

Konwersja technologiczna stopów niklu pracujących w ekstremalnych warunkach

Technological conversion of Ni-based superalloys working in extreme conditions

Marcin Latało-Anulewicz^{1*}

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

*Corresponding author: marcin.latallo@iod.krakow.pl

Received: 04.04.2018. Accepted in revised form: 30.11.2018.

© 2018 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/iod.2018.16

Streszczenie

Istotą procesu konwersji w obszarze przemysłu metalowego jest wprowadzenie innowacyjnych pod względem materiałowym i technologicznym odlewanych komponentów w produkowanych maszynach i urządzeniach w miejsce tradycyjnych elementów kutych, spawanych, często wytwarzanych drogą obróbki mechanicznej, łączonych mechanicznie w bardziej złożone komponenty. Powszechnie wiadomo, że technologii odlewania, w przeciwieństwie do innych wymienionych powyżej technik formowania metalu, pozwalają nadać metalowi dowolny i nieraz najbardziej skomplikowany kształt – co daje możliwość wykonania odlewów zintegrowanych – niezbędnych elementów nowoczesnych maszyn i urządzeń. Powszechnie stosowane elementy metalowe wykonane technikami kucia czy też tłoczenia są zazwyczaj łączone (integrowane) dzięki stosowaniu technik spawania lub innych technik łączenia metali. Oznacza to niemal w każdym przypadku znaczną masę całego elementu, mniejszą jego sztywność, niską odporność na pracę w warunkach wysokiej temperatury, zmieniających się obciążań, a także niższą odporność na zużycie ściernie. Z pomocą w tym przypadku przychodzą technologie odlewnicze, które mają do dyspozycji lekkie, wytrzymałe, odporne na wysokie temperatury i zmęczenie cieplne różnego rodzaju stopy odlewnicze. Jednocześnie przy wykorzystaniu nowoczesnych technik formowania jest możliwe tworzenie odlewów o bardzo złożonych i skomplikowanych kształtach, które jako jeden zintegrowany element w urządzeniu jest w stanie zastąpić kompleks innych elementów metalowych połączonych różnymi technikami. Takie rozwiązanie zapewni optymalizację właściwości użytkowych końcowego urządzenia. Naturalnym, oczywistym i zasadnym jest, że nie każdy metalowy element konstrukcyjny maszyny czy urządzenia powinien

Abstract

The essence of the conversion process is the introduction of innovative in terms of materials and technology of cast parts, as components of manufactured machines and equipment in place of the traditional elements forged, welded, mechanically assembled parts. It is well known that the technology of casting, in contrast to other metal forming, mentioned above techniques will make it possible to give to metal even the most complicated shape – which gives the possibility to make integrated castings – essential elements of modern machines and equipment. Commonly used metal elements made by forging techniques have to be integrated by the use of welding techniques, or other metal joining techniques. This means that in almost every case a significant increase in weight of the entire item, low resistance to work in high temperature conditions, lower abrasion resistance. With the help to solve that case there are foundry technologies that are at the disposal of lightweight, durable, resistant to high temperatures and thermal fatigue different types of metal material. At the same time using modern molding techniques it is possible to create an integrated casting component, which, as an element of the device is able to replace complex combined different techniques other metal parts. This will ensure the optimization of the performance of the final device. It is natural and obvious that not every piece of metal construction machine or equipment will be possible to replace by an integrated casting part. Therefore, the performing of conversion process should be preceded by a detailed study, research and application-oriented process towards the technical and economic viability of such a conversion. The current level of technology allows the realization of the conversion of cast metal components essential for construction machinery used in agriculture,

być zastępowany zintegrowanym elementem odlewany. Toteż wykonanie konwersji powinno zostać poprzedzone szczegółowym procesem badawczo-aplikacyjnym ukierunkowanym na techniczną i ekonomiczną opłacalność takiej konwersji. Obecny poziom techniki odlewniczej pozwala na realizację konwersji odlewanych metalowych komponentów istotnych dla budowy maszyn stosowanych w rolnictwie, budownictwie, energetyce i eksploatacji bogactw naturalnych.

Słowa kluczowe: konwersja materiałowo-technologiczna, nadstopy niklu

1. Analiza potencjału rynkowego dla konwersji technologicznej nadstopów niklu

Kluczowym procesem zapewniającym osiągnięcie przewagi konkurencyjnej technologii odlewania nadstopów niklu na rynku jest konwersja materiałowo-technologiczna. Odlewy ze stopów niklu mogą służyć, jako elementy konstrukcyjne maszyn i urządzeń pracujących w szczególnie trudnych, ekstremalnych warunkach (np. wysokie i niskie temperatury, środowiska agresywne, długotrwała eksploatacja w zmiennym polu naprężeń i temperatury). Wyprodukowane z wykorzystaniem technologii odlewniczej stopy niklu w wysokiej temperaturze wykazują często wyższe parametry eksploatacyjne, niż ich odpowiedniki wykonane drogą przeróbki plastycznej. Przykładowo stopy niklu H282 i IN740 wykonane techniką odlewniczą posiadają lepsze właściwości wytrzymałościowe od stopów walcowanych w temperaturze pracy odpowiednio powyżej 900°C i 850°C.

Parametry eksploatacyjne odpowiednio dobranych stopów niklu, m.in. żaroodporność, żarowytrzymałość, odporność korozyjna czy szczególne właściwości fizyczne pozwalają na zastosowanie wspomnianej wyżej konwersji materiałowo-technologicznej w dwóch wymiarach:

- konwersja elementów produkowanych ze stopów niklu z wytwarzanych drogą przeróbki plastycznej, na wykonane z zastosowaniem technologii odlewniczej;
- konwersja elementów pracujących w ekstremalnych warunkach, produkowanych zwykle ze stali wysokostopowej na elementy odlewane wykonane ze stopów niklu.

Z uwagi na fakt, że Instytut Odlewnictwa posiada rozeznanie wśród zakładów odlewniczych w Polsce, które będą w stanie podjąć się produkcji odlewów ze stopów niklu, bardziej istotne dla ewaluacji niniejszego przedsięwzięcia jest ocena chłonności rynku i oszacowanie popytu na stopy niklu. Decyzje, co do rozpoczęcia takiej produkcji, zanim zostaną podjęte przez kierownictwo odlewni, są uwarunkowane ekonomicznie

construction, power generation and exploitation of natural resources.

Keywords: technological conversion, nickel superalloys

1. Analysis of market potential for technological conversion of nickel superalloys

The key process ensuring the competitive advantage of the nickel super alloys casting technology on the market is material and technological conversion. Castings from nickel alloys can be used as structural elements of machines and devices operating in particularly difficult, extreme conditions (e.g. high and low temperatures, aggressive environments, long-term operation in a variable field of stress and temperature). The nickel alloys produced with the use of casting technology at high temperature often show higher performance parameters than their counterparts made by plastic forming. For example, nickel alloys H282 and IN740 made by foundry technique have better strength properties than rolled alloys at operating temperatures above 900°C and 850°C, respectively.

Operational parameters of appropriately selected nickel alloys, e.g. heat resistance, corrosion resistance, or special physical properties allow for the use of the aforementioned material and technology conversion in two dimensions:

- conversion of elements manufactured from nickel alloys made by plastic forming, into those made by using casting technology;
- conversion of components working in extreme conditions, usually made of high-alloyed steel for cast elements made of nickel alloys.

Owing to the fact, that Foundry Research Institute has an insight into foundry entities in Poland, with a potential to undertake the production of nickel alloys, it is more important to evaluate the market assessment and to estimate the demand for nickel alloys. Decisions regarding the commencement of such production, before they are taken up by foundry management, are economically conditioned, and will result from the estimation of the potential of recipients for these products.

The presented below analysis of market potential for nickel superalloys is based on the reports of American Foundry Society – AFS [1]. These reports contain fore-

i wynikać będą z oszacowania potencjału odbiorców dla tych wyrobów.

Przedstawiona poniżej analiza potencjału rynkowego dla nadstopów niklu została wykonana w oparciu o raport Amerykańskiego Stowarzyszenia Odlewnictwa (*American Foundry Society – AFS*) [1]. Raporty te zawierają prognozy sprzedaży odlewów do roku 2024 w podziale na gatunki odlewanych metali oraz poszczególne produkty przypisane symbolom wg klasyfikacji *NAICS*.

Globalna produkcja odlewów wykazuje tendencje wzrostową na przestrzeni ostatnich lat. Od czasów kryzysu w 2009, który spowodował gwałtowny spadek produkcji odlewów, produkcja ta wzrosła o 30%, natomiast w stosunku do 2000 o 60%. W roku 2012 poziom produkcji przekroczył próg 100 mln ton i średnio zwiększa się o 3,5–4% rocznie. Pozycję lidera na światowym rynku odlewniczym od lat umacniają Chiny. W 2016 r. udział ich produkcji w skali globalnej wynosi 44%. Drugim światowym producentem odlewów są Stany Zjednoczone z ponad 10% udziałem w globalnej produkcji odlewów. Kraje Unii Europejskiej łącznie produkują ok. 13% globalnej produkcji odlewów. Udział Polski w globalnej produkcji odlewów pozostaje na tym samym poziomie od 2012 r. i wynosi 1%. Tempo produkcji odlewów w Polsce odpowiada trendom światowym i również wykazuje tendencje wzrostowe.

W tabeli 1 przedstawiono wykaz elementów, wytypowanych w ramach zadania 1, w których stosuje się bądź jest możliwe w drodze konwersji zastosowanie nadstopów niklu.

casts for the sale of castings until 2024, divided by the types cast metals and individual products assigned to symbols according to the *NAICS* classification.

Global production of castings shows a growing trend in recent years. Since the crisis in 2009, which caused a sharp drop in the production of castings, this production increased by 30%, and compared to 2000 by 60%. In 2012, the production level exceeded the threshold of 100 million tones and average increases by 3.5–4% per year. The position of the leader in the global foundry market is being hold by China, which has been strengthening for years. In 2016, the share of their production on a global scale is 44%. The second global producer of castings is United States with over 10% share in the global production of castings. The European Union countries together produce about 13% of the global production of castings. Poland's share in the global production of castings remains at the same level since 2012 and amounts to 1%. The production rate of castings in Poland corresponds to global trends and also shows the growing trend.

The Table 1 shows the list of components in which nickel superalloys are used or it is possible to use them through the conversion process.

Tabela 1. Prognozy rozwojowe w zakresie produkcji elementów maszyn i urządzeń, gdzie potencjalnie mogą być zastosowane stopy niklu

Table 1. Forecasts for the production of machine and equipment components, where nickel alloys can be potentially used

Lp./ No.	Nazwa elementu / Name of element	Krótkoterminowe średnioroczne tempo wzrostu na lata 2015–2018, % / Short-term annual average growth rate [%] for the years 2015–2018	Długoterminowe średnioroczne tempo wzrostu na lata 2018–2024, % / Long-term annual average growth rate [%] for the years 2018–2024
1.	Kotły energetyczne, wymienniki ciepła / Power boilers, heat exchangers	4,5	14,0
2.	Zawory metalowe / Metal valves	2,5	3,9
3.	Zawory przemysłowe / Industrial valves	4,0	6,2
4.	Łączą instalacji przemysłowych / Connectors of industrial installations	1,0	1,0
5.	Wentylatory, elementy ogrzewania, klimatyzacji, chłodnictwo przemysłowe / Fans, elements of heating, air conditioning, industrial refrigeration	2,5	3,0
6.	Wentylatory przemysłowe / Industrial fans	0,9	3,5
7.	Urządzenia grzewcze / Heating devices	1,5	5,3
8.	Maszyny i urządzenia do obróbki metali / Machines and devices for metal treatment	4,4	8,0
9.	Pompy przemysłowe / Industrial pumps	8,3	19,7
Średnia ważona / Weighted average		3,28	7,18

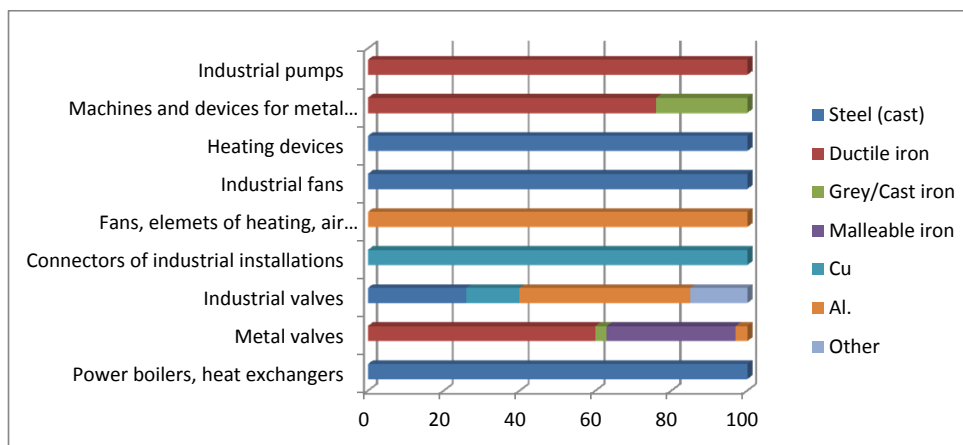
Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych statystycznych *American Foundry Society* [1] / Source: Own elaboration based on [1]

Dla wymienionych elementów określono krótko- i długoterminowe średnioroczne tempo wzrostu produkcji. Na tej podstawie określono średnie ważone krótko- i długoterminowe tempo wzrostu, które posłużą do dalszych analiz zyskowności, płynności oraz opłacalności inwestycyjnej wdrożenia produkcji nadstopów niklu w warunkach polskiej odlewni.

Udział poszczególnych tworzyw stanowiących materiał konstrukcyjny do wytypowanych elementów przedstawia poniższy wykres (rys. 1).

The average of annual short- and long-term growth rate of production was set up for the mentioned above elements. On this basis the weighted average for short- and long-term growth rates were determined, which will be used for further analyzes of profitability, liquidity and the profitability of investment of implementation of the production of nickel based superalloys in the conditions related to Polish foundry entity.

The contribution of each material type forming the construction material for selected elements is presented on Figure 1.



Źródło: Opracowanie własne [1] /
Source: Own elaboration based on [1]

Rys. 1. Udział poszczególnych tworzyw stanowiących elementy konstrukcyjne w kontekście prognoz produkcji
Fig. 1. The contribution of material types for construction elements in the context of their production forecast

Jak widać z powyższego wykresu (rys. 1), główne tworzywa stosowane w produkcji elementów, które mogą być zastąpione przez nadstopy niklu, to przede wszystkim staliwo, żeliwo sferoidalne, aluminium, miedź. Wymienione gatunki stanowią bazę dla procesu konwersji materiałowo-technologicznej na nadstopy niklu, ze względu na właściwości i parametry wytrzymałościowe, odporność, udarność itp.

Badania podstawowe wykazały, że stopy niklu charakteryzują się znacznie większą wytrzymałością i odpornością na pracę w ekstremalnych, agresywnych środowiskach. Trwałość eksploatacyjna materiału wykonanego z nadstopu niklu jest ponad 6-krotnie dłuższa niż z wysokojakościowego staliwa wysokostopowego, żaroodpornego i żarowytrzymałego i ponad 10-krotnie wyższa w porównaniu do wysokojakościowego żeliwa sferoidalnego. Pomimo zatem wysokiej ceny i stosunkowo niewielkiego uzysku nadstopy niklu mogą stanowić alternatywę zarówno w ujęciu technologicznym, jak i ekonomicznym w porównaniu z dotychczas stosowanymi tworzywami. Wynika to nie tylko z większej trwałości eksploatacyjnej, ale też z możliwości znacznego ograniczenia kosztów przestojów produkcyjnych u odbiorcy końcowego, spowodowanych wymianą wyeksploatowanych elementów. Przykładowo koszty wynikające z prze-

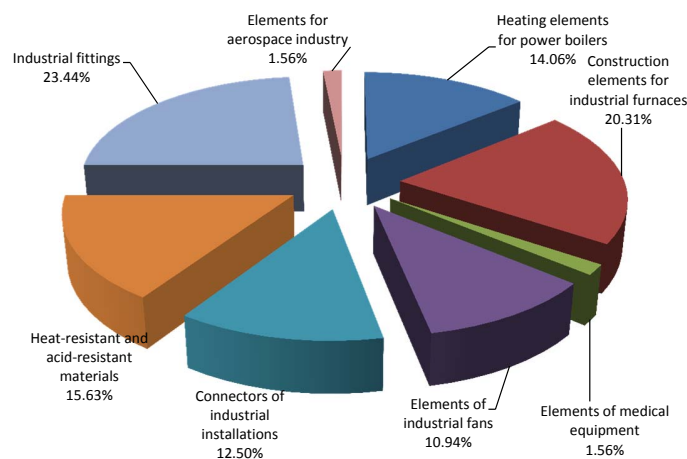
As shown on Figure 1 the main material types used in the production of components in which nickel superalloys can be used instead are primarily cast steel, ductile iron, aluminum, copper. The mentioned materials remains the basis for the material and technological conversion process for nickel superalloys, due to their properties of strength parameters, resistance, toughness, etc.

Basic research has shown that nickel alloys are characterized by significantly higher strength and resistance to work in extreme, aggressive environments. The service-life of material made of nickel superalloy is more than 6 times longer than from high-quality, high-alloy, heat-resistant and heat-resistant cast steel and over 10 times higher compared to high-quality ductile iron. Despite the high price and relatively low yield, nickel superalloys can be an alternative in both technological and economic terms compared to the previously used materials. This is due not only to increased operational durability, but also to the possibility of significantly reducing the cost of production stoppages at the final customer, caused by the replacement of worn-out components. For example, the costs resulting from the mining harvester's downtime caused by the replacement of worn-out components are amount to approximately 10 million PLN annually.

stoju kombajnu górniczego, spowodowanego wymianą zużytych elementów wynoszą w stosunku rocznym ok. 10 mln zł.

2. Analiza potencjału krajowego rynku odbiorców odlewów z nadstopów niklu

Poniższy wykres (rys. 2) prezentuje strukturę wyrobów produkowanych przez wytypowane przedsiębiorstwa. Zastosowane nazewnictwo w dużej mierze opiera się na symbolach *NAICS* stosowanych w statystyce amerykańskiej. W przeciwieństwie do tendencji globalnych nie uwzględniono w niniejszej analizie producentów i zapotrzebowania na stopy niklu w przemyśle lotniczym. Wynika to z faktu, że takie dane są trudno dostępne, obciążone klauzulami tajności, a proces wdrożenia wymaga spełnienia wielu norm i przeprowadzania specyficznych badań, znajdujących się poza profilem kompetencyjnym Instytutu Odlewnictwa.



Źródło: Opracowanie własne [1] /
Source: Own elaboration based on [1]

Rys. 2. Udział poszczególnych wyrobów wg reprezentatywnej grupy potencjalnych odbiorców
Fig. 2. The contribution of individual products according to a representative group of potential customers

Podobnie jak w skali globalnej, największy udział tworzyw stosowanych w produkcji wskazanych na wykresie elementów ma staliwo wysokostopowe, żaroodporne, kwasoodporne, a także wysokiej jakości żeliwo sferoidalne. Struktura ta stwarza potencjał dla skutecznego mechanizmu konwersji ze względu na wskazane wyżej właściwości wytrzymałościowe nadstopów niklu.

3. Proces konwersji w ujęciu badawczo-technicznym

Dobór i selekcja tych tworzyw do różnego rodzaju maszyn i ich elementów konstrukcyjnych powinna być przedmiotem szczegółowych badań aplikacyjnych (z zastosowaniem m.in. zasady *Simultaneous Engi-*

2. Analysis of potential of domestic market customers for nickel superalloys

Figure 2 presents the structure of products manufactured by selected companies. The nomenclature used is largely based on the *NAICS* symbols used in American statistics. In contrast to global trends, manufacturers and demand for nickel alloys in the aviation industry are not included in this analysis. This is due to the fact that such data is difficult to access, encumbered with secrecy, and the implementation process requires meeting a number of standards and carrying out specific tests that are outside the competence profile of the Foundry Research Institute.

Similarly to the global scale, the highest share of materials used in the production of the elements indicated in the above figure is steel – highly-alloyed, heat-resistant, and acid-resistant, as well as high-quality ductile iron. This structure creates the potential for an effective conversion mechanism due to the above-indicated strength properties of nickel superalloys.

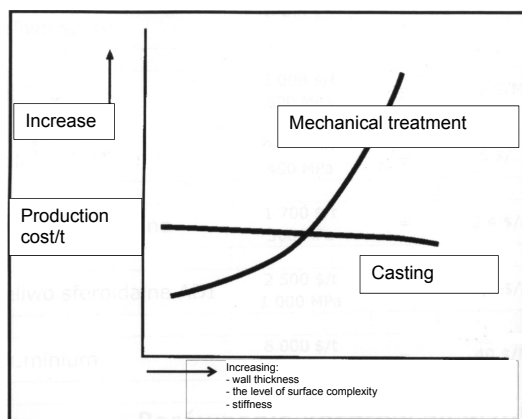
3. The conversion process in terms of research and technology

The selection of these materials for various types of machines and their structural components should be the subject of detailed application tests (with the application of *Simultaneous Engineering* method). The

neering). Zaproponowany tutaj mechanizm konwersji stanowi także inspirację dla kadr naukowo-technicznych w branży odlewniczej do konstruowania coraz to nowszych, bardziej innowacyjnych, zapewniających wyższe parametry wytrzymałościowe i eksploatacyjne tworzyw odlewniczych. **Znaczącym czynnikiem realizacji i powodzenia procesu konwersji jest współpraca ze służbami serwisowymi, marketingowymi, projektantami i konstruktorami maszyn i urządzeń, ekonomistami oraz technologami z branży odlewniczej.** W efekcie takiej konwersji, jak również opisaną ścisłej współpracy, mogą powstać nowoczesne zintegrowane konstrukcje odlewane, które jako istotne komponenty maszyn i urządzeń przyczynią się do wzrostu ich innowacyjności i konkurencyjności. Mechanizm analityczny powinien obejmować następujące elementy:

- reklamacje zgłaszane do służb utrzymania ruchu i serwisów przez użytkowników maszyn i urządzeń;
- cykl życia i konieczność wymiany komponentów na skutek normalnego zużycia;
- awaryjność i objawy przedwczesnego zużycia;
- innych oczekiwań i wymagań odbiorców i użytkowników (np. zmniejszenia masy elementu składowego urządzenia).

Argumentami przemawiającymi za szerszym zastosowaniem odlewów w maszynach i urządzeniach są korzyści techniczne (kształt, masa, własności użytkowe) i ekonomiczne (niższy techniczny koszt wytworzenia elementu odlewane w porównaniu do kosztu wytworzenia tego samego elementu za pomocą innych technik wytwarzania i obróbki mechanicznej). **Rysunek 3** przedstawia kształtowanie się technicznego kosztu wytworzenia odlewu i tożsamego elementu wykonanego techniką obróbki mechanicznej.



Rys. 3. Schemat ogólne porównania kosztów elementu odlewniczego i wykonanego przez obróbkę mechaniczną
 Fig. 3. General scheme of the comparison of the costs of cast element and element made by machining

conversion mechanism proposed in the following article is also an inspiration for scientific and technical staff in the foundry industry to construct newer, more innovative, providing higher strength and exploitation parameters of foundry materials. **A significant factor in the implementation and success of the conversion process lies upon the cooperation with maintenance, service&repair departments, marketing, draftsmen, and constructors of machines and devices, as well as economists and technologists from foundry industry.** As a result of this conversion, as well as the above-mentioned close cooperation, modern integrated cast structures can be created, which as extraordinary components of machines and devices will contribute to the growth of their innovation and competitiveness. The analytical mechanism should include the following elements:

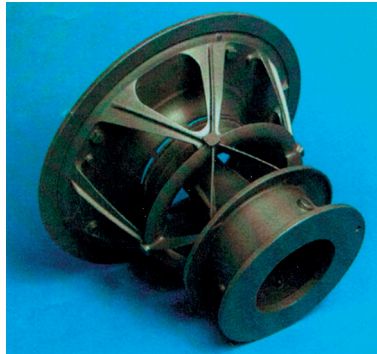
- complaints reported to the maintenance and service&repairs by users of machines and devices;
- the life cycle and the need to replace components due their normal consumption;
- failure rates and symptoms of premature consumption;
- other expectations and requirements of recipients and users (e.g. reducing the mass of the device component).

The arguments for the wider use of castings in machines and devices are technical benefits (shape, mass, useful properties) and economic (lower technical cost of manufacturing a cast element, when compared to the cost of manufacturing the same element using other manufacturing and machining techniques). **Figure 3** shows the development of the technical cost of manufacturing a casting and the identical element made by mechanical machining.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych Przemysłowego Instytutu Maszyn Rolniczych (PIMR) /
 Source: Own elaboration based on Industrial Institute of Agricultural Engineerin (IIAE)'s data

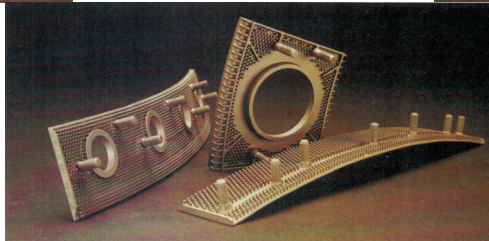
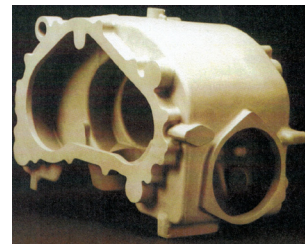
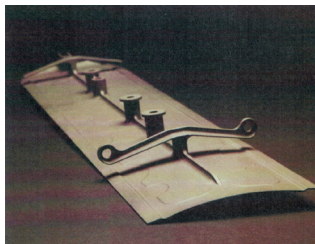
4. Przykłady udanych konwersji technologicznych na nadstopy niklu

4. Examples of successful technological conversions to nickel superalloys



1. Odlew obudowy wlotu powietrza wykonany ze stopu Al/Mg – konwertowany na stop niklu INCO 718.
2. Korzyści:
 - ograniczona obróbka mechaniczna;
 - większa odporność na korozję;
 - większy zakres temperatury pracy.

1. Casting of air inlet housing made from Al/Mg – converted to Nickel Superalloy INCO 718.
2. Benefits:
 - Limited mechanical treatment;
 - Increased corrosion resistance;
 - Higher range of working temperature.



1. Elementy komory spalania w silniku lotniczym.
2. Elementy lutowane zastąpił jeden odlew z niklu.
3. Korzyści:
 - obniżenie kosztów wytworzenia (brak obróbki mechanicznej)
 - uzyskanie cieńszych ścianek
 - zwiększenie trwałości produktu.

1. Elements of the combustion chamber in the aircraft engine;
2. Soldered parts replaced by one nickel casting;
3. Benefits:
 - Lower manufacturing cost (no mechanical treatment);
 - Obtained thinner walls of the castings;
 - Increased product life.

Rys. 4. Przykładowe konwersje technologiczne z udziałem nadstopów niklu [2]

Fig. 4. Examples of technological conversions with nickel superalloys [2]

5. Wnioski

5. Conclusions

Reasumując, na podstawie dotychczas przeprowadzonych analiz spodziewane efekty konwersji można sklasyfikować następująco:

Summing up the analyzes carried out so far, the expected conversion effects can be classified as follows:

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">– techniczne i technologiczne<ul style="list-style-type: none">• wzrost walorów użytkowych i eksploatacyjnych – zmniejszenie ścieralności, wzrost odporności na wysokie temperatury i szoki cieplne• zmniejszenie masy komponentów metalowych w maszynach i urządzeniach,• wzrost trwałości konwertowanych komponentów;– ekonomiczne<ul style="list-style-type: none">• redukcja kosztów wytworzenia (ok. 28–60%)• wzrost konkurencyjnej pozycji polskich producentów maszyn i urządzeń, którzy zastosują efekty konwersji. | <ul style="list-style-type: none">– technical and technological:<ul style="list-style-type: none">• increase of operational values – reduction of abrasiveness, increase of resistance to high temperatures and thermal shocks;• decrease the mass of metal components in machines and devices,• increase the durability of converted components;– economic:<ul style="list-style-type: none">• reduction of production costs (around 28–60%)• increase the competitive position of Polish producers of machines and devices, who will implement the conversion effects. |
|---|--|

Podziękowania

Niniejsza praca została sfinansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu TANGO2, nr umowy: TANGO2/340100/NCBR/2017.

Acknowledgements

The presented work has been supported by National Centre for Research and Development within the framework of TANGO2 Project, Contract Agreement No.: TANGO2/340100/NCBR/2017.

Literatura/References

1. Staff report. 2016. „Global Casting Production Stagnant. 50th Census of World Casting Production”. *Modern Casting* 106 (12) : 25–29.
2. „Investment Casting Case Studies and Applications”. 2011. *INCAST* 24 (8) : 4a–39a.