

ZENON PIROWSKI

STOPY NIKLU  
JAKO NOWOCZESNE TWORZYWO ODLEWNICZE  
DO PRACY W EKSTREMALNYCH WARUNKACH  
EKSPLOATACJI

INSTYTUT ODLEWNICTWA

---

KRAKÓW 2013

Recenzenci wydawniczy:  
prof. dr hab. inż. Zbigniew Górny  
dr hab. inż. Krystyna Pietrzak

Redaktor Naczelny:  
prof. dr hab. inż. Jerzy J. Sobczak

Opracowanie redakcyjne:  
inż. Marta Konieczna  
mgr Anna Samek-Bugno

Skład komputerowy:  
mgr Anna Samek-Bugno

Projekt okładki:  
mgr inż. Jan Witkowski

© Copyright by Instytut Odlewnictwa, Kraków 2013

**WSZELKIE PRAWA ZASTRZEŻONE**  
Całość wydawnictwa ani żadna jego część nie może być  
powielana ani rozpowszechniana bez pisemnej zgody  
posiadacza praw autorskich

**ISBN 978-83-88770-91-3**

---

Przygotowanie i druk: Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków  
Wydanie I. Nakład 100 egz.

## Spis treści

<b>Streszczenie</b> .....	9
<b>Abstract</b> .....	13
<b>Wykaz ważniejszych oznaczeń i symboli</b> .....	17
<b>1. Wprowadzenie</b> .....	19
1.1. Ogólna charakterystyka tematu pracy .....	19
1.2. Cel, tezy i zakres prac własnych .....	19
<b>2. Nikiel i jego stosowanie</b> .....	21
<b>3. Stopy na osnowie niklu</b> .....	23
3.1. Ogólna systematyka .....	23
3.2. Topienie i odlewanie .....	27
3.2.1. Metody topienia, formowania i zalewania .....	27
3.2.2. Topienie niklu .....	28
3.2.3. Topienie stopów Ni-Cu .....	29
3.2.4. Topienie stopów Ni-Cr-Fe .....	30
3.2.5. Technologia odlewania .....	31
<b>4. Nadstopy</b> .....	33
4.1. Charakterystyka nadstopów .....	33
4.2. Nadstopy na osnowie niklu .....	33
<b>5. Obróbka cieplna stopów niklu</b> .....	37
5.1. Polikrystaliczne stopy odlewnicze .....	37
5.2. Stopy krystalizujące kierunkowo oraz monokrystaliczne .....	39
<b>6. Odlewnicze stopy niklu</b> .....	41
6.1. Stopy odporne na korozję .....	41
6.2. Stopy żaroodporne i żarowytrzymałe .....	44
<b>7. Zakres i metodyka badań eksperymentalnych</b> .....	48
<b>8. Przebieg badań eksperymentalnych</b> .....	53
8.1. Wybór tworzywa do prób .....	53
8.2. Badania stopu <i>Inconel 740</i> .....	55
8.2.1. Próby topienia .....	55
8.2.2. Dobór parametrów temperaturowo-czasowych procesu obróbki cieplnej w celu uzyskania zamierzonej struktury .....	57
8.2.3. Badanie materiałowe wytworzonego stopu .....	58
8.2.3.1. Badania metalograficzne .....	58
8.2.3.2. Pomiary wytrzymałości na rozciąganie .....	63
8.2.4. Ocena skuteczności przeprowadzonych zabiegów cieplnych ....	64
8.2.5. Podsumowanie wyników badań stopu <i>Inconel 740</i> .....	66
8.3. Badania stopu <i>Haynes 282</i> .....	69
8.3.1. Określenie podstawowych parametrów cieplnych .....	69
8.3.2. Ocena wysokotemperaturowego oddziaływania fizykochemicznego na granicy ciekły metal / ceramika tygla .....	72
8.3.3. Przeprowadzenie wytopów w skali laboratoryjnej .....	81

8.3.4.	Próby technologiczne .....	84
8.3.4.1.	Analiza termiczna .....	84
8.3.4.2.	Próba schodkowa .....	86
8.3.4.3.	Próba lejności .....	89
8.3.4.4.	Charakterystyka strukturalna .....	93
8.3.5.	Analiza zmian strukturalnych w procesie obróbki cieplnej .....	98
8.3.6.	Badanie właściwości mechanicznych wytworzonego stopu .....	102
8.4.	Próby gorącego prasowania izostatycznego (HIP) .....	106
8.4.1.	Dobór parametrów procesu i wykonanie prób .....	106
8.4.2.	Badania materiałowe otrzymanego stopu .....	107
8.5.	Wykonanie próbných odlewów użytkowych .....	113
8.5.1.	Opracowanie technologii odlewniczej .....	113
8.5.2.	Wykonanie wytopów i obróbka cieplna .....	117
8.5.3.	Badania materiałowe wykonanych odlewów .....	120
8.6.	Analiza osiągniętych rezultatów badań stopu <i>Haynes 282</i> .....	126
<b>9.</b>	<b>Podsumowanie i wnioski końcowe</b> .....	<b>129</b>
	<b>Spis rysunków</b> .....	<b>137</b>
	<b>Spis tabel</b> .....	<b>143</b>
	<b>Literatura</b> .....	<b>145</b>

## Contents

<b>Streszczenie</b> .....	9
<b>Abstract</b> .....	13
<b>List of main designations and symbols</b> .....	17
<b>1. Introduction</b> .....	19
1.1. General information about the subject of the study .....	19
1.2. The aim, thesis and scope of own studies .....	19
<b>2. Nickel and its applications</b> .....	21
<b>3. Nickel-based alloys</b> .....	23
3.1. General system .....	23
3.2. Melting and casting .....	27
3.2.1. Methods for melting, moulding and pouring .....	27
3.2.2. Melting of nickel .....	28
3.2.3. Melting of Ni-Cu alloys .....	29
3.2.4. Melting of Ni-Cr-Fe alloys .....	30
3.2.5. Casting technology .....	31
<b>4. Superalloys</b> .....	33
4.1. Characteristics of superalloys .....	33
4.2. Nickel-based superalloys .....	33
<b>5. Heat treatment of nickel alloys</b> .....	37
5.1. Polycrystalline cast alloys .....	37
5.2. Alloys subjected to directional crystallization and monocrystalline alloys .....	39
<b>6. Cast nickel alloys</b> .....	41
6.1. Corrosion-resistant alloys .....	41
6.2. Heat- and creep-resistant alloys .....	44
<b>7. Scope and methods of experimental studies</b> .....	48
<b>8. Program of experiments</b> .....	53
8.1. Selection of test alloys .....	53
8.2. Testing of <i>Inconel 740</i> .....	55
8.2.1. Test melting .....	55
8.2.2. Choice of time-temperature parameters of the heat treatment process to obtain the required structure .....	57
8.2.3. Material research of alloy produced .....	58
8.2.3.1. Metallographic examinations .....	58
8.2.3.2. Tensile testing .....	63
8.2.4. Evaluating the effectiveness of the heat treatment process .....	64
8.2.5. Summing up the test results obtained on <i>Inconel 740</i> .....	66
8.3. Studies of <i>Haynes 282</i> .....	69
8.3.1. Determination of basic thermal parameters .....	69
8.3.2. Evaluating high-temperature physico-chemical effect at the molten metal / ceramic crucible interface .....	72
8.3.3. Laboratory test melting .....	81

8.3.4.	Technological tests	84
8.3.4.1.	Thermal analysis	84
8.3.4.2.	Stepped specimens	86
8.3.4.3.	Castability test	89
8.3.4.4.	Structural characteristics	93
8.3.5.	Analysis of structural changes caused by heat treatment	99
8.3.6.	Mechanical testing of produced alloy	102
8.4.	Tests of hot isostatic pressing (HIP)	106
8.4.1.	Choice of process parameters and tests	106
8.4.2.	Material research of alloy produced	107
8.5.	Manufacture of pilot castings	113
8.5.1.	Development of casting technology	113
8.5.2.	Melting and heat treatment	117
8.5.3.	Material research of castings produced	120
8.6.	Analysis of test results obtained on <i>Haynes 282</i>	126
<b>9.</b>	<b>Summary and final conclusions</b>	<b>129</b>
	<b>List of figures</b>	<b>137</b>
	<b>List of tables</b>	<b>143</b>
	<b>References</b>	<b>145</b>