

Konwersja materiałowo-technologiczna stopów niklu Część 2. Problemy technologiczne procesu odlewania

Material-technological conversion of nickel alloys Part 2. Technological problems of the casting process

Zenon Pirowski^{1*}

¹Institut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Polska
¹Foundry Research Institute, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Poland

*Corresponding author: zenon.pirowski@iod.krakow.pl

Received: 30.01.2019. Accepted in revised form: 28.02.2019.

© 2018 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/iod.2018.25

Streszczenie

Celem drugiej części podjętych prac było wykonanie odlewów użytkowych z żarowytrzymałych stopów niklu, tradycyjnie przerabianych plastycznie, przeznaczonych do eksploatacji w ekstremalnie trudnych warunkach. Omówiono związane z tym problemy technologiczne i uzyskane efekty, tak w zakresie właściwości odlanych stopów, jak i jakości otrzymanych odlewów.

Przedmiotem badań były stopy Inconel 740 (IN740) i Haynes 282 (H282), które stosowane są dotychczas wyłącznie jako stopy przerabiane plastycznie. Podjęto próby topienia ich w otwartym piecu indukcyjnym i odlewania grawitacyjnego. Wykazano, że właściwości mechaniczne tak otrzymanych stopów są w wysokiej temperaturze porównywalne, a nawet przewyższają właściwości ich odpowiedników przerabianych plastycznie. Potwierdzono, że przy zachowaniu odpowiednio dobrze opracowanego reżimu technologicznego możliwe jest wykonywanie z tych stopów odlewów dobrej jakości, przeznaczonych do pracy w temperaturze znacznie przekraczającej 760°C.

Słowa kluczowe: konwersja technologiczna, stopy żarowytrzymałe, stopy niklu, topienie, odlewanie

Abstract

The aim of the second part of the study was to make utility castings of refractory nickel alloys, traditionally processed plastically, intended for use in extremely difficult conditions. The related technological problems and obtained effects were discussed, both in terms of the properties of cast alloys and the quality of the castings obtained.

Inconel 740 (IN740) and Haynes 282 (H282) alloys were the subject of research, which so far have been used only as plastically processed alloys. Attempts were made to melt them in an open induction furnace and gravity casting. It has been shown that mechanical properties of such alloys are comparable at high temperature and even exceed those of their counterparts processed plastically. It has been confirmed that with a well-developed technological regime it is possible to produce from these alloys of good quality castings intended for operation at temperatures significantly exceeding 760°C.

Keywords: technological conversion, refractory alloys, nickel alloys, melting, casting

1. Wprowadzenie

Stopy niklu różnego przeznaczenia znajdują zastosowanie praktycznie w każdej dziedzinie życia, w każdej gałęzi gospodarki: od gospodarstw domowych, przez motoryzację, przemysł naftowy, morski, po przemysł

1. Introduction

Nickel alloys for various purposes are used in virtually every walk of life, in every branch of the economy: from households, through the automotive industry, oil industry, maritime industry, to aviation and aerospace

lotniczy i kosmiczny. Oporowe elementy grzewcze wykonywane są ze stopów niklu zarówno do pieców przemysłowych, jak i sprzętu AGD. Ponadto stosowane są jako rury osłonowe/płaszczce, jak też na rezystory trakcji w lokomotywach. W elektronice i komunikacji właściwości niklu i stopów niklowo-żelazowych predysponują je do wielu zastosowań, poczynając od komponentów precyzyjnych po uszczelnienia szkło/metal, osłony magnetyczne i układy scalone. W urządzeniach do obróbki cieplnej stosowane są na elementy pieców, takie jak: promienniki rurowe, retorty, mufy, taśmy przenośników, termoelementy, kosze i inne części konstrukcyjne. W motoryzacji znajdują zastosowanie w układach wydechowych, zaworach silników, świecach zapłonowych i elementach zapłonu, czujnikach i systemach bezpieczeństwa. W przemyśle chemicznym wykonywane są z nich elementy aparatury chemicznej, a w petrochemicznym – zbiorniki, reaktory, wymienniki ciepła, rury rozkładu termicznego, rury przesyłowe i inne. W przemyśle energetycznym wykonuje się z nich turbiny gazowe, rurociągi wody zasilającej i przegrzewacze pary. W przemyśle wydobywczym ropy naftowej i gazu znajdują zastosowanie począwszy od orurowania odwiertu i jego oprzyrządowania poprzez głowice wiertnicze, wyposażenie procesu technologicznego aż do masztów. Niektóre z tych stopów są szczególnie przydatne w odwiertach, w których kwaśny gaz i ropa w wysokiej temperaturze powodują duże problemy operacyjne. W ochronie środowiska znajdują zastosowanie na elementy instalacji odsiarczania spalin, wykładziny kominów, płuczki wieżowe, zasuw i wymienniki ciepła. Inżynieria morska to jedno z najstarszych zastosowań stopów niklu ze względu na świetną odporność na korozję powodowaną przez wodę morską. Stosuje się je w przemyśle stoczniowym, łodziach podwodnych, platformach wiertniczych oraz w elektrowniach i zakładach przesyłowych używających wodę morską jako medium chłodzące. W przemyśle lotniczym, ze względu na dobre właściwości wytrzymałościowe w wysokiej temperaturze, stosuje się je w silnikach samolotów pasażerskich, wojskowych, jak również na narzędzia służące do produkcji elementów kompozytowych.

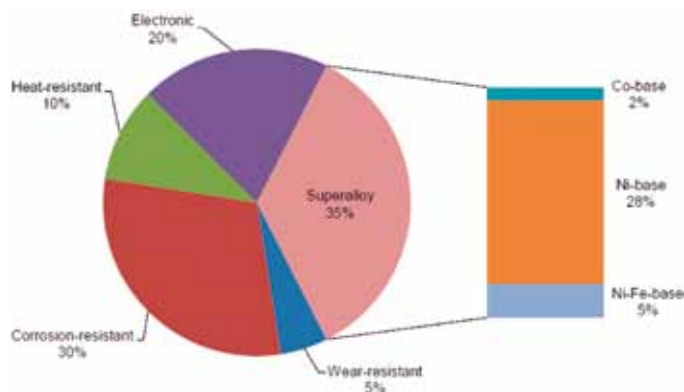
Strukturę światowej produkcji stopów wysokojakościowych, w tym stopów niklu, w zależności od przeznaczenia, przedstawiono graficznie na [rysunku 1](#).

W niniejszej pracy podjęto próbę opracowania technologii i wykonania odlewów użytkowych z wybranych nadstopów niklu, gatunków dotychczas stosowanych wyłącznie jako przerabiane plastycznie. Przystępując do tego zadania, poczyniono następujące założenia: proces topienia musi odbywać się w otwartym piecu indukcyjnym przy grawitacyjnym zalewaniu form odlewniczych, a sam materiał jako odlewany winien mieć wystarczająco dobre właściwości mechaniczne w temperaturze powyżej 760°C, co poruszono w pierwszej części artykułu.

industries. Resistant heating elements are made of nickel alloys for both industrial furnaces and household appliances. In addition, they are used as casing pipes/coats as well as traction resistors in locomotives. In electronics and communication, the properties of nickel and nickel-iron alloys predispose them for many applications, ranging from precision components to glass/metal seals, magnetic shields and integrated circuits. In heat treatment equipment they are used for furnace components such as radiant tube heaters, retorts, muffs, conveyor belts, thermoelements, baskets and other structural parts. In the automotive industry they are used in exhaust systems, engine valves, spark plugs and ignition elements, sensors and safety systems. In the chemical industry they are used to make elements of chemical apparatus, and in the petrochemical industry – tanks, reactors, heat exchangers, thermal decomposition pipes, transfer pipes and others. In the power industry, they are used to make gas turbines, feedwater pipelines and steam superheaters. In the oil extraction and gas industry applications range from well piping and instrumentation, through drilling heads, process equipment to masts. Some of these alloys are particularly useful in boreholes where acidic gas and oil at high temperatures cause major operational problems. They are used in environmental protection for flue gas desulphurisation systems, chimney liners, tower scrubbers, gate valves and heat exchangers. Marine engineering is one of the oldest applications of nickel alloys due to its excellent resistance to corrosion caused by sea water. They are used in the shipbuilding industry, submarines, oil platforms, as well as in power plants and transmission plants using sea water as a cooling medium. In the aviation industry, due to their good strength properties at high temperatures, they are used in passenger and military aircraft engines, as well as tools for the production of composite components.

The structure of world production of high quality alloys, including nickel alloys, depending on the purpose, is shown graphically in [Figure 1](#).

In this study an attempt was made to develop the technology and production of utility castings from selected nickel superalloys, so far used only as plastically processed grades. The following assumptions have been made in order to proceed with this task: the melting process must take place in an open induction furnace with gravity casting of moulds, and the material itself as cast material should have sufficiently good mechanical properties at temperatures above 760°C, as discussed in the first part of the article.



Rys. 1. Struktura światowej produkcji stopów wysokiej jakości w 2012 r. (Roskill Information Services Ltd.)

Fig. 1. The structure of world production of high quality alloys in 2012 (Roskill Information Services Ltd.)

2. Nadstopy (superstopy)

Nadstopy w wysokiej temperaturze (nawet do 80% temperatury topienia) wykazują bardzo dobrą wytrzymałość mechaniczną, odporność korozyjną i stabilność wymiarową w trakcie eksploatacji [1,2,3]. Są to zatem stopy:

- żaroodporne,
- żarowytrzymałe,
- odporne na pełzanie.

Wyróżnia się nadstopy na osnowie: żelaza (15%), kobaltu (5%) oraz niklu (80%). Przedmiotem zainteresowania autora w niniejszej pracy są nadstopy niklu. Są to stopy wieloskładnikowe. Pierwiastki stopowe w nich występujące podzielić można na:

- rozpuszczające się w osnowie austenitycznej: Co, Fe, Cr, V, Mo, W,
- tworzące węgliki: Cr, Mo, W, V, Nb, Ti, Ta,
- tworzące inne wydzielenia: Al, Ti, Nb, Ta,
- segregujące do granic ziaren: Mg, B, C, Zr,
- tworzące tlenki zapobiegające korozji: Cr, Al,
- zwiększające odporność na wysokotemperaturowe utlenianie: La, Th.

Główne fazy występujące w nadstopach niklu to:

- osnowa paramagnetyczna (γ), o strukturze krystalicznej RSC (A1),

2. Superalloys

High-temperature superalloys (up to 80% of melting point) exhibit very good mechanical strength, corrosion resistance and dimensional stability during operation [1,2,3]. These are alloys:

- heat-resistant,
- refractory,
- resistant to creep.

There are superalloys on the basis of: iron (15%), cobalt (5%) and nickel (80%). The subject of interest of the author in this paper is nickel superalloys. These are multi-component alloys. Alloying elements occurring in them can be divided into:

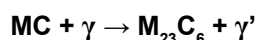
- dissolving in the austenitic matrix: Co, Fe, Cr, V, Mo, W,
- forming carbides: Cr, Mo, W, V, Nb, Ti, Ta,
- forming other precipitations: Al, Ti, Nb, Ta,
- segregating to the grain boundaries: Mg, B, C, Zr,
- forming anti-corrosion oxides: Cr, Al,
- increasing resistance to high-temperature oxidation: La, Th.

The main phases occurring in nickel superalloys are:

- paramagnetic matrix (γ), with crystalline structure RSC (A1),

- koherentna z osnową γ faza γ' ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$) – w niektórych stopach jej zawartość przekracza nawet 50% objętości,
- węgliki typu MC – tytanu, tantalumu, hafnu i niobu.

Podczas obróbki cieplnej i/lub eksploatacji powyżej 980°C węgliki MC mogą się rozpadać tworząc węgliki typu M_{23}C_6 wg reakcji [4]:



Rozpad ten zauważano też podczas stosunkowo wolnego procesu stygnięcia stopu IN740 bezpośrednio po odlaniu do gorących form skorupowych o temperaturze wypalania 950°C , co pokazano na rysunku 2.

Wyróżnia się następujące grupy nadstopów niklu: obrabiane plastycznie, stosowane w stanie odlanym oraz stopy na łopatki (w tym monokrystaliczne).

Temperatura pracy stopów odlewniczych jest o około 30°C wyższa niż temperatura pracy stopów przerabianych plastycznie. Jednokierunkowa krystalizacja podwyższa tę temperaturę o dalsze 30°C . Monokryształy mogą być stosowane w jeszcze wyższej temperaturze.

Wpływ procesu krystalizacji nadstopów niklu na ich makrostrukturę oraz na trwałość eksploatacyjną łopatek lotniczych pokazano odpowiednio na rysunkach 3 i 4.

- coherent with the matrix γ phase γ' ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$) – in some alloys its content exceeds even 50% of the volume,

- MC type carbides – titanium, tantalum, hafnium and niobium.

During heat treatment and/or operation above 980°C , MC carbides can decompose into two carbides of type M_{23}C_6 according to the reaction [4]:

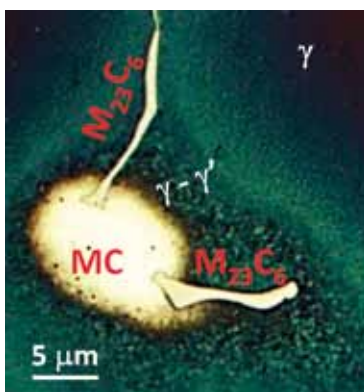


This decomposition was also observed during the relatively slow cooling process of the IN740 alloy directly after casting into hot shell moulds with a firing temperature of 950°C , as shown in Figure 2.

There are the following groups of nickel superalloys: plastic machined, used in the cast state and alloys for turbine blades (including monocrystalline).

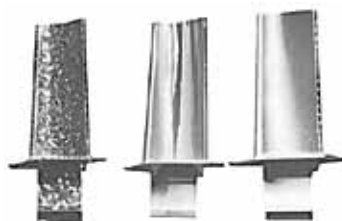
The working temperature of casting alloys is about 30°C higher than the working temperature of plastically processed alloys. One-way crystallisation increases this temperature by a further 30°C . Monocrystals can be used at even higher temperatures.

The influence of the crystallisation process of nickel superalloys on their macrostructure and on the service life of aircraft blades is shown in Figures 3 and 4 respectively.

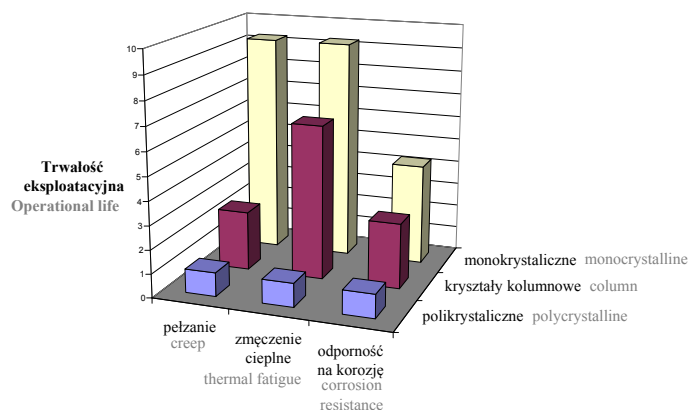


Rys. 2. Mikrostruktura stopu IN740 – stan odlany [5]
Rozpad węglika MC na $\text{M}_{23}\text{C}_6 + \gamma'$ w trakcie stygnięcia odlewu

Fig. 2. IN740 alloy microstructure – cast state [5]
Decomposition of MC carbide into $\text{M}_{23}\text{C}_6 + \gamma'$ during the cooling down of the casting



Rys. 3. Makrostruktura łopatki turbiny o budowie od lewej: polikrystalicznej, kolumnowej, monokrystalicznej [5]
Fig. 3. Macrostructure of turbine blade with the structure from the left: polycrystalline, column, monocrystalline [5]



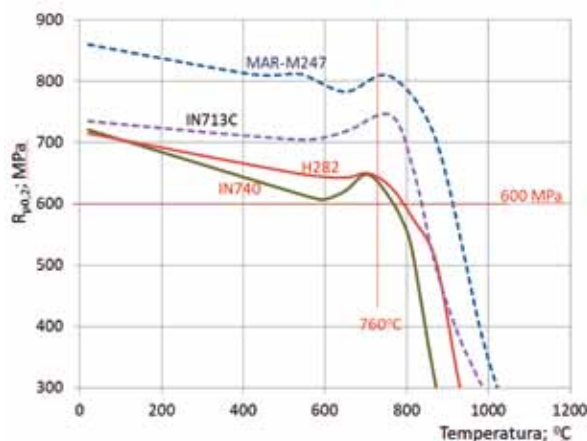
Rys. 4. Trwałość eksploatacyjna łopatek lotniczych w zależności od technologii procesu wytwarzania [5]
Fig. 4. Operational life of aircraft blades depending on the technology of the melting process [5]

3. Prace badawcze

Jak wcześniej wspomniano, temperatura pracy stopów odlewniczych jest wyższa niż przerabianych plastycznie, z tego względu w ramach projektu międzynarodowego *Advanced Ultra-Supercritical NICKEL (A-USC NICKEL)* postanowiono wykonać odlewy użytkowe przeznaczone do pracy w ekstremalnych warunkach eksploatacyjnych z żarowytrzymałych stopów niklu tradycyjnie przerabianych plastycznie. Przy wyborze stopów do badań kierowano się kryterium użytkowym i kryterium technologicznym. Kryterium użytkowe zostało zdefiniowane następująco: właściwości stopu muszą umożliwić pracę odlewów w temperaturze nie niższej niż 760°C. Przyjęto tu, że umowna granica plastyczności w tej temperaturze winna być nie mniejsza niż 600 MPa. Kryterium technologiczne to możliwość topienia w otwartym piecu indukcyjnym i odlewania grawitacyjnego. Wśród nadstopów niklu pierwsze kryterium w zadawalającym stopniu spełniają takie stopy, jak: MAR-M247, IN713C, H282 i IN740, co przedstawiono na rysunku 5.

3. Research work

As mentioned earlier, the working temperature of foundry alloys is higher than that of plastically processed alloys, which is why the international project *Advanced Ultra-Supercritical NICKEL (A-USC NICKEL)* decided to make utility castings for operation in extreme exploitation conditions from heat-resistant nickel alloys traditionally processed in plastic processing. The selection of alloys for the research was based on utility and technological criteria. The utility criterion was defined as follows: the properties of the alloy must allow the castings to operate at a temperature not lower than 760°C. It has been assumed that the yield strength at this temperature should not be lower than 600 MPa. The technological criterion is the possibility of melting in an open induction furnace and gravity casting. Among nickel superalloys, the first criterion is satisfactorily met by alloys such as MAR-M247, IN713C, H282 and IN740, as shown in Figure 5.



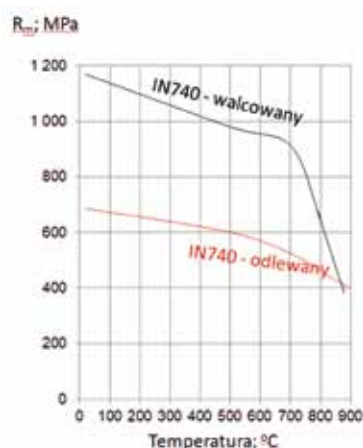
Rys. 5. Temperaturowa zależność umownej granicy plastyczności wybranych nadstopów niklu [5]
Fig. 5. Temperature dependence of conventional yield strength of selected nickel superalloys [5]

Problemem jest jednak spełnienie kryterium technologicznego. Stopy niklu charakteryzują się złą lejnością i dużym skurczem odlewniczym przekraczającym często 2,5%. Podstawową trudnością staje się wysoka reaktywność ciekłego metalu zarówno z tlenem atmosferycznym, jak i z ceramiką tygla i formy, zwłaszcza stopów zawierających znaczną ilość takich dodatków stopowych, jak aluminium i tytan.

W stopach IN713C i MAR-M247 łączna zawartość Al i Ti przekracza 6% wag. (odpowiednio około 7,5% i 6,5%), dlatego mogą być one topione i odlewane tylko próżniowo. W stopach IN740 i H282 łączna zawartość Al i Ti jest znacznie mniejsza – poniżej 3,7% wag. Dla stopu IN740 to około 2,7%, a dla H282 – około 3,6% wag. W tym upatrywano możliwość osiągnięcia zamierzonego celu.

Postawione zadanie badawcze to zastosowanie tych stopów na odlewy, bez istotnej utraty właściwości użytkowych w stosunku do stopów przerabianych plastycznie.

Porównanie uzyskanej wytrzymałości na rozciąganie odlanych w Instytucie Odlewnictwa stopów IN740 i H282 z odpowiednimi stopami przerabianymi plastycznie [5] przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Charakterystyka termiczna wytrzymałości na rozciąganie stopu IN740

Fig. 6. Thermal characteristics of tensile strength of IN740 alloy

Właściwości mechaniczne stopu H282 odlanego w ramach realizowanych prac przewyższają znacznie właściwości analogicznego stopu odlanego w laboratorium partnera amerykańskiego, co pokazano na rysunku 8.

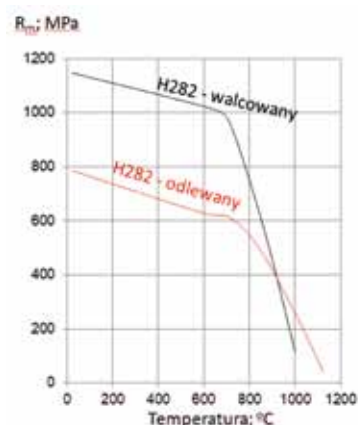
Po opanowaniu technologii topienia stopu H282 w otwartym piecu indukcyjnym przystąpiono do wykonania odlewów użytkowych z tego stopu i badań ich jakości. Wybranymi elementami na odlewy eksperymentalne były: dysza palnika o średnicy 100 mm do wygrzewania kadzi odlewniczej oraz końcówka tej dyszy. Warunki eksploatacji takiej dyszy przedstawiono na rysunku 9, a wykonane odlewy surowe – na rysunku 10.

However, the problem is that the technological criterion is met. Nickel alloys are characterised by poor castability and high shrinkage, often exceeding 2.5%. The main difficulty is the high reactivity of liquid metal, both with atmospheric oxygen and with the ceramics of the crucible and form, especially alloys containing a significant amount of such alloying additives as aluminium and titanium.

In alloys IN713C and MAR-M247 the total content of Al and Ti exceeds 6% by weight (about 7.5% and 6.5% respectively); therefore they can be melted and cast only under vacuum. In alloys IN740 and H282, the total content of Al and Ti is significantly less than 3.7% by weight. For alloy IN740 it is about 2.7%, and for H282 – about 3.6% by weight. This was seen as an opportunity to achieve the intended goal.

The research task is to apply these alloys to castings without any significant loss of functional properties in relation to plastically processed alloys.

The comparison of tensile strength of cast alloys IN740 and H282 with the corresponding plastically processed alloys [5] is presented in Figures 6 and 7.

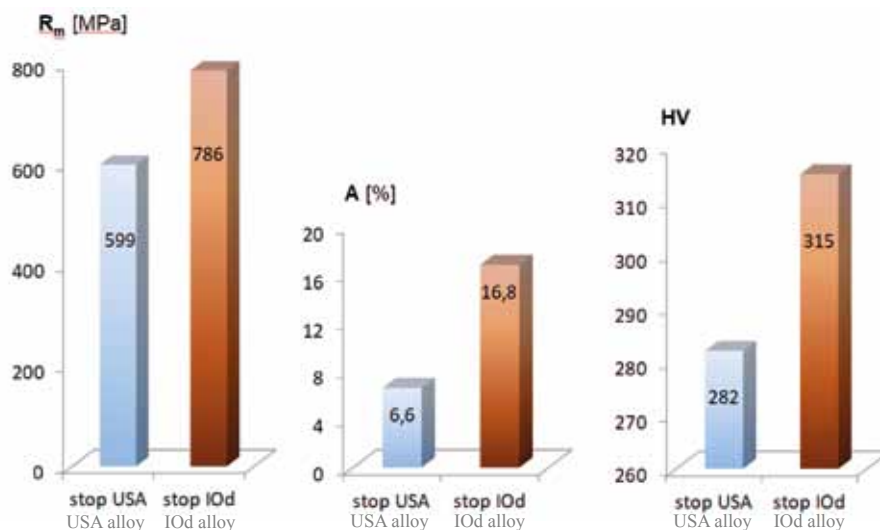


Rys. 7. Charakterystyka termiczna wytrzymałości na rozciąganie stopu H282

Fig. 7. Thermal characteristics of tensile strength of H282 alloy

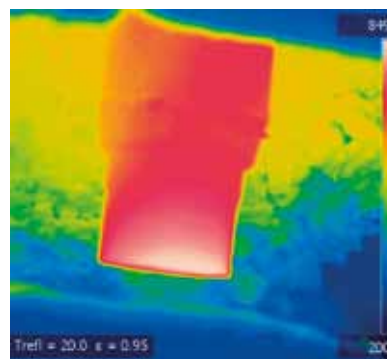
Mechanical properties of the alloy H282 cast in the course of the works carried out significantly exceed those of the analogous alloy cast in the laboratory of the American partner, as shown in Figure 8.

After mastering the melting technology of the alloy H282 in an open induction furnace, the production of utility castings of this alloy and their quality tests were started. Selected elements for experimental castings were: a burner nozzle with a diameter of 100 mm for heating the casting ladle and the tip of this nozzle. Operating conditions of such a nozzle are shown in Figure 9, and the raw castings are shown in Figure 10.



Rys. 8. Porównanie właściwości mechanicznych stopu H282 odlanego w Instytucie Odlewnictwa (IOd) z właściwościami analogicznego stopu wykonanego w USA

Fig. 8. Comparison of mechanical properties of the alloy H282 cast in the Foundry Institute with those of an analogous alloy made in the USA



Rys. 9. Warunki pracy dyszy palnika o średnicy 100 mm do wygrzewania kadzi odlewniczej

Fig. 9. Operating conditions for a 100 mm diameter burner nozzle for heating the casting ladle



Rys. 10. Wykonane ze stopu H282 odlewy użytkowe:

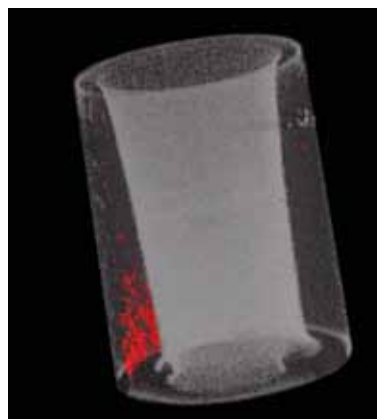
- dysze palnika gazowego DN100 (z lewej – masa około 15 kg)
- końcówki dyszy tego palnika (z prawej – masa około 7 kg)

Fig. 10. Made of H282 alloy, utility castings:

- gas burner nozzles DN100 (left – weight approx. 15 kg)
- end of the nozzle of this burner (on the right – weight about 7 kg)

W przypadku zastosowania technologii zalewania przez nadlew zarówno analiza numeryczna odlewu wirtualnego, jak i rentgenowska (tomografia komputerowa) odlewu rzeczywistego wykazały obecność wad wewnętrznych w ściankach tulei, co przedstawiono na rysunku 11. Korekta zastosowanej technologii na zalewanie syfonowe pozwoliła uniknąć tych wad. Pokazano to na rysunku 12.

In the case of pouring through a feeder, both the numerical analysis of virtual casting and X-ray (computed tomography) of real casting showed the presence of internal defects in the sleeve walls, which is shown in Figure 11. The correction of the applied technology for bottom pouring allowed avoiding these defects. This is shown in Figure 12.



Rys. 11. Nieciągłości wewnętrzne odlewu dyszy DN100 ze stopu H282 zalewanego przez nadlew:

- odlew wirtualny z lewej (analiza numeryczna)
- odlew rzeczywisty z prawej (wizualizacja 3D badań tomograficznych)

Fig. 11. Internal discontinuities in the nozzle DN100 casting from H282 alloy poured through a feeder:

- virtual casting on the left (numerical analysis)
- end of the nozzle of this burner (on the right – weight about 7 kg)



Rys. 12. Brak porowatości w odlewie dyszy DN100 ze stopu H282 zalewanego syfonowo:

- odlew wirtualny z lewej (analiza numeryczna)
- odlew rzeczywisty z prawej (wizualizacja 3D badań tomograficznych)

Fig. 12. No porosity in the nozzle DN100 casting from H282 alloy poured from the bottom:

- virtual casting on the left (numerical analysis)
- real casting on the right (3D visualisation of tomography tests)

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdziły niekorzystne właściwości technologiczne stopów niklu: złą lejność, duży skurcz ciekłego metalu w formie odlewniczej,

4. Summary

The conducted research confirmed unfavourable technological properties of nickel alloys: bad castability, high shrinkage of liquid metal in the casting mould,

skłonność do tworzenia jam skurczowych, duże powinowactwo do tlenu, duża reaktywność na styku ciekły metal/ceramika.

Trudności w opracowywaniu technologii topienia i odlewania tych stopów dotyczą odpowiedniego doboru w zakresie:

- materiałów ceramicznych: wymurówki tygla i kadzi, formy, rdzenia i pokrycia,
- technologii formy: układy wlewowo-zasilające, otuliny, ochładzalniki,
- technologii topienia: roztopianie, przegrzewanie, obróbka pozapiecowa,

co przykładowo pokazano na rysunkach 13 i 14.



Rys. 13. Efekt reakcji ciekłego stopu IN740 z materiałem ceramicznym tygla laboratoryjnego pieca indukcyjnego

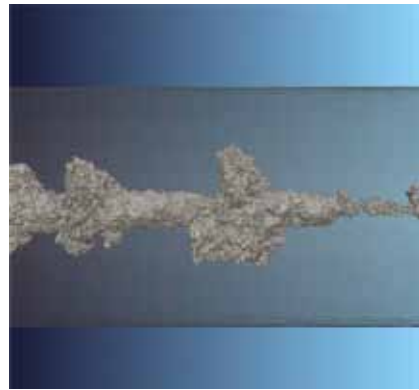
Fig. 13. The effect of reaction effect of liquid IN740 alloy with ceramic material of laboratory induction furnace crucible

susceptibility to shrinkage cavities, high affinity to oxygen, and high reactivity at the contact of liquid metal/ceramics.

Difficulties in the development of melting and casting technologies of these alloys concern the appropriate selection in the range:

- ceramic materials: crucible and ladle linings, moulds, core and coatings,
- mould technology: pouring-feeding systems, covers, coolers,
- melting technology: melting, overheating, post-processing,

as shown, for example, in Figures 13 and 14.



Rys. 14. Wizualizacja 3D wad skurczowych w odlewach testowych stopu IN740

Fig. 14. 3D visualisation of shrinkage defects in IN740 alloy test castings



Dysza palnika gazowo-tlenowego
Gas/oxygen burner nozzle



Kolektor układu wydechowego
Exhaust system collector



Odlew dla przemysłu zbrojeniowego
Casting for the defense industry

Rys. 15. Odlewy testowe ze stopu H282
Fig. 15. Test castings made of H282 alloy

Po opanowaniu opisanych trudności technologicznych, wykonane odlewy użytkowe wykazały wystarczająco dobrą jakość, co potwierdziły przeprowadzone ba-

After mastering the technological difficulties described above, the castings showed a sufficiently good quality, which was confirmed by the tomographic tests carried

dania tomograficzne. Przy wykonywaniu tych odlewów należy ściśle przestrzegać opracowanego reżimu technologicznego. Szczególną uwagę należy zwracać na dotrzymywanie parametrów temperaturowo-czasowych procesu topienia, obróbki pozapiecowej i zalewania.

W ramach prac projektowych, oprócz opisanych odlewów dyszy palnika, wykonano również inne testowe odlewy ze stopu H282, przykładowe pokazane na [rysunku 15](#).

Podziękowania

Praca powstała w wyniku realizacji projektu pt. „Konwersja technologiczna stopów niklu pracujących w ekstremalnych warunkach”. Projekt ten, nr umowy TANGO2/340100/NCBR/2017 z dnia 28.04.2017 r., realizowany jest przez Instytut Odlewnictwa w Krakowie w ramach Programu TANGO2. Powstał on na bazie Projektu Międzynarodowego Niewspółfinansowanego nr 721/N-NICKEL/2010/0 pt. „Określenie wpływu procesu technologicznego na jakość odlewów z nadstopów niklu dla potrzeb energetyki, chemii i motoryzacji”.

Literatura/References

1. Prowans S. 1988. *Metaloznawstwo*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
2. Wesołowski K. 1978. *Metaloznawstwo i obróbka cieplna*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
3. Przybyłowicz K. 2007. *Metaloznawstwo*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
4. Wei Chao-Nan, Hui-Yun Bor, Li Chang. 2008. „Effect of hot isostatic pressing on microstructure and mechanical properties of CM-681LC nickel-base superalloy using Microcast”. *Materials Transactions* 49 (1) : 193–201.
5. Pirowski Z. 2013. *Stopy niklu jako nowoczesne tworzywo odlewnicze do pracy w ekstremalnych warunkach eksploatacji*. Kraków: Instytut Odlewnictwa.

out. When making these castings one should strictly follow the developed technological regime. Particular attention should be paid to the observance of temperature and time parameters of the melting process, post-furnace treatment and pouring.

As part of the design works, apart from the described burner nozzle castings, other test castings made of H282 alloy were also made, examples of which are shown in [Figure 15](#).

Acknowledgments

The study was created as a result of the execution of the project entitled “Technological conversion of nickel alloys working under extreme conditions”. This project, contract No.: TANGO2/340100/NCBR/2017 of 28.04.2017 is realised by the Foundry Research Institute in Kraków under TANGO2 Programme. It was created on the basis of the International Non Co-financed Project No 721/N-NICKEL/2010/0 entitled “Defining the impact of the technological process on the quality of castings of nickel superalloys for the needs of the energy, chemical and automotive industries”.