PRACE INSTYTUTU ODLEWNICTWA
TRANSACTIONS OF THE FOUNDRY RESEARCH INSTITUTE

2018 Volume 58 Issue 4

Konwersja materiałowo-technologiczna stopów niklu
Część 1. Klasyfikacja i zastosowanie stopów niklu

Material-technological conversion of nickel alloys
Part 1. The classification and application of nickel alloys

*Zenon Pirowski[1]**

[1]*Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Polska*
[1]*Foundry 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.2018.24

Streszczenie

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".

W części pierwszej pracy scharakteryzowano pokrótce nikiel i jego stopy w aspektach historycznym, geologicznym, ekonomicznym i ekologicznym. Jednak głównym zagadnieniem, który poruszono, w tej części pracy, jest sklasyfikowanie stopów niklu, zarówno pod kątem składu chemicznego (rodzaju głównych dodatków stopowych), jak też zastosowania w określonych warunkach eksploatacyjnych. Do prac badawczych wybrano stopy IN740 oraz H282. Wyniki tych prac omówione zostaną w części drugiej artykułu.

Słowa kluczowe: konwersja, stopy niklu, zasoby, produkcja, klasyfikacja

Abstract

The present 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".

In the first part of the study nickel and its alloys is characterised, in short, in historical, geological, economic and ecological aspects. However, the main issue tackled are this part of the study is to classify nickel alloys both in terms of the chemical composition (the type of main alloying additives), and the application under specific exploitation conditions. IN740 and H282 alloys were selected for the research. The results of which will be discussed in the second part of the article.

Keywords: conversion, nickel alloys, resources, production, classification

1. Wprowadzenie

Omawiając problemy związane z konwersją materiałowo-technologiczną trzeba dokładnie zdefiniować samo pojęcie konwersji, omówić jej rodzaje i określić o jakiej konwersji traktuje niniejszy artykuł. Otóż według

1. Introduction

When discussing problems related to material-technological conversion, it is necessary to precisely define the notion of conversion itself, discuss its types and determine the type of conversion that this article treats

socjologów Davida Snow i Richarda Machalka [1] **konwersją** może być: odmiana, konsolidacja, regeneracja i wreszcie dramatyczna metamorfoza. Terminy te definiowane są następująco:

– **odmiana** – dotyczy roli i przeznaczenia elementu, nie pociągając za sobą istotnych różnic w dotychczasowym jego kształcie,

– **konsolidacja** – możliwość pogodzenia różnych wersji konstrukcyjnych i technologicznych,

– **regeneracja** – odnowienie dawnych koncepcji technologicznych,

– **dramatyczna metamorfoza** – nagła zmiana zarówno konstrukcyjna, jak i technologiczna, w tym materiałowa.

O tej ostatniej formie konwersji jest mowa w niniejszym opracowaniu. Dramatyczna metamorfoza, czyli konwersja materiałowo-technologiczna, pozwala na:

– potanienie technologii wykonania,

– zwiększenie trwałości i jakości elementów,

– wzrost nowoczesności wyrobów,

– obniżenie kosztów eksploatacji,

– zwiększenie konkurencyjności.

2. Metal w dziejach człowieka

Po epoce kamiennej w dziejach człowieka nastąpiła epoka metalu. Najwcześniejszy przedmiot metalowy datowany jest na dziewięć tysięcy lat przed naszą erą. Jest to odnaleziony na Bliskim Wschodzie wyrób miedziany. Dwa tysiące lat później, na obecnych terenach Turcji i Iranu, miedź była już w powszechnym użyciu. Pięć tysięcy lat przed naszą erą pierwszy człowiek-odlewnik wykorzystywał już brąz, choć początek tej epoki to lata 3 000–2 000 p.n.e. Wczesna epoka żelaza datowana jest na lata 700–500 p.n.e. Trwa ona do dziś, a rokowania są całkiem niezłe, choć inni widzą tu sukces stopów Al, Ti, Mg czy kompozytów. O epoce tworzyw sztucznych już się raczej nie wspomina.

Jaka na tym tle jest rola niklu? Choć już w 235 r. p.n.e. monety greckie zawierały miedź i nikiel, to w średniowieczu nie rozróżniano rudy niklu od rudy miedzi, a „fałszywą" rudę nazywano **Kupfernickel**, od czego pochodzi nazwa pierwiastka.

Nikiel odkryty został dopiero w 1751 roku przez szwedzkiego chemika i mineraloga Axela Cronstedta (rys. 1). Axel Frederic von Cronstedt urodził się

as such. According to sociologists David Snow and Richard Machalek [1], **conversion** can be: type, consolidation, regeneration and, finally, dramatic metamorphosis. These terms are defined as follows:

– **type** – concerns the role and purpose of the element, without entailing significant differences in its current shape,

– **consolidation** – the possibility of reconciling different structural and technological versions,

– **regeneration** – the renewal of old technological concepts,

– **dramatic metamorphosis** – a sudden change in both design and technology, including material.

The latter form of conversion is referred to in this study. Dramatic metamorphosis, i.e. material-technological conversion, allows to:

– cheaper technology of production,

– increase the durability and quality of components,

– increase in the modernity of products,

– reduce of exploitation costs,

– increase competitiveness.

2. Metal in human history

The Stone Age was followed by the Metal Age in human history. The earliest metal object is dated nine thousand years BC. It is a copper product found in the Middle East. Two thousand years later, in the present-day territories of Turkey and Iran, copper was already in widespread use. Five thousand years BC, the first human-founder used bronze, although the beginning of this era is 3000–2000 BC. The early Iron Age dates back to 700–500 BC. It continues to this day and the prognosis is quite promising, although others see the success of Al, Ti, Mg alloys or composites here. The epoch of plastics is hardly mentioned.

What is the role of nickel against this background? Although as early as 235 BC Greek coins contained copper and nickel, in the Middle Ages no distinction was made between nickel ore and copper ore, and "false" ore was called **Kupfernickel**, from which the name of the element comes.

Nickel was not discovered until 1751 by a Swedish chemist and mineralogist Axel Cronstedt (Fig. 1). Axel Frederic von Cronstedt was born on 23 December 1722

23 grudnia 1722 r. w Turinge (Södermanland), a zmarł 19 sierpnia 1765 r. w Säter.

in Turinge (Söderman-land) and died on 19 August 1765 in Säter.

Rys. 1. Axel Fredrik Cronstedt (1722–1765) [2]
Fig. 1. Axel Fredrik Cronstedt (1722–1765) [2]

3. Aspekt geologiczny

Nikiel obecnie wydobywany jest w kilkunastu krajach świata, w ilości ponad 2 mln ton rocznie. Jego rudy dzieli się na tlenkowe, siarczkowe i arsenowe. Najbogatsze złoża niklu znajdują się w Australii, na Kubie, w Indonezji, w Południowej Afryce, w Rosji, a także w Kanadzie, która do lat 50. ubiegłego wieku pozostawała największym producentem niklu na świecie. Obszarem, na którym odkryto pierwsze potężne złoża niklu jest francuska Nowa Kaledonia.

Do ważniejszych minerałów zawierających nikiel zalicza się:

- milleryt – do 65% Ni,
- garnieryt – do 36% Ni,
- nikielin (dawniej kupfernickel) – do 44% Ni,
- chloantyt – do 21% Ni,
- gersdorfit – do 40% Ni,
- pentlandyt – do 36% Ni,
- annabergit – do 30% Ni.

Podstawowym z gospodarczego punktu widzenia jest pentlandyt – $(Ni, Fe)_{7-9}S_8$ zawierający 24−36% Ni zależnie od proporcji Ni/Fe, natomiast nikielin stracił bardzo na znaczeniu ze względu na zawartość arsenu i fakt, że jest dość rzadkim minerałem. Kilka przykładowych minerałów niklu i ich odkrywców ukazano w tabeli 1 [3,4,5].

3. Geological aspect

Nickel is currently mined in more than a dozen countries around the world, in the amount of over 2 million tons per year. Nickel ores are divided into oxides, sulfides, and arsenic compounds. The richest deposits of nickel are found in Australia, Cuba, Indonesia, South Africa, Russia, and also Canada which until the 1950s remained the largest producer in the world. The area where the first rich nickel deposit was discovered is French New Caledonia.

The most important nickel-containing minerals are:

- millerite <65% Ni,
- garnierite <36% Ni,
- nickeline <44% Ni,
- khloantes <21% Ni,
- gersdorffite <40% Ni,
- pentlandite <36% Ni,
- annabergite <30% Ni.

The basic mineral from the economic point of view is pentlandite – $(Ni,Fe)_{7-9}S_8$ containing 24−36% Ni depending on the Ni/Fe ratio. On the other side, nickeline lost popularity due to its arsenic content and the fact that it is a rare mineral. Some examples of nickel minerals are shown in Table 1 [3,4,5].

Tabela 1. Przykładowe rudy niklu i ich odkrywcy [3,4,5]
Table 1. Major nickel ores and their explorers [3,4,5]

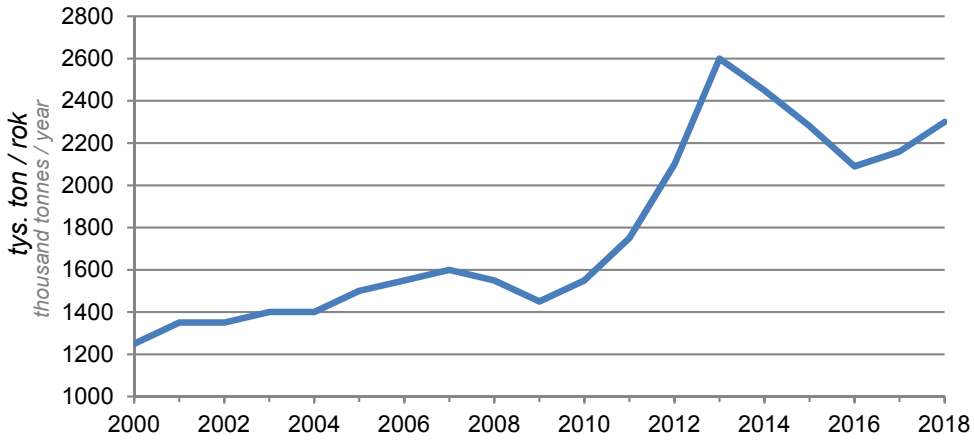
Milleryt (1845 – William Hallowes Miller) **Millerite** (1845 – William Hallowes Miller)	(1694) **Kupfernickel** (Urban Hjärne) (od 1832) **Nikielin** (François Beudant) (1694) **Kupfernickel** (Urban Hjärne) (since 1832) **Nickieline** (François Beudant)	**Garnieryt** (1863 – Juliusz Garnier) **Garnierite** (1863 – Jacque Jules Garnier)

Niektóre dane dotyczące niklu i jego stopów w aspekcie geologicznym przedstawiono na zamieszczonych diagramach (rys. 2−6) opracowanych na podstawie pracy [6] i uzupełnione wg *U.S. Geological Survey*, *Mineral Commodity Summaries* – roczniki 2015–2019, *British Geological Survey*, *World Mineral Production* – roczniki 2013−2017, publikacji: Glencore, *Nickel: State of the market*, November 2017 oraz danych *International Nickel Study Group*.

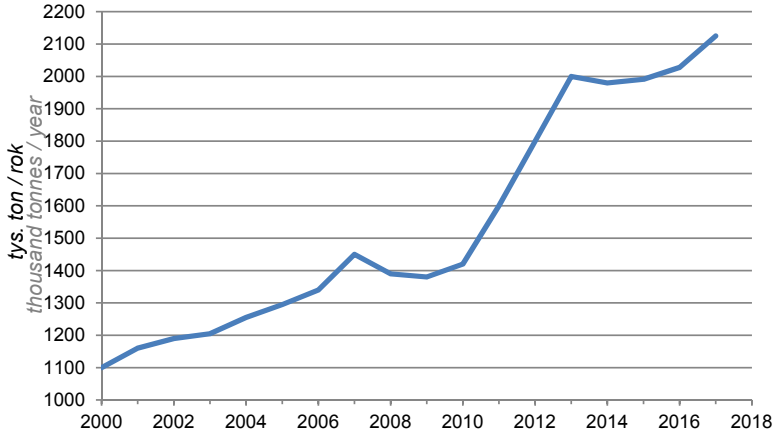
Mimo wzrostu globalnej konsumpcji niklu rafinowanego, zwłaszcza w drugiej dekadzie obecnego stulecia (rys. 5), odkrywane i udostępniane do eksploatacji nowe złoża niklu, takie jak Goro w Nowej Kaledonii czy Onca Puma w Brazylii, wpływają na wzrost światowych zasobów tego surowca (rys. 6).

Some data on nickel and its alloys in the geological aspect are presented in the diagrams (Figs. 2−6) elaborated on the basis of work [6] and supplemented according to U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries (2015−2019), British Geological Survey, World Mineral Production (2013−2017), publications: Glencore, Nickel: State of the market (November 2017) and International Nickel Study Group.

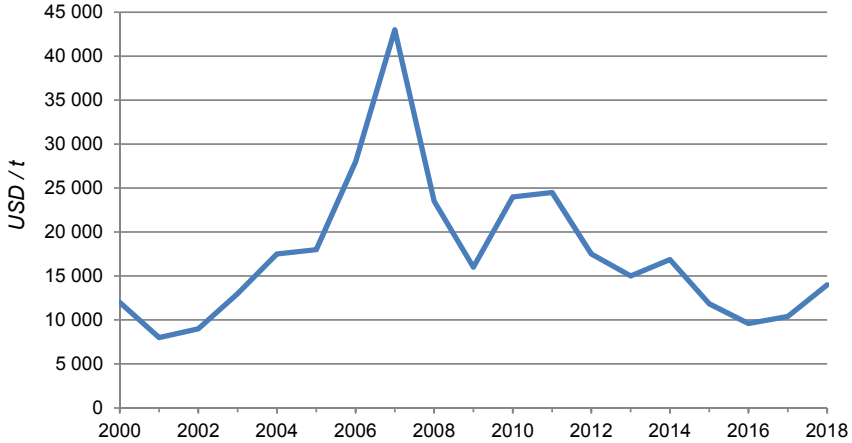
Despite the increase in global consumption of refined nickel, especially in the second decade of the current century (Fig. 5), new nickel deposits discovered and made available for exploitation, such as Goro in New Caledonia or Onca Puma in Brazil, influence the increase in global resources of this raw material (Fig. 6).



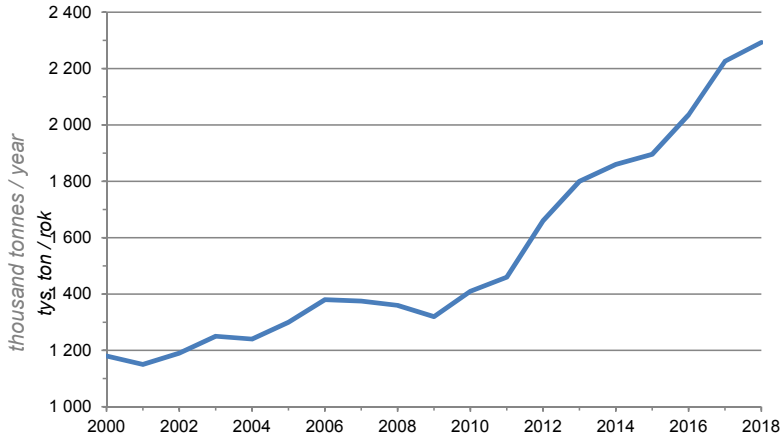
Rys. 2. Globalna produkcja górnicza niklu
Fig. 2. Global mining production of nickel



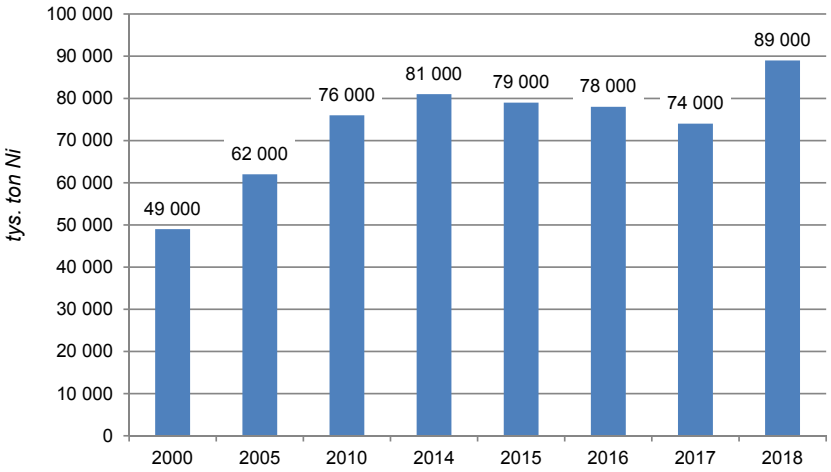
Rys. 3. Globalna produkcja niklu rafinowanego
Fig. 3. Global mining production of refined nickel



Rys. 4. Ewolucja średniorocznych cen niklu na LME (London Metal Exchange)
Fig. 4. The evolution of average annual nickel prices on the LME (London Metal Exchange)



Rys. 5. Globalna konsumpcja niklu rafinowanego
Fig. 5. Global consumption of refined nickel



Rys. 6. Światowe zasoby przemysłowe niklu
Fig. 6. The world's nickel resources

Konsumpcja stopów niklu w Polsce mimo pewnego załamania w 2011 roku utrzymuje się w obecnej dekadzie na poziomie 250 ton na rok. To załamanie 2011 roku jest odzwierciedleniem obniżenia zapasów giełdowych niklu na LME (*London Metal Exchange*).

4. Zastosowanie stopów niklu

Nikiel i jego stopy znajdują zastosowanie wszędzie tam, gdzie od wykonanych elementów wymagana jest duża trwałość w szczególnie trudnych warunkach chwilowej i długotrwałej eksploatacji (wysoka i bardzo wysoka temperatura, duże i często cyklicznie zmienne obciążenia, agresywne chemicznie środowisko). Stopy te stosowane są na elementy maszyn i urządzeń praktycznie we wszystkich działach gospodarki:

– w przemyśle lotniczym – na elementy silników samolotowych (pasażerskich i wojskowych), na narzędzia służące do produkcji elementów kompozytowych,

– w motoryzacji – na elementy układów wydechowych, zaworów silników, zapłonu, czujniki i systemy bezpieczeństwa,

– w przemyśle chemicznym – elementy aparatury chemicznej,

– w petrochemicznym – zbiorniki, reaktory, wymienniki ciepła, rury rozkładu termicznego, rury przesyłowe i inne,

– w przemyśle energetycznym – turbiny gazowe, rurociągi wody zasilającej, przegrzewacze pary,

The consumption of nickel alloys in Poland despite a certain collapse in 2011 persists in the current decade at a level of 250 tonnes per year. This collapse of 2011 is a reflection of the reduction in the stock of nickel on the LME (London Metal Exchange).

4. The application of nickel alloys

Nickel and its alloys are used everywhere, where from the manufactured elements is required a long life in particularly difficult conditions of temporary and long-term use (high and very high temperature, large and often cyclically variable loads, chemically aggressive environment). These alloys are used for elements of machines and devices in practically all branches of the economy:

– in the aerospace industry – for components of aircraft engines (passenger and military), for tools used in the production of composite components,

– in the automotive industry – for elements of exhaust systems, engine valves, ignition, sensors and safety systems,

– in the chemical industry – elements of chemical apparatus,

– in the petrochemical industry – tanks, reactors, heat exchangers, thermal decomposition pipes, transmission pipes and others,

– in the power industry – gas turbines, feedwater pipelines, steam superheaters,

– w urządzeniach do obróbki cieplnej – promienniki rurowe, retorty, mufle, taśmy przenośników, termopary, kosze i inne elementy konstrukcyjne,

– w ochronie środowiska – w instalacjach odsiarczania spalin, wykładziny kominów, płuczki wieżowe, zasuwy, wymienniki ciepła,

– w przemyśle wydobywczym ropy naftowej i gazu – orurowania odwiertu i jego oprzyrządowanie, głowice wiertnicze, elementy wyposażenia procesu technologicznego, maszty,

– w inżynierii morskiej – w przemyśle stoczniowym, łodziach podwodnych, platformach wiertniczych oraz w elektrowniach i zakładach przesyłowych używających wodę morską jako medium chłodzące,

– w elektronice i komunikacji – komponenty precyzyjne, uszczelnienia szkło/metal, osłony magnetyczne, układy scalone,

– w urządzeniach przemysłowych i AGD – oporowe elementy grzewcze, rury osłonowe, płaszcze, rezystory.

Przykładem celowości stosowania stopów niklu ze względu na aspekty ekonomiczne i ekologiczne jest ciągły rozwój wykorzystywanych w energetyce węglowej stopów na pracujące w najbardziej newralgicznych strefach elementy agregatów prądotwórczych. Rysunek 7 przedstawia wpływ temperatury pracy turbiny na jej sprawność i redukcję gazów cieplarnianych.

– in heat treatment equipment – radiant tube heaters, retorts, muffs, conveyor belts, thermocouples, baskets and other structural elements,

– in environmental protection – in flue gas desulphurization installations, chimney linings, tower scrubbers, gate valves, heat exchangers,

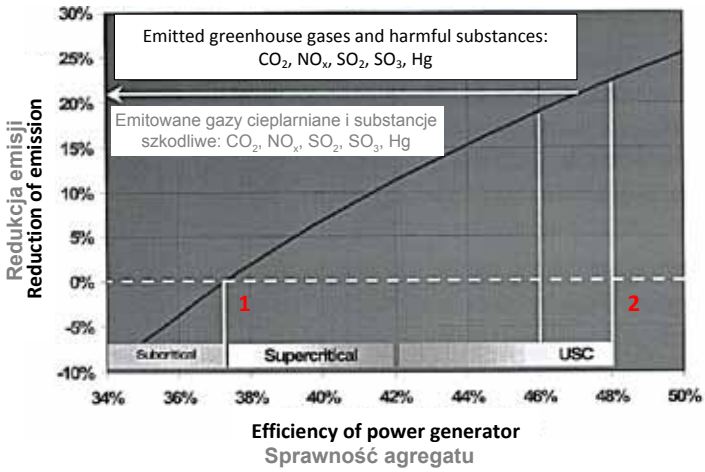
– in the oil and gas industry – well piping and its equipment, drilling heads, elements of technological process equipment, masts,

– in marine engineering – in the shipbuilding industry, submarines, oil platforms and in power plants and transmission plants using sea water as a refrigerant,

– in electronics and communication – precision components, glass/metal seals, magnetic shields, integrated circuits,

– in industrial and household appliances – resistance heating elements, casing pipes, coatings, resistors.

An example of the purposefulness of using nickel alloys due to economic and ecological aspects is the continuous development of alloys used in the coal-fired power industry for operating in the most sensitive zones, elements of power generators. Figure 7 shows the impact of turbine temperature on efficiency and reduction of greenhouse gases.



Rys. 7. Wpływ sprawności agregatów prądotwórczych na emisję gazów cieplarnianych [7]
Fig. 7. The impact of efficiency of power generators on greenhouse gas emissions [7]

Obecnie w najnowocześniejszych amerykańskich elektrowniach węglowych maksymalna temperatura pracy turbiny nie przekracza 700°C (punkt 1. rysunku). Sprawność takich agregatów nie przekracza 37%, przy emisji określonej ilości gazów cieplarnianych i innych

Currently, in the most modern American coal-fired power plants, the maximum turbine operating temperature does not exceed 700°C (point 1 of the Figure). The efficiency of such aggregates does not exceed 37%, with the emission of a specific amount of greenhouse

substancji szkodliwych, jak np. pary rtęci, przyjętej jako poziom odniesienia (na wykresie 0% redukcji). Zastosowanie stopów niklu najnowszej generacji (tzw. USC czy nawet A-USC – *Advanced Ultrasupercritical*) pozwoli osiągnąć temperaturę 760°C (punkt 2. rysunku). Wówczas sprawność zwiększy się minimum do 48%. Ten jedenastoprocentowy wzrost sprawności ograniczy redukcję emisji gazów o 21% [7].

5. Klasyfikacja stopów niklu

Stopy niklu są najczęściej tworzywami o bardzo złożonym i różnorodnym składzie chemicznym w zależności od oczekiwanych właściwości użytkowych. Ze względu na rodzaj głównych dodatków stopowych wyróżnia się następujące grupy tych stopów [8,9,10]:

- stopy **Ni-Cu** i **Ni-Cu-Si**:
  - Monela – monety,
  - Nicorros – odlewy zaworów i gniazd, pompy, łopatki turbin parowych, aparatura przemysłu chemicznego, części maszyn i sprzętu morskiego,
- stopy **Ni-Cu-Sn** i **Ni-Cu-Sn-Pb**:
  - odlewy armatury dla pary przegrzanej,
- stopy **Ni-Cr** i **Ni-Cr-Fe**:
  - Nichrom – rezystory, elementy grzewcze pieców, termoelementy,
  - Cronit – części pieców metalurgicznych, rekuperatorów, retorty, kosze do obróbki cieplnej,
  - Inconel – armatura chemiczna, pompy, zbiorniki,
- stopy **Ni-Mo-Fe** i **Ni-Mo-Cr-Fe**:
  - Hastelloy (Hastelloy A, Hastelloy B, Hastelloy C) – aparatura chemiczna, części maszyn, pomp, zaworów, silników odrzutowych oraz turbin gazowych,
- stopy **Ni-Be**:
  - wirniki pomp, łożyska, inne elementy ulegające zużywaniu ściernemu, elementy pracujące w warunkach korozyjnych,
- stopy **Ni-Ti**:
  - biomateriały metaliczne stosowane na: łuki ortodontyczne, filtry blokujące skrzepy krwi, stenty, klamry ortopedyczne, elementy mikronarzędzi w chirurgii małoinwazyjnej, aktywatory w protetyce i robotyce medycznej, części aparatury medycznej,
- stopy **Ni-Al**:
  - Alumel, Duranickel, Raneya – odlewy armatury części pomp, rolki łożyskowe, gniazda zaworów,

gases and other harmful substances, such as mercury vapour, adopted as a reference level (in the graph 0% reduction). The use of the latest generation of nickel alloys (so-called USC or even A-USC – Advanced Ultrasupercritical) will allow reaching a temperature of 760°C (point 2 of the Figure). Then the efficiency will be increased to a minimum of 48%. This eleven percent increase in efficiency will limit the reduction in gas emissions by 21% [7].

5. Classification of nickel alloys

Nickel alloys are most often plastics with a very complex and varied chemical composition depending on the expected functional properties. Due to the type of main alloying additives, the following groups of these alloys are distinguished [8,9,10]:

- **Ni-Cu** and **Ni-Cu-Si** alloys:
  - Monela – coins,
  - Nicorros – valve and seat castings, pumps, steam turbine blades, chemical industry apparatus, machine parts and marine equipment,
- **Ni-Cu-Sn** and **Ni-Cu-Sn-Pb** alloys:
  - fittings casts for superheated steam,
- **Ni-Cr** and **Ni-Cr-Fe** alloys:
  - Nichrome – resistors, heating elements of furnaces, thermoelements,
  - Cronit – parts of metallurgical furnaces, recuperators, retorts, baskets for heat treatment,
  - Inconel – chemical fittings, pumps, tanks,
- **Ni-Mo-Fe** and **Ni-Mo-Cr-Fe** alloys:
  - Hastelloy (Hastelloy A, Hastelloy B, Hastelloy C) – chemical apparatus, machine parts, pumps, valves, jet engines and gas turbines,
- **Ni-Be** alloys:
  - Pump impellers, bearings, other abrasive wear parts, corrosive components,
- **Ni-Ti** alloys:
  - metallic biomaterials used for: orthodontic arches, blood clotting filters, stents, orthopaedic brackets, elements of microsurgical instruments in minimally invasive surgery, activators in prosthetics and medical robotics, parts of medical equipment,
- **Ni-Al** alloys:
  - Alumel, Duranickel, Raneya – valve castings, pump parts, bearing rollers, valve seats,

– stopy **Ni-Si**:
  – Hastelloy D – elementy odporne na ścieranie i na działanie kwasu siarkowego,

– stopy **Ni-Co**:
  – NiCo8, NiCo18 czy też typu Ni-Co-Cr – stopy magnetostrykcyjne,

– stopy **Ni-Fe**:
  – Permalloy, Supermalloy, Ultraperm, Nivac – materiały magnetycznie miękkie.

Ze względu na technologię wytwarzania stopów niklu można je sklasyfikować w dwóch grupach: stopy przerabiane plastycznie i stopy odlewnicze [11]. Wśród stopów przerabianych plastycznie w zależności od przeznaczenia (warunków eksploatacji) wyróżnić można:

– stopy odporne na korozję,

– stopy o specjalnych właściwościach elektrycznych,

– stopy do specjalnych zastosowań,

– stopy żaroodporne,

– stopy żarowytrzymałe,

natomiast stopy odlewnicze klasyfikowane są jako:

– stopy odporne na korozję,

– stopy żaroodporne,

– stopy żarowytrzymałe,

– stopy lotnicze.

Badania prowadzone w Instytucie Odlewnictwa związane z konwersją stopów niklu przerabianych plastycznie na odlewy opisano w części 2. artykułu.

6. Podsumowanie

Nikiel formalnie został odkryty w połowie XVIII w. Pierwiastek ten ma liczbę atomową równą 28, a masę atomową 58,6934. Nie wykazuje on odmian alotropowych, krystalizując w sieci ściennie centrowanej układu regularnego A1 o parametrze a = 0,3516 nm, co decyduje o tym, że jest podatny na obróbkę plastyczną zarówno na zimno, jak i na gorąco. Jego temperatura topnienia wynosi 1453°C, wrzenia 2730°C, a gęstość 8,902 g/cm^3. Jest metalem ferromagnetycznym poniżej punktu Curie, tj. 358°C. W stanie zmiękczonym uzyskuje wytrzymałość na rozciąganie R_m = 450 MPa i wydłużenie A = 45%, a w stanie odkształconym na zimno z 50%

– **Ni-Si** alloys:
  – Hastelloy D – elements resistant to abrasion and sulphuric acid,

– **Ni-Co** alloys:
  – NiCo8, NiCo18 or Ni-Co-Cr type – magnetostrictive alloys,

– **Ni-Fe** alloys:
  – Permalloy, Supermalloy, Ultraperm, Nivac – magnetically soft materials.

Due to the technology of production of nickel alloys, they can be classified in two groups: plastic-processed alloys and casting alloys [11]. Among the plastically processed alloys depending on the purpose (operating conditions) the following can be distinguished:

– corrosion-resistant alloys,

– alloys with special electrical properties,

– alloys for special applications,

– heat-resistant alloys,

– high-temperature alloys,

and casting alloys are classified as:

– corrosion-resistant alloys,

– heat-resistant alloys,

– high-temperature alloys,

– aerospace alloys.

Research conducted at the Foundry Institute related to the conversion of nickel alloys converted plastically into castings is described in Part 2 of the article.

6. Summary

Nickel was formally discovered in the middle of the 18th century. This element has an atomic number of 28 and an atomic mass of 58.6934. It does not show allotropic varieties, crystallising in a network of wall-centred regular system A1 with the parameter a = 0.3516 nm, which makes it susceptible to cold and hot plastic processing. It has a melting point of 1453°C, a boiling point of 2730°C and a density of 8,902 g/cm^3. It is a ferromagnetic metal below the Curie point, i.e. 358°C. In the softened state it obtains tensile strength R_m = 450 MPa and elongation A = 45%, and in the cold deformed state with 50% crumple degree – R_m =

stopniem gniotu – R_m = 750 MPa, a A = 3%. Zachowuje wysokie właściwości mechaniczne w temperaturze podwyższonej do około 500°C. Właściwości niklu pogarszają szkodliwe zanieczyszczenia, głównie C, O i S. Zanieczyszczenia Co, Fe, Si i Cu, tworzące z Ni roztwory stałe, powodują jedynie nieznaczne zmiany właściwości, głównie zwiększenie rezystywności. Zanieczyszczenia Bi, Pb, Se, tworzące niskotopliwe eutektyki, znacznie zmniejszają ciągliwość, a As, Sb, Cd i P, tworząc z Ni twarde i kruche fazy, obniżają właściwości mechaniczne.

Nikiel jest odporny na korozję atmosferyczną oraz w środowisku wody morskiej, wód mineralnych i kwasów organicznych, nie wykazuje natomiast odporności na działanie kwasów azotowego i fosforowego oraz związków siarki.

W zależności od metody wytwarzania można wyróżnić nikiel elektrolityczny, karbonylkowy, hutniczy i rafinowany ogniowo, o różnych stopniach czystości. Nikiel rafinowany, zawierający 99,80−99,95% Ni, jest dostarczany w postaci brykietów, katod, granulatu, śrutu lub proszku.

Nikiel jest jednym z ważniejszych dodatków stopowych do wielu pierwiastków bazowych, np. w stalach żaroodpornych i żarowytrzymałych. Coraz częściej też stanowi osnowę wieloskładnikowych stopów przeznaczonych do pracy w ekstremalnych warunkach eksploatacji, którym nie mogą podołać stopy żelaza.

Stale żarowytrzymałe wykazują małą wytrzymałość na pełzanie w temperaturze przekraczającej 650°C, dlatego nie spełniają wymagań stawianych przez współczesny przemysł energetyczny i lotniczy dla materiałów przeznaczonych między innymi do budowy turbin gazowych stacjonarnych i lotniczych oraz na wybrane elementy urządzeń energetycznych, zwłaszcza wysokotemperaturowych reaktorów jądrowych chłodzonych gazem. W warunkach eksploatacji w wysokiej temperaturze, pod wysokim ciśnieniem i w agresywnym środowisku znajdują zastosowanie stopy niklu. Kluczową rolę stopy te odgrywają zwłaszcza tam, gdzie materiały przeznaczone są na elementy najbardziej obciążone pod względem termicznym, naprężeniowym i korozyjnym. Od takich tworzyw wymagana jest stabilność wysokich właściwości w trakcie wielogodzinnej eksploatacji (odporności na pełzanie). Stopy niklu odporne na pełzanie stosowane są między innymi w urządzeniach energetycznych, w przemysłach chemicznym i petrochemicznym, a także w transporcie lotniczym i kosmicznym. W elektrowniach i elektrociepłowniach możliwość stosowania pary wodnej o wyższej temperaturze i ciśnieniu przekłada się bezpośrednio na większą sprawność cieplną, a zatem na bardziej opłacalne wytwarzanie energii. Stopy niklu znajdują tu zastosowanie na takie elementy, jak: rury kotłowe, zbiorniki ciśnieniowe i turbiny parowe.

W zależności od przeznaczenia i rosnących wciąż wymogów konstruktorów powstało szereg typów stopów, w których nikiel jest jednym z głównych składników

750 MPa and A = 3%. It retains high mechanical properties at temperatures increased to about 500°C. The properties of nickel worsen harmful impurities, mainly C, O and S. Impurities of Co, Fe, Si and Cu, forming solid solutions from Ni, cause only slight changes in properties, mainly increased resistivity. Impurities Bi, Pb, Se, forming low-melting eutectic substances, significantly reduce ductility, and As, Sb, Cd and P, forming hard and brittle phases with Ni, reduce mechanical properties.

Nickel is resistant to atmospheric corrosion and in sea water, mineral waters and organic acids, but it is not resistant to nitric acids and phosphorus and sulphur compounds.

Depending on the manufacturing method, electrolytic nickel, carbonyl, metallurgical and fire refined nickel of different purity grades can be distinguished. Refined nickel, containing 99.80−99.95% Ni, is supplied in the form of briquettes, cathodes, granulate, shot or powder.

Nickel is one of the most important alloying additions to many base elements, e.g. in heat-resistant and heat-resistant steels. It is also more and more often used as a matrix of multicomponent alloys designed to operate in extreme conditions of exploitation, which cannot be met by iron alloys.

High-temperature steels have low creep strength at temperatures exceeding 650°C, therefore they do not meet the requirements set by the modern power and aviation industries for materials used, inter alia, for the construction of stationary and aviation gas turbines and for selected components of power equipment, especially high-temperature gas-cooled nuclear reactors. Nickel alloys are used in high temperature, high pressure and aggressive environments. These alloys play a key role especially where the materials are designed for the most thermally, stress and corrosive loaded components. These materials should show stability of high properties during many hours of operation (creep resistance). Creep-resistant nickel alloys are used, among others, in power equipment, in the chemical and petrochemical industries, as well as in air and space transport. In power plants and combined heat and power plants, the ability to use steam at higher temperatures and pressures translates directly into higher thermal efficiency and therefore more cost-effective power generation. Nickel alloys are used here for components such as boiler tubes, pressure vessels and steam turbines.

Depending on the purpose and growing requirements of the designers, a number of types of alloys have been developed, in which nickel is one of the main alloying components, and often the basic component of the metal matrix.

stopowych, a często podstawowym składnikiem osnowy metalowej.

Podziękowania

Praca powstała w wyniku realizacji przez Instytut Odlewnictwa w Krakowie projektu zatytułowanego „Konwersja technologiczna stopów niklu pracujących w ekstremalnych warunkach" – nr umowy TANGO2/340100/NCBR/2017 z dnia 28.04.2017 r. Obecnie przystąpiono do realizacji Fazy B+R tego projektu.

Acknowledgements

The work was created as a result of the implementation by the Foundry Research Institute in Kraków of the project entitled "Technological conversion of nickel alloys working under extreme conditions"". - Contract number TANGO2/340100/NCBR/2017 of 28.04.2017 The R&D Phase of this project has now started.

Literatura/References

1. https://pl.wikipedia.org/wiki/Konwersja_(socjologia).
2. https://www.revolvy.com/page/Axel-Frederic-Cronstedt.
3. https://pl.wikipedia.org/wiki/milleryt.
4. https://pl.wikipedia.org/wiki/nikielin.
5. https://pl.wikipedia.org/wiki/garnieryt.
6. Lewicka E. (red.). 2015. *Bilans gospodarki surowcami mineralnymi Polski i świata. Nikiel.* Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy.
7. Purgert R. 2008. *Drivers for Higher Efficiency Advanced Ultrasupercritical (A-USC) Plant in U.S.* USA. Electric Power Research Institute.
8. Prowans S. 1988. *Metaloznawstwo*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
9. Wesołowski K. 1978. *Metaloznawstwo i obróbka cieplna*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
10. Przybyłowicz K. 2007. *Metaloznawstwo*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
11. Pirowski Z. 2017. *Kompendium wiedzy o 269 stopach niklu. Podstawowe dane materiałowe*. Kraków: Instytut Odlewnictwa.