

Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

Modern material technologies in aerospace industry



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Konferencja Rady Partnerów RP CZT AERONET
i Konferencja Podsumowująca Projekt PKAERO
30 Listopada- 1 Grudnia 2015

ZB 13

Opracowanie technologii przetapiania stopów niklu z zastosowaniem modyfikowania nanocząstkami proszków

Development of the technology of remelting nickel alloys with the use of nanopowder modifications

Politechnika Łódzka, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Warszawska

Tytuł rozwiązania innowacyjnego

Title of the innovative solution

Ocena jakości metalurgicznej wlewków wsadowych („master heat”) z nadstopów niklu i kobaltu oraz innych stopów metali metodą termicznej analizy ATD (ZB.13 i ZB.12)

Evaluation of metallurgical quality of feed ingots („master heat”) of nickel and cobalt superalloys as well as other alloys using ATD thermal analysis (ZB.13 and ZB.12)

Krótki opis rozwiązania

Brief description of the solution

Arzytrzymaliśmy stopów niklu z podstawowym materiałem stopowym na odlew elementów cz. ci silników lotniczych i to zarówno na cz. ci statycznych jak i obrotowych elementów kierujących, pracujących w podwyższonej temperaturze pod działaniem sił masowych. Od odlewów tych wymaga się m.in. wysokiej odporności na zmęczenie, odporności na pękanie w wysokiej temperaturze i odporności na korozję w środowisku zawierającym produkty spalania paliwa. Właściwość ciu cykowe walek elementów zależy od mikro- i mikrostruktury kształtowanej podczas krzepnięcia i obecności zanieczyszczeń niemetalicznych, wydzielających się zwykle w ostatnim etapie krzepnięcia iia. Podczas topienia do ciekłego stopu mogą przetrwać różnego rodzaju zanieczyszczenia, których źródłem są najczęściej: zanieczyszczone materiały wsadowe, materiał ceramiczny tygla, niewłaściwa atmosfera w komorze pieca, (np. argon zanieczyszczony tlenem), produkty reakcji tworzący formy z ciekłym stopem, szczególnie przy wysokiej temperaturze odlewania. Technologia topienia stopów niklu, ze względu na zamkniętą komorę topienia, uniemożliwia ewentualne procesy rafinowania, usuwania łału. Dlatego dla wyeliminowania zanieczyszczeń mo oprowadzić do zanieczyszczenia stopów niklu wtrąceniami niemetalicznymi lub gazami. Wskazane zanieczyszczenia niemetalicznych charakteryzują niską temperaturę krzepnięcia, co powoduje ich gromadzenie się przed frontem krzepnięcia i krystalizacji jako ostatnie, co zachodzi w III etapie krzepnięcia. Procesy te związane są z wydzielaniem energii (spadku egzotermicznej) i tego względu mo na je analizować metodą analizy termicznej ATD. Analiza wykresu pochodnej dT/dt, obrazuje ci szybko spadku temperatury w tym okresie, daje mo liwo jako ciewej oceny efektu zanieczyszczenia stopu wtrąceniami niemetalicznymi i gazami.

Creep-resistant nickel alloys are the primary material used for cast components of aircraft engines, both static and rotary steering parts, operating at elevated temperatures under the action of mass forces. The requirements imposed on these castings include, among others, high fatigue resistance, creep resistance and corrosion resistance in a medium containing products of fuel combustion. The performance properties of these elements depend on the macro- and microstructure formed during solidification and on the presence of non-metallic inclusions, usually precipitated in the last stage of solidification.

During melting, impurities of various types can penetrate the liquid alloy, their source being usually: contaminated charge materials, ceramic material of the crucible, atmosphere in the furnace chamber (e.g. argon contaminated with oxygen), products of reaction taking place between the moulding material and liquid alloy, especially when moulds are poured at high temperature. The technology of melting nickel alloys in closed melting chamber makes the process of refining, deslagging, etc. impossible. Therefore, any of the above mentioned factors may eventually lead to a contamination of nickel alloys with non-metallic inclusions or gas. Most of the non-metallic inclusions are characterised by low solidification point, which makes them gather ahead of the solidification front and solidify as the last ones in stage III of the solidification process. These processes are related with the liberation of higher or lower amounts of energy (exothermic processes) and therefore can be analysed by an ATD thermal analysis. An analysis of the dT/dt derivative curve showing the rate of temperature drop during this period helps in qualitative evaluation of the consequences of the alloy being contaminated with non-metallic inclusions and gas.

Graficzna prezentacja rozwiązania innowacyjnego

Visualization of the innovative solution

Obecnie w stopie gazów zanieczyszczenie prowadzi zwykle do utworzenia niskotopliwych eutektyk, co znacznie wydłuża czas topienia i obniża wartość pochodnej dT/dt (szybkość spadku temperatury). Zmienia się również nachylenie stycznej do przebiegu pochodnej, w zależności od stopnia zanieczyszczenia. Gdy nachylenie wykresu dT/dt zmniejsza się, mo na wnioskować o znaczącym zanieczyszczeniu stopu niskotopliwymi wtrąceniami niemetalicznymi. W skład tych eutektyk wchodzi cz. ci zanieczyszczenia obecne w jamach i rzadziach skurczowych wlewków wsadowych, (tzw. „master heat”).

The presence of gas and impurities in the melt usually leads to the formation of low-melting point eutectics, which significantly prolong the final stage of solidification and reduce the value of the dT/dt derivative curve (the rate of temperature drop). The slope of the tangent to the derivative curve also changes, depending on the degree of contamination. When the slope angle has a low value, it means a high degree of the alloy contamination with low-melting point non-metallic inclusions. The composition of these eutectics often includes the impurities present in the shrinkage cavities and microporosities formed in the primary ingots (so called „master heat” ingots).

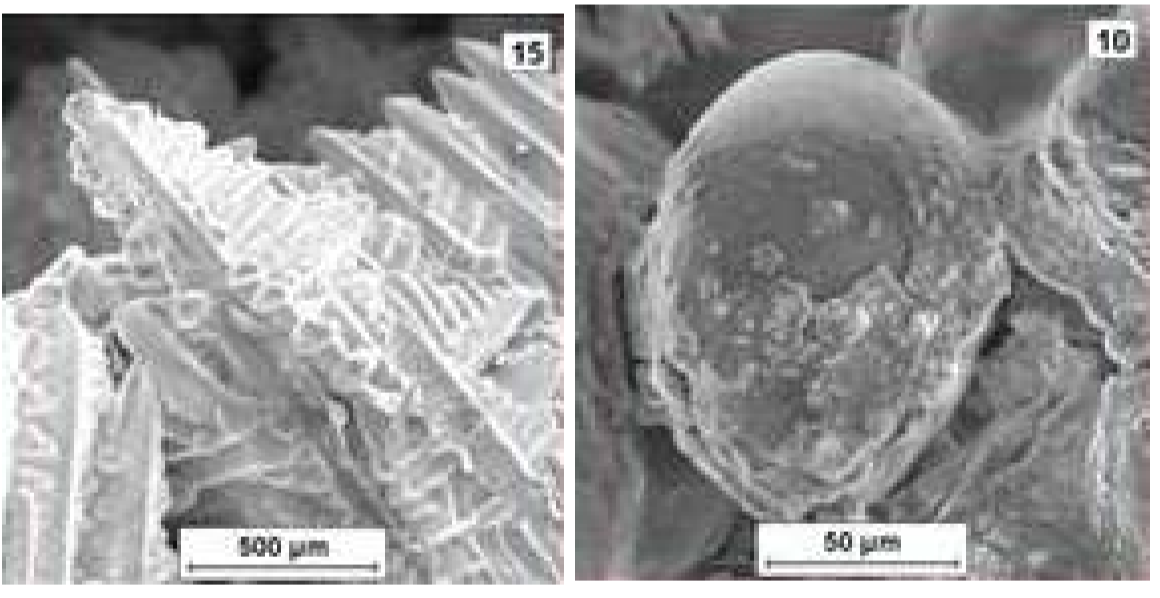
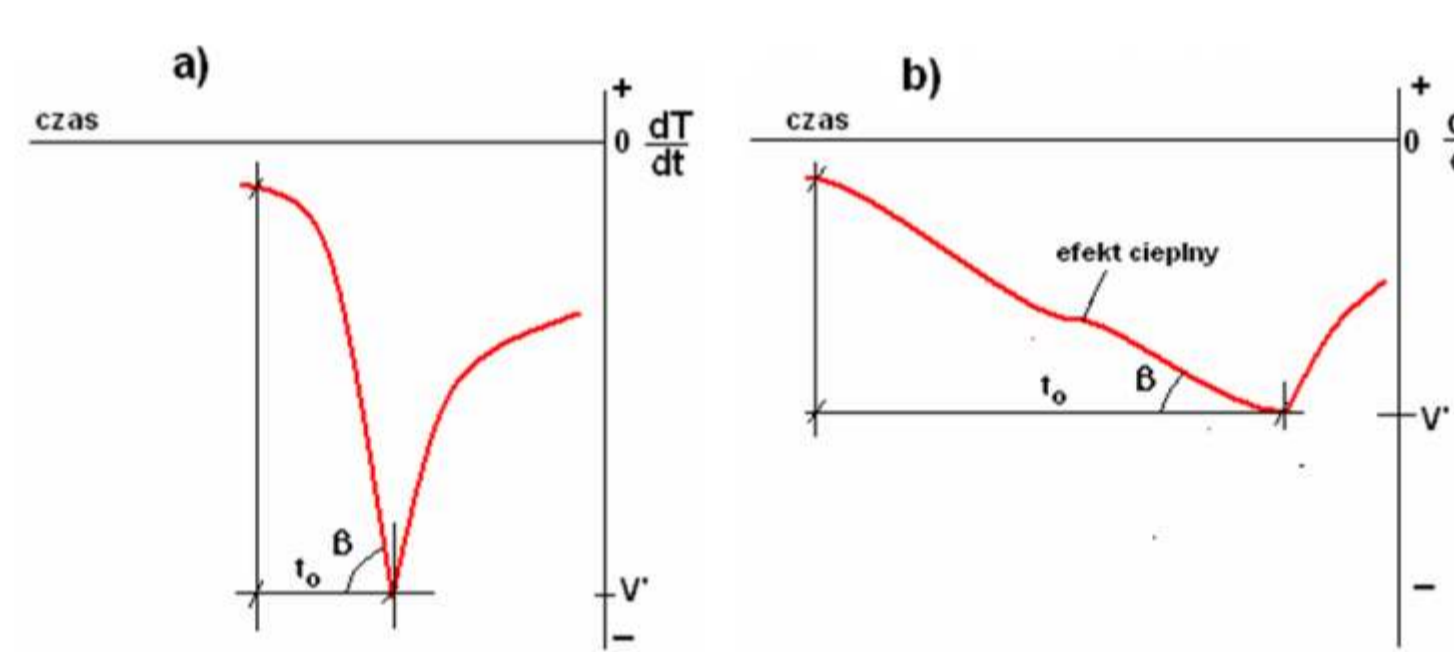
Creep-resistant nickel alloys are the primary material used for cast components of aircraft engines, both static and rotary steering parts, operating at elevated temperatures under the action of mass forces. The requirements imposed on these castings include, among others, high fatigue resistance, creep resistance at high temperature and corrosion resistance in a medium containing products of fuel combustion. The performance properties of these elements depend on the macro- and microstructure formed during solidification and on the presence of non-metallic inclusions, usually precipitated in the last stage of solidification.

During melting, impurities of various types can penetrate the liquid alloy, their source being usually: contaminated charge materials, ceramic material of the crucible, atmosphere in the furnace chamber (e.g. argon contaminated with oxygen), products of reaction taking place between the moulding material and liquid alloy, especially when moulds are poured at high temperature.

The technology of melting nickel alloys in closed melting chamber makes the process of refining, deslagging, etc. impossible. Therefore, any of the above mentioned factors may eventually lead to a contamination of nickel alloys with non-metallic inclusions or gas. Most of the non-metallic inclusions are characterised by low solidification point, which makes them gather ahead of the solidification front and solidify as the last ones in stage III of the solidification process. These processes are related with the liberation of higher or lower amounts of energy (exothermic processes) and therefore can be analysed by an ATD thermal analysis. An analysis of the dT/dt derivative curve showing the rate of temperature drop during this period helps in qualitative evaluation of the consequences of the alloy being contaminated with non-metallic inclusions and gas.

Przebieg pochodnej dT/dt w ostatnim etapie krzepnięcia: a) stop o wysokiej jakości, b) stop o złej jakości

The shape of dT/dt derivative curve in the last stage of solidification: a) high quality alloy, b) low quality alloy



Dendryty pokryte tlenkami w obszarze jam skurczowych we wlewkach wsadowych IN-713C. Dendrites coated with oxides near the shrinkage cavity in a master heat ingot made from the IN-713C alloy

Tytuł rozwiązania innowacyjnego

Title of the innovative solution

Technologia topienia stopów niklu z częściowym lub całkowitym wykorzystaniem odpadów poprodukcyjnych (wadliwe odlewy, elementy układów wylotowych)

Technology of melting nickel alloys with partial or total use of post-production scrap (defective castings, gating system parts)

Krótki opis rozwiązania

Brief description of the solution

Stopów niklu, stosowane na elementy silników lotniczych, nie są jak dotychczas wytwarzane w Polsce. Krajowy przemysł bazuje na imporcie, a wyroby ze stopów niklu odlewa się tylko w kilku odlewniach. Co jest szczególnie istotne, nie prowadzi się również uzdatniania tych przetopów odzyskowych. Odpady poprodukcyjne prawdopodobnie zwracane są do producenta stopów niklu.

Istotnym problemem technicznym i ekonomicznym jest zagospodarowanie odpadów poprodukcyjnych (braki, elementy układów wylotowych itp.). Ponownie użycie stopów wymaga mo e uzupełnienia niektórych dodatków (zwiększa chemizm aktywnych) oraz zabiegu modyfikowania, w celu uzyskania właściwej mikrostruktury. e kilkukrotne przetwarzanie wlewków wsadowych ze stopów niklu nie prowadzi do istotnych zmian składu chemicznego, poza ustalone granice. Tak więc głównym problemem jaki wi e się z tematyką projektu jest zbadanie mo liwo ci ponownego wykorzystania odpadów poprodukcyjnych z wybranych stopów niklu.

Nickel alloys used for aircraft engine components are not yet produced in Poland. Domestic industry is based on import, and the parts made of nickel alloys are cast in only a few foundries. What is particularly important, also the revert scrap remelting processes are not used in Poland. Post-production scrap is likely returned to the nickel alloy manufacturer.

Utilization of post-production scrap (failed castings, gating systems, etc.) is an important technical and economic issue. Reuse of nickel alloys may require to supplement some of the alloying elements (especially chemically active) and application of modification process to refine the alloy. It has been proved that the re-melting of nickel superalloy scrap does not result in significant changes to chemical composition. So the main issue related to the topic of the project is to explore the possibility of re-use of post-production scrap of selected nickel alloys.

W zasadzie prawie wszystkie odlewy (elementy silników lotniczych) wymagają modyfikowania w formie odlewniczej, co zapewnia uzyskanie zaren równosiłowych i ich rozdrobnienie. Jak wykazały badania makrostruktury na powierzchni i na przekroju odlewów, dotychczas stosowany zabieg modyfikowania powierzchniowego nie daje w pełni zadowalających wyników. Efekt poprawnego modyfikowania występuje jedynie w warstwie powierzchniowej, do głębi około 1 mm. Natomiast w obszarach wewnętrznych odlewów obserwuje się niekorzystną strukturę kryształów słupkowych. Dlatego w projekcie przeprowadzono szerokie badania i opracowano technologię, polegającą na jednoczesnym modyfikowaniu powierzchniowym (powłoka modyfikująca) oraz ciowej (ciowej formie) i modyfikowaniu obj. ci ciewemu.

In fact, almost all castings (aircraft engine parts) require a process of modification in the mould to achieve fine equiaxed grain structure. Macrostructure analysis of casting surface and cross-sections show that used process of surface modification does not give fully satisfactory results. The proper effect of modification occurs only in the surface layer to the depth of about 1 mm. Deeper, in internal areas of the casting the structure is comprised of unfavourable columnar grains. Therefore, extensive research was carried out and the new technology of simultaneous surface (modifying coating on internal mould layer) and volume modification was developed.

Graficzna prezentacja rozwiązania innowacyjnego

Visualization of the innovative solution

Wykazano, e ponowne topienie odpadów nie ma istotnego wpływu na zmiany w składzie chemicznym, zwłaszcza takich składników jak: Cr, Al, Ti, Nb i Hf. Skład chemiczny zachowany jest w granicach ustalonych norm, nawet po trzecim przetopie. Potwierdzeniem tego są wyniki badań makro i mikrostruktury oraz walek ciu mechanicznych, a zwłaszcza odporności na wysokotemperaturowe pękanie. Technologia przewiduje ponadto kompleksową modyfikację odlewów, poprzez pozyczenie modyfikowania powierzchniowego i obj. ci ciewemu. Modyfikacja obj. ci ciewemu realizowana jest poprzez umieszczenie w zbiorniku wlewkowym dodatkowego filtra modyfikującego. Dodatkowym pozytywnym efektem zastosowania filtra modyfikującego ciego powinna być podwójna filtracja stopu.

W przypadku odlewu ze stopów niklu, je li powierzchnia filtra ciego zawiera składnik modyfikujący cy, powinien on wpłynąć na strukturę odlewu poprzez modyfikację obj. ci ciewu, a dalsze krzepnięcie w odlewach struktur drobnych ziaren równosiłowych, niemo liwo do uzyskania standardowej modyfikacji powierzchniowej, w której wewnątrz odlewów pozostają ziarna słupkowe obj. ci ciewemu.

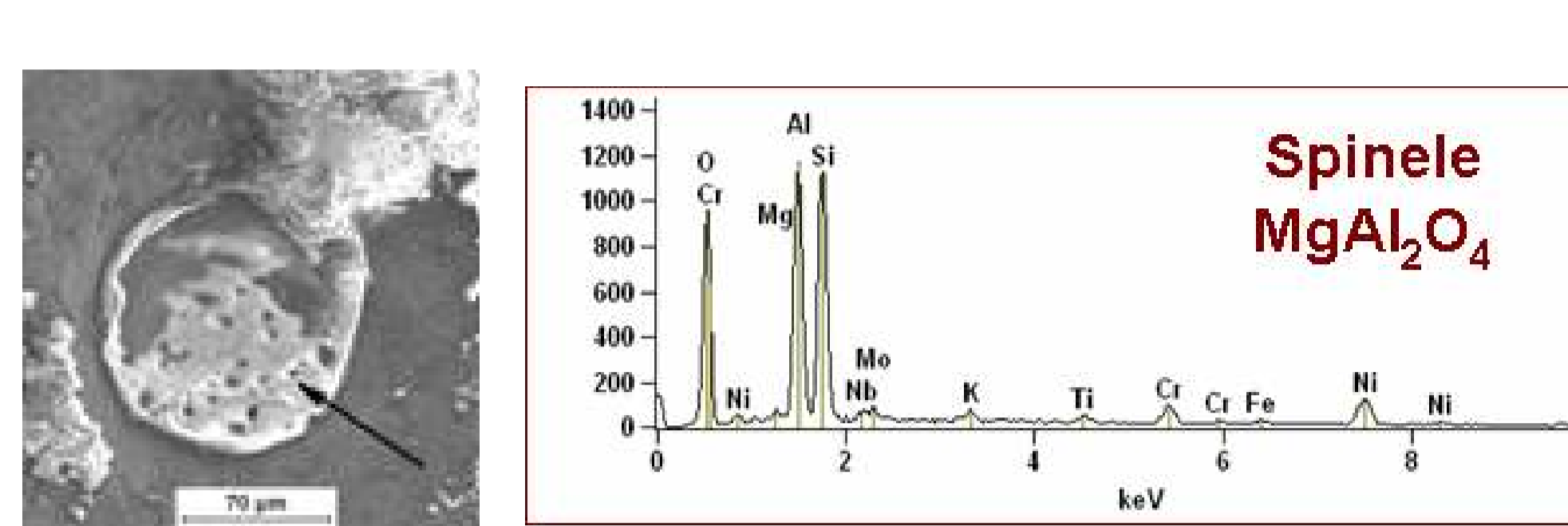
Any filter ceramic may fulfil the role of a surface modifier, provided it contains a modifying element. The proposed technology of remelting the post-production scrap can bring the beneficial effects of surface modification of castings. Volume modification is realized by placing the additional modifying filter in the mould gating system. In addition to modification the modifying filter leads to double filtration of the liquid alloy.

In the case of cast nickel superalloy, if the surface of the filter will be coated with the modifier, it should influence the structure of the casting by modifying the volume of liquid metal in the mould which produce the fine equiaxed grains impossible to achieve using the standard, surface only modification.

To achieve the above mentioned goals the filter must have sufficient mechanical resistance and thermal stability. For the technology of remelting the post-production scrap the new ceramic filter was developed, patented as PI 218437 „A ceramic filter for volume modification of heat resistant cast nickel based and cobalt based alloys”.

Wtrącenia niemetaliczne na powierzchni dendrytów w jamie skurczowej

Non-metallic inclusions on the surface of dendrites in shrinkage cavity



Przekrój osiowy wlewki wsadowego stopu niklu IN-713C. Axial section of the IN-713C nickel alloy master heat ingot

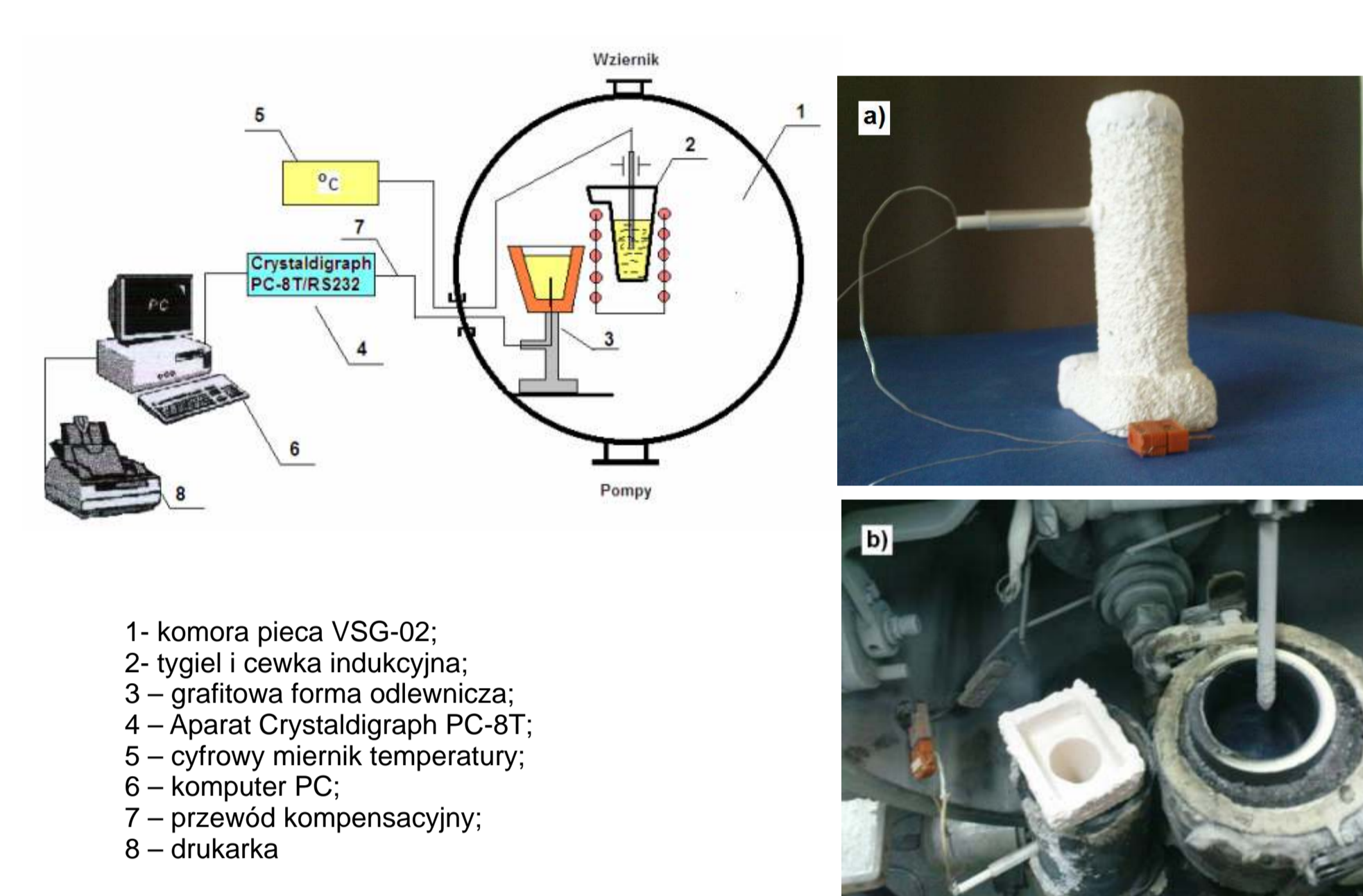
Stanowisko badawcze (Measurement site)

Do badań zaprojektowano odlew w kształcie waleka o wymiarach 30x120 mm, z nadlewem 40x45x17 mm. Obszar pomiaru temperatury zaprojektowano na wysokości 1/3 odlewu (od dołu). Przewody termoelementu Pt-PtRh10 o grubości 0,5 mm osłonięto rurką kwarcową. Próbkę pobraną z tych przekrojów o masie około 1,2 kg przetapiano w indukcyjnym piecu typu VSG-02 (firmy Balzers), w tygliku z Al₂O₃, w którym dokończyli ci stabilność ci parametrów technologicznych uzyskuje się tworzący o wysokiej czystości. Topienie prowadzono w próżni około 10⁻³. Przed zalaniem, przestrzeń pieca przepłukano argonem. Odlewanie dokonano w atmosferze argonu o ciśnieniu około 900 hPa.

The shape of the test casting was a cylinder of 30x120 mm dimensions with a 40x45x17 mm riser. The area of temperature measurement was designed at 1/3 of the casting height (counting from the bottom). The Pt-PtRh10 thermocouple wires 0.5 mm thick were enclosed in a quartz tube. Ceramic moulds adapted for tests were made by the investment process in VSK Rzeszów. Samples taken from these sections weighing about 1.2 kg were remelted in a Balzers VSG-02 induction furnace with an Al₂O₃ crucible in which, owing to the stability of technological parameters, high purity materials were produced. Melting was conducted in a vacuum of about 10⁻³. Before pouring of moulds, the working space of the furnace was flushed with argon. Pouring was carried out in an argon atmosphere at a pressure of about 900 hPa.

Schemat stanowiska pomiarowego

The scheme of measurement site



- komora pieca VSG-02;
- tyglik i cewka indukcyjna;
- grafitowa forma odlewnicza;
- Aparat Crystallograph PC-8T;
- cyfrowy miernik temperatury;
- komputer PC;
- przewód kompensacyjny;
- drukarka

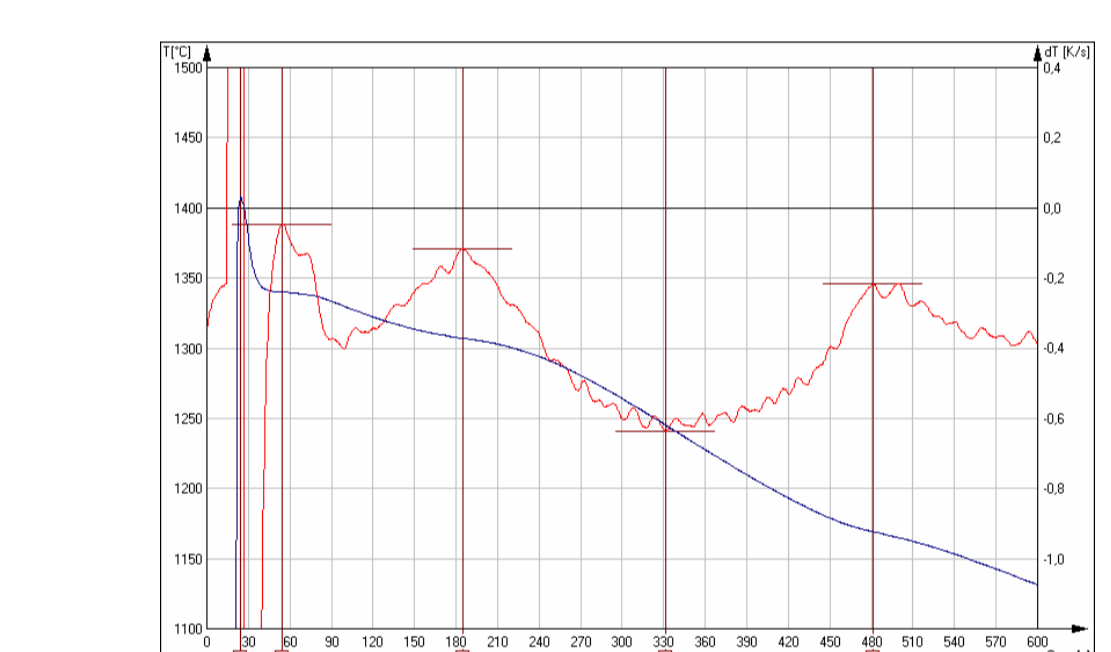
Forma ceramiczna (a) oraz widok komory pieca indukcyjnego Balzersa (b). Ceramic mould (a) and chamber of VSG-02 induction furnace (b)

Możliwość zastosowania w lotnictwie i innych gałęziach gospodarki

Examples of application in aviation and other branches

Przykłady (Example)

Analizy termicznej krzepnięcia ATD poddano wlewkę wsadową „master heat”, dla których stwierdzono różnicę w czasie topienia jako łopatek odlanych w WSK Rzeszów.



Wynik analizy ATD dla odlewu z wlewki wsadowego IN-713C (7V2124)

T_{max} [A] 25 [s] 1408 [°C]
T_{0.1} [B] 55 [s] 1340 [°C]
T_e [C] 185 [s] 1307 [°C]
T_{0.9} [D] 332 [s] 1245 [°C]

T_e - T_{0.1} = 62°C
t_{0.9} - t_{0.1} = 147s



Powierzchnia boczna i górną odlewu. The side surface and the upper of cast

- Przebieg wykresu ATD poprawny. Poprawne wartości temperatury T_{max}, T_e, T_{0.1} i T_{0.9}.
- Czyste powierzchnie nie wskazują na obecność zanieczyszczeń.

Wnioski:

- The ATD graph is correct. The values of temperature T_{max}, T_e, T_{0.1} and T_{0.9} are correct.
- Clean surfaces indicate that no impurities are present.

Technologia topienia i wyniki

Technology melting and results

Technologia przewiduje przetop odpadów poprodukcyjnych i odlewanie do formy z dodatkowym filtrem modyfikującym cym w zbiorniku wlewkowym.

Wytopy prowadzono w indukcyjnym piecu próżniowym typu IS 5/III, firmy Leybold - Heraeus. Przed odaniem do komory wprowadzono argon o ciśnieniu około 400 hPa. Formy podgrzano do temperatury około 1000°C. Temperatura odlewania wynosiła około 1480°C. Porównano odlewy z trzech wytopów:

- Odlew z użyciem wlewków „master heat”
- Odlew z odpadów poprodukcyjnych,
- Odlew z odpadów poprodukcyjnych, z filtrem modyfikującym

Melting was carried out in a vacuum induction furnace, model IS 5/III, made by Leybold - Heraeus, using argon as a protective gas atmosphere

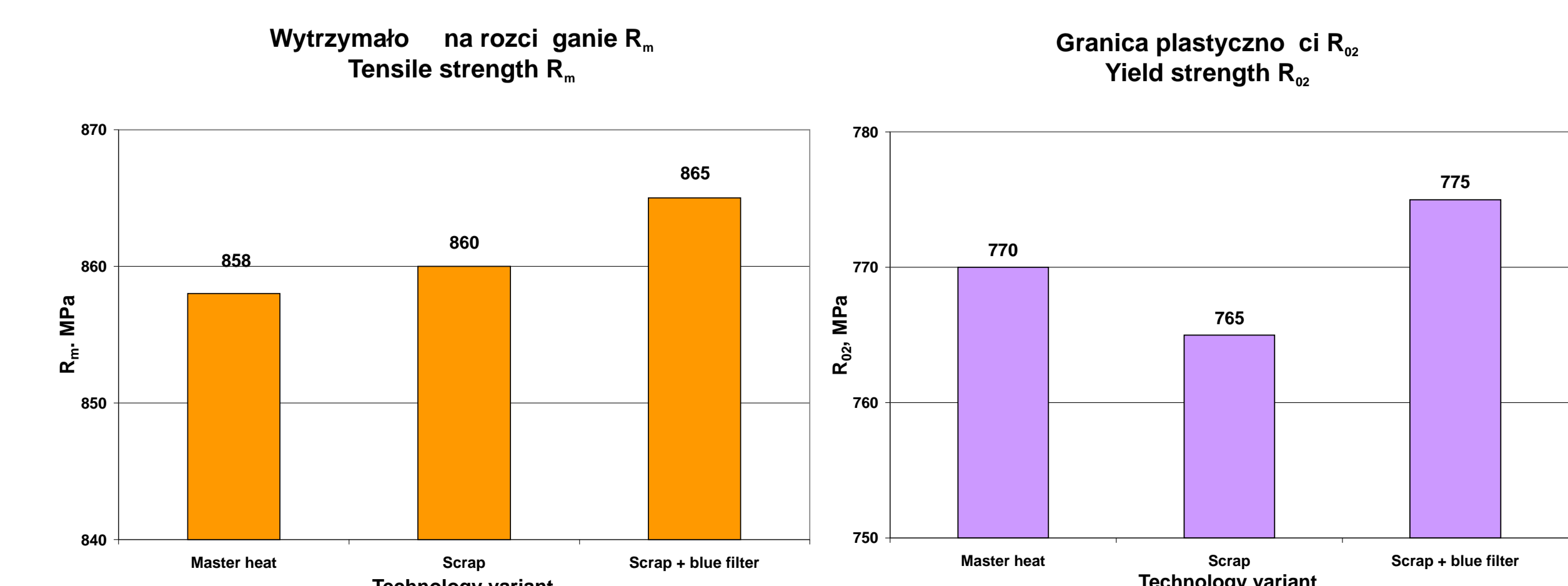
- Castings with use of „master heat” ingots
- Castings with use of post-production scrap
- Castings with use of post-production scrap with modifying filter



Ocieplone formy przygotowane do badań i odlewy. Moulds with insulation ready for tests and castings

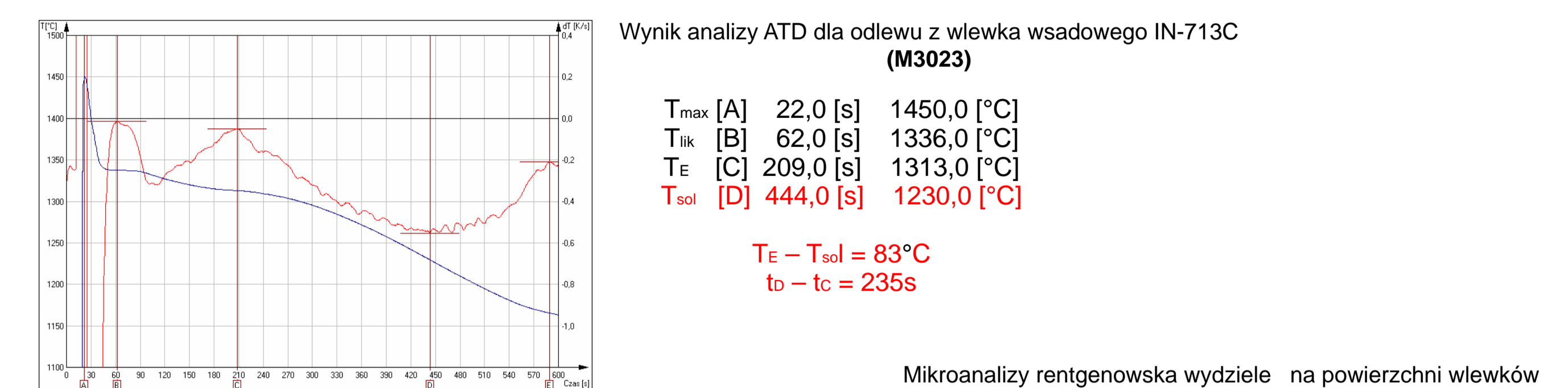
Porównanie właściwości mechanicznych

Comparison of the mechanical properties



Wzrostyła odporność na rozciąganie R_m i odporność na odkształcenie Gr_{0.2} w porównaniu z wlewką „master heat” i odpadami poprodukcyjnymi.

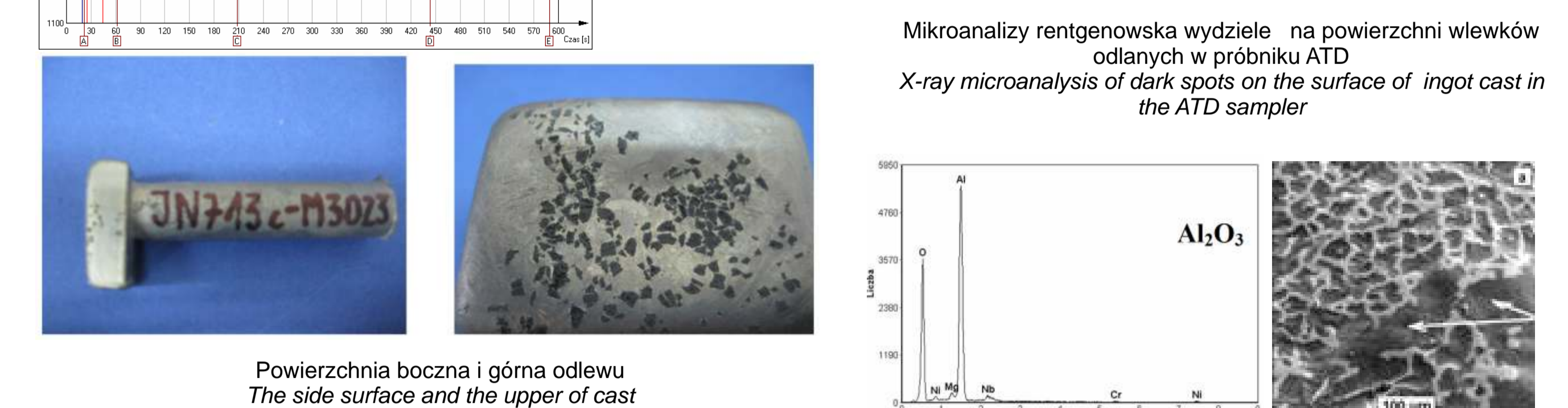
Increased tensile strength R_m and yield strength R_{p0.2} compared to „master heat” and post-production scrap.



Wynik analizy ATD dla odlewu z wlewki wsadowego IN-713C (M3023)

T_{max} [A] 22,0 [s] 1450,0 [°C]
T_{0.1} [B] 62,0 [s] 1336,0 [°C]
T_e [C] 209,0 [s] 1313,0 [°C]
T_{0.9} [D] 444,0 [s] 1230,0 [°C]

T_e - T_{0.1} = 83°C
t_{0.9} - t_{0.1} = 239s



Powierzchnia boczna i górną odlewu. The side surface and the upper of cast

Mikroanaliza rentgenowska wydzielona na powierzchni wlewków odlanych w próbniku ATD. X-ray microanalysis of dark spots on the surface of ingot cast in the ATD sampler

Wnioski:

- Przebieg wykresu ATD wskazuje na mo liwo wydzielania si wtrącenia niemetalicznych, o czym widać w postaci odroczenia kąta stycznej do wykresu ATD w ostatnim etapie krzepnięcia. W tym czasie następuje krzepnięcie ciał stałych i powstanie ci cianych piam (prawdopodobnie wtrącenia). W roku dostarczonego piastka (master heat) była do jama (dziura i porowatość), w której wtrącenia mogłyby być obecne. Wszystkie temperatury charakterystyczne są niższe!

Conclusions:

- The ATD graph indicates the possibility of precipitation of non-metallic inclusion, as evidenced by prolonged time until solidification, the low value of the angle of the derivative curve between the T_e and T_{0.1} solidification range in the third stage widened by 21°C and time longer by 85 s.
- Top and upper side surfaces of castings are covered by a large number of black spots (presumably inclusions). Significant shrinkage cavity and porosities were found inside the supplied „master heat” feed ingot, surfaces of which may have been covered by impurities. All characteristic temperatures are lower than expected!

Zalety i ograniczenia rozwiązania innowacyjnego

Advantages and restrictions of innovative solution

A. Zalety rozwiązania innowacyjnego

The advantages of the innovative solution

- Analiza termiczna ATD mo e byc po ytecznym narz dziem w szybkiej ocenie jako ci metalurgicznej wlewków wsadowych „master heat”, zwłaszcza pod kątem obecności zanieczyszczeń niemetalicznych obecnych w porach i jamach skurczowych.
- Obecność zanieczyszczeń niemetalicznych, tworzących układy eutektyczne, zmienia charakter wykresu ATD przed zakończeniem krzepnięcia (cia stopu).
- Dla standardowych warunków badania w przypadku stopu IN-713C o dobrej jako ci metalurgicznej (mała zawartość zanieczyszczeń) w temperaturze T_{0.9} powyżej 1240°C, różnica temperatur (T_{max} - T_{0.1}) mniejsza od 60°C oraz czas ostatniego etapu krzepnięcia (ci pioni) ej 50s.
- Szczególną zaletą metody ATD jest krótki czas, w jakim mo na uzyskać dane do oceny testowanego materiału i ocenić jako metalurgiczny badanego wlewki wsadowego.

- ATD thermal analysis can be a useful tool for rapid assessment of the metallurgical quality of „master heat” feed ingots, especially for detecting the presence of non-metallic impurities present in pores and shrinkage cavities.
- The presence of non-metallic impurities, forming a eutectic system, changes the shape of the ATD graph in the final stage of the solidification.
- For standard test conditions in the case of alloy IN-713C good metallurgical quality (low content of impurities) is indicated by T_{0.9} value above the 1240°C, the temperature difference (T_{max} - T_{0.1}) lower than 60°C and the time of the final stage of solidification shorter than 50 s.
- A particular advantage of the ATD method is a short data acquisition time.

B. Korzyści z wdrożenia (w tym ekonomiczne)

The benefits of implementation (including economic)

- Ocena jako ci metalu z nadstopów niklu i kobaltu, pozwala eliminować z produkcji wlewków wsadowych o złej jako ci, co zdecydowanie przyniesie efekty ekonomiczne.
- Eliminacja wtyków nietrafionych.
- Przykładem innych stopów metalu (stopu elaza i metalu nie elaznych) analiza ATD pozwala ocenić jako metalu i przeprowadzić niezbędne korekty w procesie metalurgicznym.

- Assessment of metallurgical quality of nickel based superalloys feed ingots enables the elimination of low quality ingots which will definitely have the positive economic effects.
- Quality assessment of feed ingots can potentially eliminate the defective castings from production.
- In case of different alloys of ferrous and non-ferrous metals the ATD analysis provides the means to evaluate the quality of liquid metal and make the necessary adjustments in metallurgical process.

C. Obszar potencjalnych zastosowań - przykłady

The area of potential application - examples

- Ocena jako ci metalurgicznej ciekłych stopów metali, w szczególności ci wlewków wsadowych ze stopów niklu, stopów elaza (elwo, stalwo) oraz metali nie elaznych.
- Wyznaczenie parametrów krzepnięcia z stopów odlewniczych, jak T_{max}, T_{0.1}, T_e i inne, np. różnicę spadku temperatury w określonych zakresach temperatury.

- Evaluation of the quality of liquid alloys, in particular the feed ingots of nickel based superalloys, ferrous alloys (cast iron and cast steel) and various non-ferrous alloys.
- Determination of solidification parameters for cast alloys, like T_{max}, T_{0.1}, T_e and, for example, temperature drop rate in certain temperature ranges.

D. Ograniczenia (je li występują) w zastosowaniu rozwiązania

Restrictions (if any) in implementation

- W przypadku stopów niklu konieczność prowadzenia wytopów w indukcyjnym piecu próżniowym, co wymaga instalacji małego, próżniowego pieca indukcyjnego o pojemności tygla około 0,5 litra.
- W przypadku stopów elaza i metalu nie elaznych konieczność instalacji małego, próżniowego pieca indukcyjnego o pojemności tygla około 0,5 litra.

- In case of nickel superalloys there is the need of melting using vacuum induction method which requires the installation of a small, vacuum induction furnace with crucible capacity of about 0.5 dm³.

Podsumowanie (Conclusions)

- Nie stwierdzono istotnych zmian w zawartości najważniejszych składników stopu. Nawet po czwartym przetopie zawartość składników (głównie Cr, Al, Ti, Mo i Nb) nie odbiega zasadniczo od składu ciewego wlewki „master heat”.
- There were no significant changes in chemical composition of the alloy. Even after the fourth melting the content of alloying elements (mainly Cr, Al, Ti, Mo) do not differ significantly from the composition of primary „master heat” ingot.
- Zastosowanie dodatkowego filtra modyfikującego cego w zbiorniku wlewkowym formy wpływa nawet na podwyższenie tych właściwości. Mo e by to spowodowane efektem dodatkowej filtracji zanieczyszczeń niemetalicznych. Użycie dodatkowego filtra w systemie ciewym pozytywnie wpływa na te właściwości. To mo e byc efektem dodatkowej filtracji zanieczyszczeń niemetalicznych.
- Use of additional modifying filter in the gating system positively influence these properties. This may be the effect of additional filtration of non-metallic impurities.

- Odlew z odpadów poprodukcyjnych pod względem najniższych walek ciu ciewemu (nie odbiegając od odlewów uzyskanych z wlewków „master heat”). Castings with use of post-production scrap, does not differ, in most important properties, in comparison to the castings using with „master heat” ingots.

Zalety i ograniczenia rozwiązania innowacyjnego

Advantages and restrictions of innovative solution

A. Zalety rozwiązania innowacyjnego

The advantages of the innovative solution

- Nie stwierdzono istotnej różnicy w składzie chemicznym walek ciewego i odpadów poprodukcyjnych, zwłaszcza dla takich składników, jak: Al, Ti, Mo i Nb (w granicach normy).
- Przeprowadzone eksperymenty odlewania łopatek ze stopu IN-713C wskazywały, e modyfikacja tylko obj. ci ciewemu sprzyja powstawaniu struktury gruboziarnistej, natomiast jednoczesna (kompleksowa) modyfikacja obj. ci ciewemu i powierzchniowej (powłoka modyfikująca) korzystnie na kształtowanie struktury drobnoziarnistej.
- Stwierdzono korzystny wpływ dodatkowej filtracji jako powierzchniowej i wewnątrz w odlewach łopatek (badania fluorescencyjne i RTG).
- Stwierdzono niekorzystny wpływ na efekt modyfikacji obj. ci ciewemu w kształcie masy ciekłego metalu, w stosunku do czynnej powierzchni filtra oraz wysokiej (koniecznej) w przypadku łopatek) temperatury odlewania.
- There was no significant differences in the chemical composition of the starting feed and post-production scrap, especially for these elements: Al, Ti, Mo and Cr (within normal limits).
- Experimental castings of turbine blades made of IN-713C indicate that the volume only modification favours formation of coarse grained structure, while the simultaneous volume and surface (complex) modification leads to formation of the fine grained structure.
- Additional filtration has a positive influence on surface quality and lowers the chance of internal defects in turbine blade castings (fluorescent penetrant inspection and RTG).
- Higher mass of liquid metal relative to the active surface of the filter and high pouring temperature (necessary in the case of the turbine blades casting) negatively influences the effectiveness of modification process.

B. Korzyści z wdrożenia (w tym ekonomiczne)

The benefits of implementation (including economic)

- Opracowanie technologii odzyskowego przetwarzania odpadów poprodukcyjnych i wydanie wymiennie korzyści ekonomiczne. Cena tworzący komercyjnego (wlewków wsadowych) jest znacznie wyższa od ceny odpadów. Dla usprawnienia procesu topienia odpady należałoby wykonać przetop i odlać wlewkę o danej masie (wcale mo ci od masy odlewów w formie ceramicznej). The proposed technology of remelting the post-production scrap can bring the beneficial effects of surface modification of castings. Volume modification is realized by placing the additional modifying filter in the mould gating system. In order to improve the remelting process the scrap must first be melted and cast into ingots of the desired mass (depending on the mass of castings).

C. Obszar potencjalnych zastosowań - przykłady

The area of potential application - examples

- aroodpome i arozytrzymale odlewy ze stopów niklu (elementy turbin lotniczych i parowych). Heat and creep resistant nickel alloys castings (parts of aircraft engine turbines and steam turbines).

D. Ograniczenia (je li występują) w zastosowaniu rozwiązania

Restrictions (if any) in implementation

- Przeszkody licencyjne! Konieczność przetapiania odpadów i odlewania wlewków wsadowych w określonej masie. Wymaga wykorzystania próżniowego pieca indukcyjnego. License obstacles! The need to melt the scrap into ingots of specific mass. The need to use the vacuum induction melting.