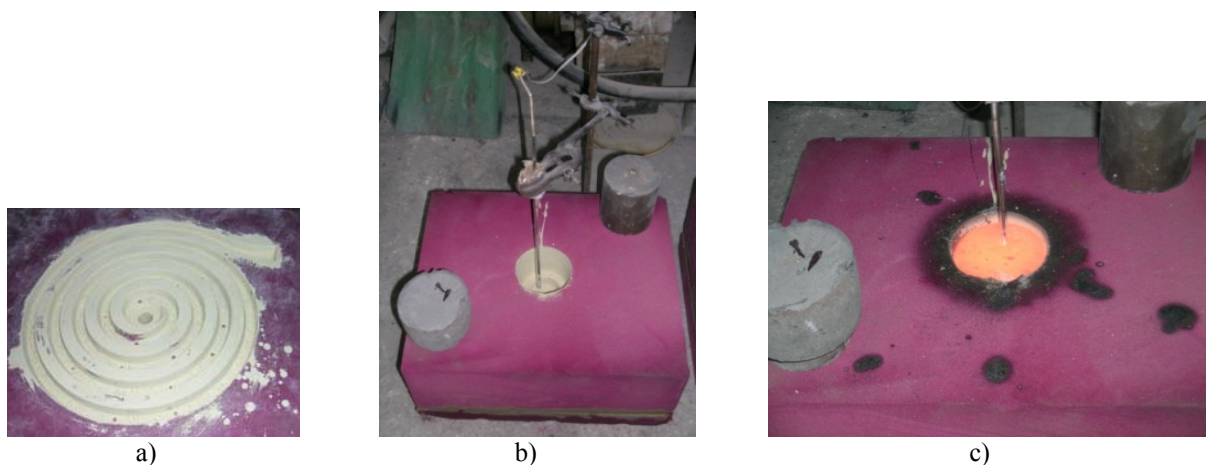
## 2. Próba lejności

Lejność charakteryzuje płynność stopionego metalu i opisuje stan, w którym można techniką odlewania uzyskać element o dobrej jakości, przy minimalnych kosztach, minimalnej ilości wad i optymalnym czasie realizacji. W praktyce odlewniczej, lejność charakteryzuje płynność, czyli zdolność metali i stopów do przepływania przez układ wlewowy i wypełniania wnętrza formy odlewniczej o stałych polach przekroju poprzecznego i zgodnie z jej kształtem. Ilościowo właściwość tę określa się jako maksymalną długość przepływu metalu w danej formie testowej, zanim przepływ ten zostanie zatrzymany przez proces krzepnięcia podczas odlewania w danej temperaturze. Im większa dłu-

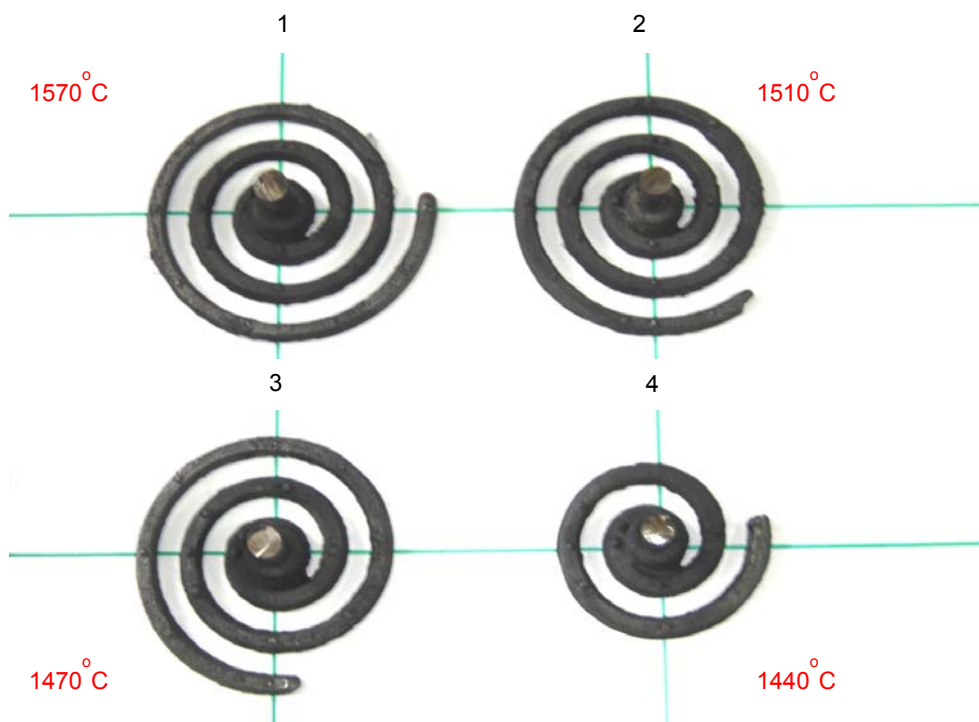
gość strugi zestalonego metalu, tym większa jest jego płynność, a tym samym lepsza lejność [7, 8].

Autorzy lejność stopu H282 badali przy użyciu powszechnie stosowanej próby spirali lejności, połączonej z analizą termiczną kompleksu termofizycznych właściwości stopu, w porównaniu z eksperymentalnie oszacowanymi wartościami i badaniem skłonności stopu do skurczu termicznego. Zastosowano formy piaskowe wykonane przy użyciu spoiwa na bazie furanu, jako najbardziej odpowiedniego dla tego rodzaju badań technologicznych, biorąc pod uwagę jego wysoki stopień elastyczności – niewielki wpływ na hamowanie skurczu odlewniczego.

W przeprowadzonych próbach lejności (rys. 1) kontrolna termopara znajdowała się w każdej formie, a temperaturę zalewania mierzono w kadzi przed odlaniem metalu. Zalewanie prowadzono stosując następujące temperatury przegrzania metalu: 1440, 1470, 1510 i 1570°C. W każdym z tych przypadków wykonano odlew spirali i oznaczono doświadczalnie jej długość (rys. 2).



Rys. 1. Forma stosowana do próby lejności: a) rozłożona, b) złożona, c) po zalaniu stopem H282  
 Fig. 1. Mould used in castability trial: a) decomposed, b) composed, c) after pouring the H282 alloy



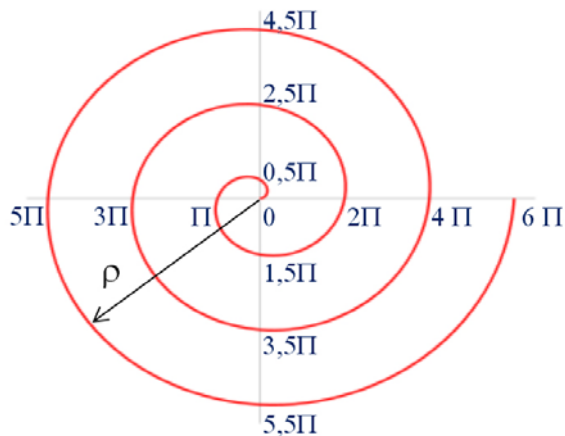
Rys. 2. Długość spirali odlanych podczas prób lejności (kolejne próby)  
 Fig. 2. The length of spiral during the castability trial (next examinations)

Dla porównania wyników uzyskanych w badaniach lejności, dane doświadczalne (długość określona wg znaczników) porównano z wyliczeniami teoretycznymi, obliczając długość spirali indywidualnie dla każdego odlewu i modelu używanego przy wykonywaniu form.

Promień  $\rho$  dla danego kąta  $\varphi$  spirali Archimedesesa (rys. 3) można obliczyć za pomocą wzoru:

$$\rho = a \varphi$$

gdzie  $a$  jest wartością stałą spirali.



Rys. 3. Spirala Archimedesesa  
Fig. 3. Archimedes spiral

Mierząc promień  $\rho$  spirali modelu i spirali odlewu przy dowolnym kącie  $\varphi$  (np.  $4\pi$ ) można obliczyć stałe  $a$  tych spiral:

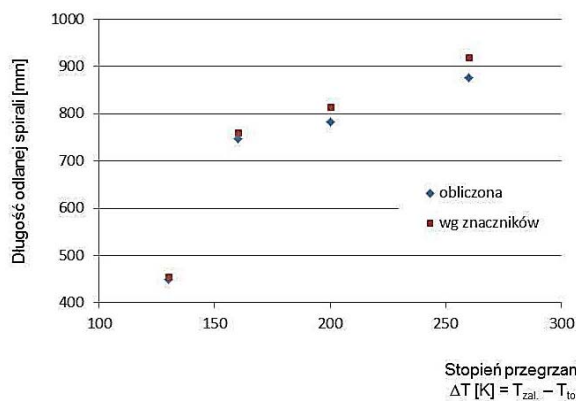
$$a = \frac{\rho^{(4\pi)}}{4\pi}$$

Mierząc maksymalny promień odlanych spiral  $\rho^{\max}$  i odpowiadający mu maksymalny kąt  $\varphi^{\max}$ , stosując równanie spirali Archimedesesa, obliczono stałe  $a$  poszczególnych spiral oraz po określeniu stałej  $a$  modelu odlewniczego stosowanego do formowania, promienie jego spirali  $\rho^{\text{mod}}$  odpowiadające tym kątom. Wyniki tych obliczeń przedstawiają się następująco (tab. 1).

Tab. 1. Wyniki obliczeń parametrów spirali wykonanych prób lejności  
Table 1. Results of performed castability trials

Temperatura zalewania [°C]	Stopień przegrzania [K]	Parametry			
		$\rho^{\max}$	$\varphi^{\max}$	$\rho^{\text{mod}}$	$a$
1570	260	83.5	6.62 $\pi$	87.7	4.02
1510	200	79.5	6.21 $\pi$	82.3	4.08
1470	160	78.0	6.03 $\pi$	79.9	4.12
1440	130	60.6	4.64 $\pi$	61.5	4.15
<b>Model</b>		-	-	-	<b>4.22</b>

Pomiary  $\varphi^{\max}$  i  $\rho^{\max}$  wskazują, że lejność ciekłego stopu H282 znacznie wzrasta wraz ze wzrostem stopnia przegrzania od 130 do 160 K w stosunku do temperatury likwidus (1310 °C), a w zakresie od 160 do 260 K wzrost ten jest już znacznie mniejszy. W porównaniu do minimalnego zastosowanego w badaniach stopnia przegrzania do temperatury 1440 °C (przegrzanie rzędu 130 K), podgrzewanie ciekłego stopu H282 do temperatury 1570 °C (przegrzanie rzędu 260 K) zwiększa jego lejność prawie dwukrotnie. Wyliczenia te graficznie przedstawiono na wykresie (rys. 4).



Rys. 4. Zależność długości odlanej spirali od stopnia przegrzania metalu

Fig. 4. The relationship between the length of cast spirals for overheating metal

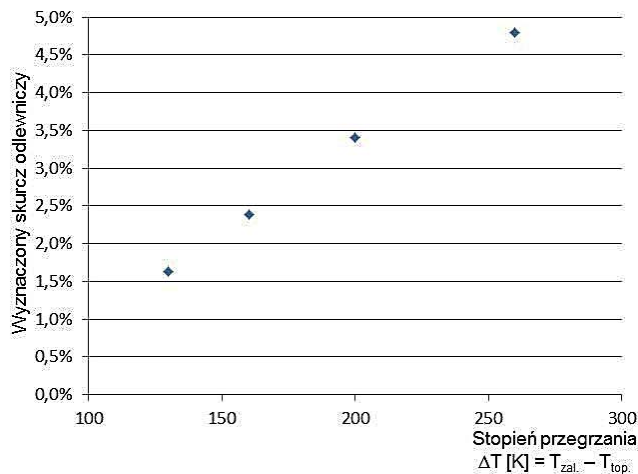
Korzystając z obliczonych wartości długości odlanych spiral i odpowiadających im wartości uzyskanych dla modelu można wyznaczyć skurcz odlewniczy, który jest jednym z najważniejszych parametrów technologicznych. Znajac stałą spirali  $a$ , kąt  $\varphi$  i odpowiadającą mu wartość promienia  $\rho$ , długość spirali Archimedesesa  $L$  można obliczyć z następującego wzoru podawanego w poradnikach matematycznych:

$$L = \frac{1}{2} a (\varphi^2 + 1)^{1/2} + \text{arcsinh } \varphi$$

Porównanie wyznaczonej dla odpowiedniego kąta wartości długości spirali  $L_{\text{obl}}$  z długością spirali modelu  $L_{\text{mod}}$  daje możliwość oceny skurczu odlewniczego  $\varepsilon$  dla konkretnej temperatury zalewania, co pokazano tabelarycznie (tab. 2) i graficznie (rys. 5).

Tab. 2. Wyniki obliczeń skurczu odlewniczego, wyznaczonego z parametrów spiral wykonanych prób lejności  
Table 2. Results of casting shrinkage calculations obtained from castability trials

Temperatura zalewania, °C	Parametry		
	$L_{\text{obl}}$ [mm]	$L_{\text{mod}}$ [mm]	$\varepsilon$ [%]
1570	876	920	4.8
1510	784	811	3.3
1470	747	765	2.4
1440	449	456	1.5



Rys. 5. Wyznaczony skurcz odlewniczy stopu H282 w zależności do stopnia przegrzania

Fig. 5. Contraction of the cast spirals obtained for different pouring temperatures

Dla zakresu temperatury przegrzania rzędu 130-260 K, stop H282 wykazuje prawie liniową zależność określonej wartości skurczu odlewniczego w zależności od wartości tego przegrzania, przy czym dla stosowanych parametrów zalewania wartość maksymalna jest rzędu 4,8% i pojawia się przy temperaturze zalewania 1570°C, odpowiadającej wartości przegrzania rzędu 260 K.

### 3. Analiza numeryczna

W celu przeprowadzenia wiarygodnych obliczeń numerycznych konieczne są dane termofizyczne w całym zakresie temperatur analizowanego procesu, tj. od temperatury otoczenia do temperatury likwidus. Niestety, dla stopu H282 brakuje w literaturze pełnych danych. Znajdowane informacje dotyczą w większości zakresu eksploatacji stopu, czyli od temperatury otoczenia do 1000°C.

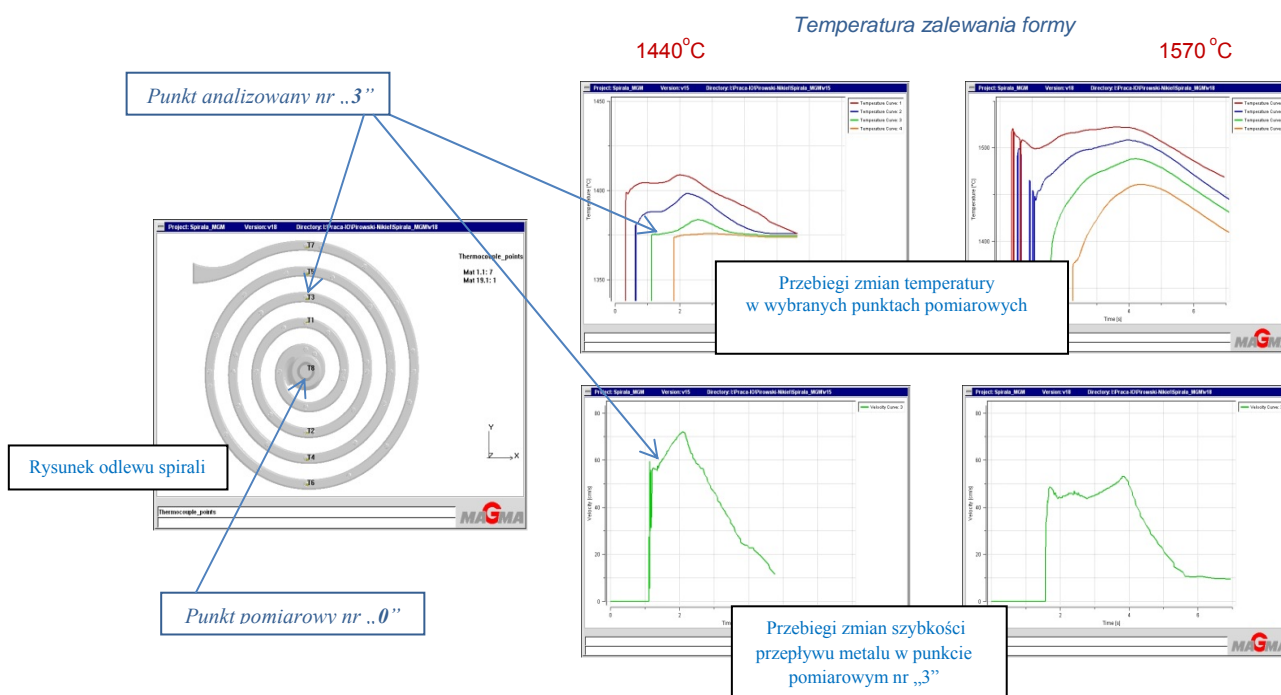
Duża niepewność wprowadzanych właściwości termofizycznych dla stopu H282 powyżej temperatury solidus zmusza do ich wyznaczania poprzez porównanie ekspery-

mentu z obliczeniami numerycznymi – analiza odwrotna.

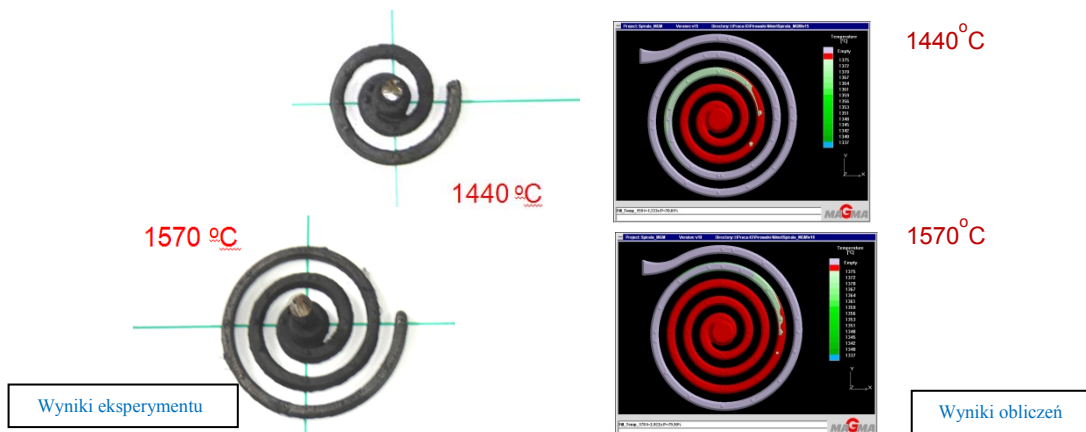
W tym celu wykorzystano przeprowadzoną technologiczną próbę lejności. Analizowano rozkład temperatury w wyznaczonych punktach odlewanej spirali. I tak na przykład w analizowanym punkcie nr „3” (rys. 6) dla temperatury zalewania 1440°C metal po 5 s osiągnął temperaturę bliską likwidus. Nastąpił wówczas spadek prędkości i zanik przepływu metalu, podczas gdy dla temperatury zalewania 1570°C po 5 s temperatura stopu wynosiła jeszcze ponad 1470°C, a prędkość przepływu metalu w formie – ponad 20 cm/s.

Prowadząc obliczenia porównywano wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych z wynikami symulacji dla przyjętych parametrów termofizycznych stopu H282. Uwzględniano tu przepuszczalność formy oraz współczynnik wymiany ciepła odlew – forma (HTC – *Heat Transfer Coefficient*).

Zgodność wyników obliczeń z przeprowadzonym eksperymentem (rys. 7) pozwoliła przyjąć uzyskane dane termofizyczne stopu H282 do dalszych obliczeń.



Rys. 6. Przykład symulacji przebiegu zmian temperatury i szybkości przepływu metalu w próbie lejności  
Fig. 6. Computer simulation of temperature and velocity of metal flow in castability trial



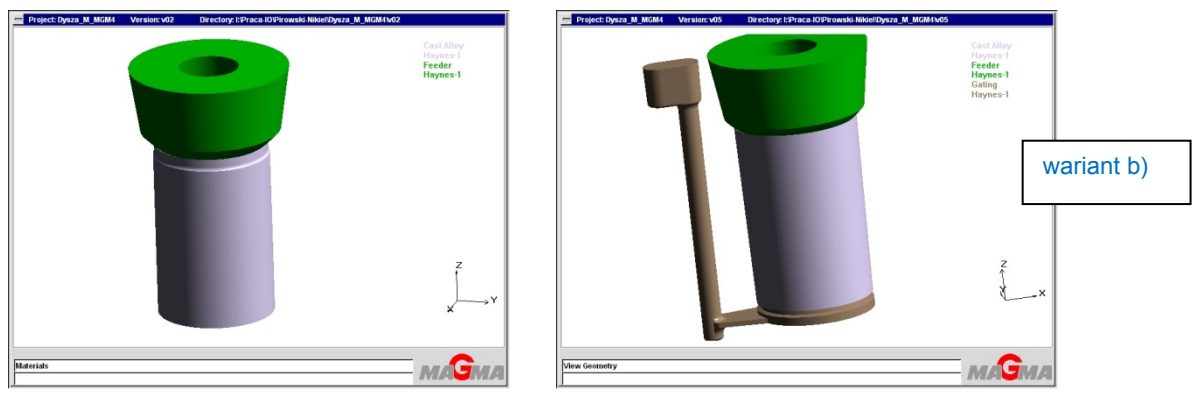
Rys. 7. Rzeczywiste i wirtualne spirale lejności  
Fig. 7. Comparison of simulated and real castability trials

Przeprowadzono analizę odlewania dyszy palnika gazowego DN100, stosowanego do wygrzewania kadzi odlewniczej. Wyniki tej analizy przedstawiono na rysunkach 8–11. Zasympulowano dwa warianty technologiczne:

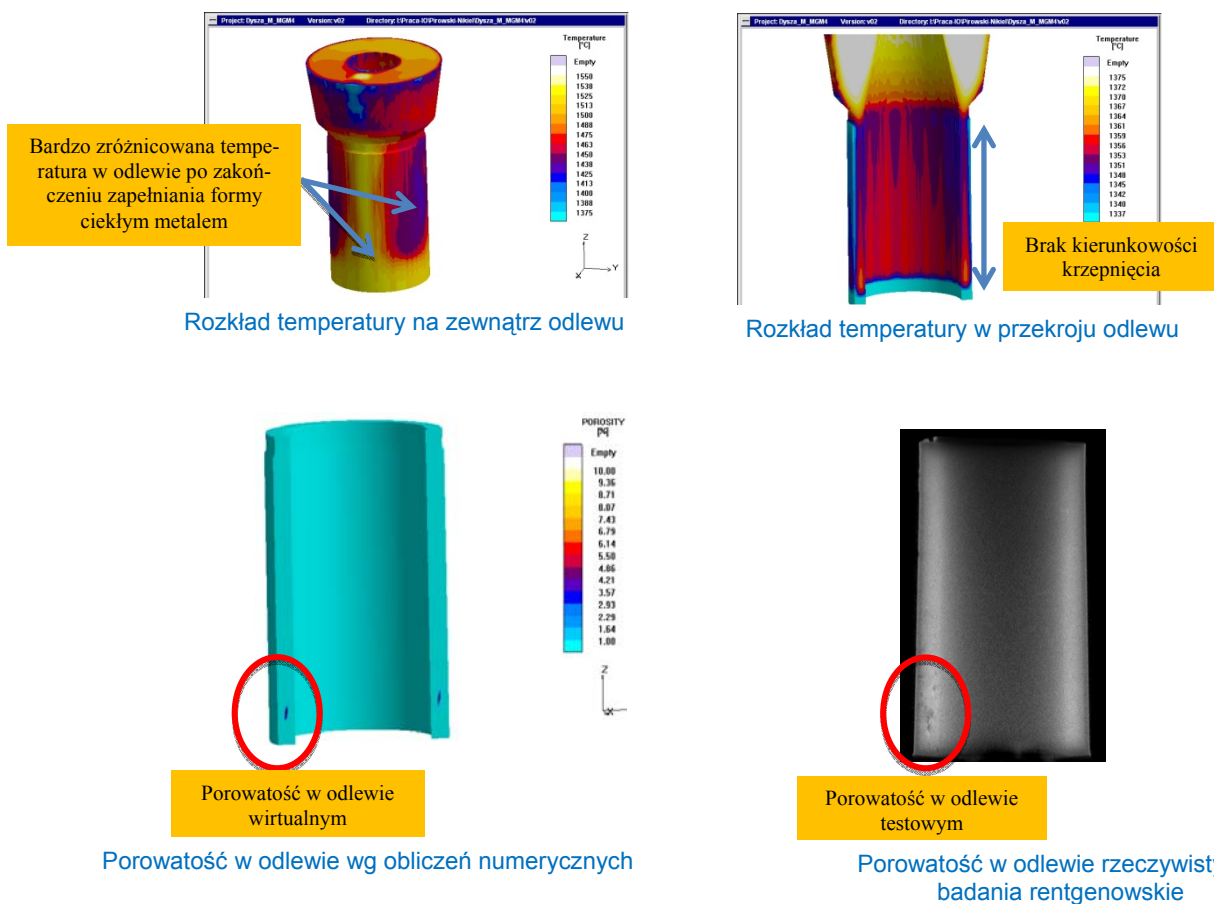
- technologię odlewania przez nadlew,
- technologię z układem wlewowym.

Na rys. 8 przedstawiono technologię odlewania w dwóch wariantach: a) i b) dyszy palnika DN1100.

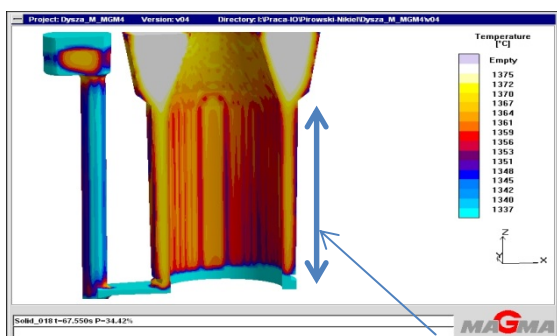
Technologia odlewania dyszy palnika poprzez nadlew nie sprzyjała kierunkowemu krzepnięciu. Rozkład temperatury na obwodzie pierścienia był nierównomierny (rys. 9). Po zakończeniu zalewania dolna część odlewu wykazywała wyższą temperaturę i w tym obszarze powstała porowatość, co zostało potwierdzone przez badania rentgenowskie. Metal wprowadzony do formy przez układ wlewowy od dołu wykazywał równomierny rozkład temperatury na obwodzie dyszy (rys. 10) i polepszenie się warunków krzepnięcia.



Rys. 8. Dwa warianty technologiczne odlewania dyszy palnika gazowego  
Fig. 8. Two different technologies of casting of gas nozzle

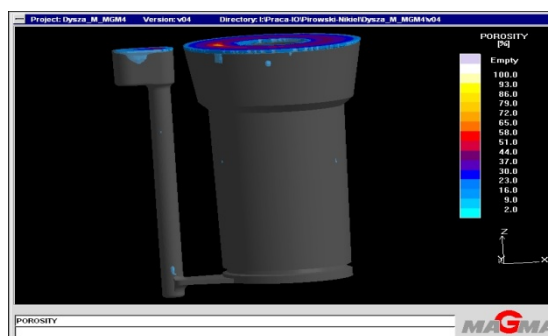


Rys. 9. Metal wprowadzany do formy przez nadlew – symulacja komputerowa  
Fig. 9. Computer simulation of pouring through the feeder



Zapewniona kierunkowość krzepnięcia

Rozkład temperatury w przekroju odlewu

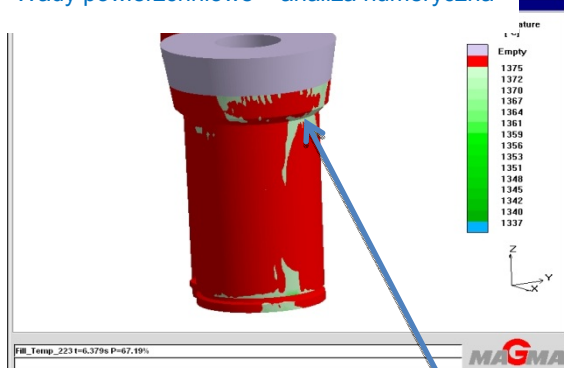


W odlewie brak porowatości

Analiza nieciągłości wewnętrznej w odlewie

Rys. 10. Metal wprowadzany do formy od dołu przez pierścieniowy układ wlewowy – symulacja komputerowa  
 Fig. 10. Computer simulation of pouring of gas nozzle through the bottom ring runner system

Wady powierzchniowe – analiza numeryczna



Niespawy w odlewie wirtualnym i rzeczywistym dyszy palnika DN100

Wady powierzchniowe – odlew rzeczywisty



Rys. 11. Metal wprowadzany do formy od dołu przez pierścieniowy układ wlewowy – niska temperatura zalewania  
 Fig. 11. Real pouring of gas nozzle through the bottom ring runner system

Przeprowadzono również symulację wpływu temperatury zalewania formy na jakość otrzymywanego odlewu. Niska temperatura zalewania może powodować występowanie niespawów, co zostało potwierdzone podczas odlewania wirtualnego i rzeczywistego dyszy palnika DN100.

#### 4. Podsumowanie

1. Analiza numeryczna oraz badania laboratoryjne pozwoliły na wyznaczenie właściwości termofizycznych stopu H282 powyżej 1000°C.
2. Przyjęte dane umożliwiły przeprowadzenie eksperymentu wirtualnego odlewania i porównanie wyników z wykonanym odlewem użytkowym.
3. Wyniki z obliczeń numerycznych, w tym rozkład porowatości i występowanie wad powierzchniowych, były zbliżone do wyników uzyskanych podczas eksperymentu rzeczywistego odlewania.
4. Przeprowadzone badania laboratoryjne oraz obliczenia numeryczne pozwalają na wstępne przyjęcie opracowanych danych termofizycznych stopu H282 do przeprowadzania dalszych symulacji. Wykorzystanie opracowanych danych termofizycznych w obliczeniach numerycznych dla dużych odlewów (np. 3000 kg) o bardziej skomplikowanych kształtach musi być jeszcze zweryfikowane, szczególnie dotyczy

to parametru zasięgu skutecznego zasilania, który trudno było ustalić na małym odlewie.

#### 5. Bibliografia

- [1] High-Temperature alloys. HAYNES 282 ALLOY, materiały firmowe HAYNES International <http://www.haynesintl.com> (data korzystania – listopad 2012 r.)
- [2] An Overview of the Ultrasupercritical Boiler Materials Development Program. Walt Mohn Babcock & Wilcox Company Barberton, OH; <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/03/ctua/11-40Mohn.pdf> (data korzystania – listopad 2012 r.)
- [3] Viswanathan R., Purgert R., Rao U.: Materials for Ultra-Supercritical Coal-Fired Power Plant Boilers. Materials for Advanced Power Engineering 2002; Proceedings Part II. Forschungszentrum Julich GmbH; 2002; pp. 1109-1129.
- [4] Evans H.E.: Stress effects in high-temperature oxidation of metals. Proc. Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants, edited by R. Viswanathan, D. Gandy, K. Coleman, ASM International, 2005. pp. 1-40.
- [5] R. Viswanathan, J. F. Henry, J. Tanzosh, G. Stanko, J. Shingledecker, B. Vitalis, and R. Purgert, U.S Program on Materials Technology for Ultra-Supercritical Coal Power Plants, Journal of Materials Engineering and Performance, 14 (2005), 281-292.
- [6] M. C. Flemings, Solidification Processing, McGraw-Hill Inc. London, 1974.
- [7] BN-79/4051-17 - norma branżowa: Technologiczna próba określania lejułości stopów odlewniczych.
- [8] Tabor A., Rączka J. S.: Odlewnictwo, Kraków: Wydawnictwo Fotobit, 1996, s. 39-43.

Praca została wykonana w ramach projektu międzynarodowego niewspółfinansowanego Nr 721/N-NICKEL/2010/0