

SPIS TREŚCI

SPIS UŻYTYCH OZNACZEŃ I TERMINÓW	11
1. WPROWADZENIE	15
Uzasadnienie podjęcia tematu i cel pracy	19
2. MIKROSTRUKTURA I WŁAŚCIWOŚCI NADSTOPÓW NA OSNOWIE NIKLU	22
2.1. Mikrostruktura nadstopów na osnowie niklu jako efekt procesów wytwarzania i przetwarzania	22
2.2. Skład chemiczny i fazowy nadstopów na osnowie niklu	27
2.3. Faza γ' (gamma prime) i jej stabilność w nadstopach na osnowie niklu	41
2.4. Mechanizmy umocnienia w nadstopach na osnowie niklu	45
2.4.1. Umocnienie roztworowe	48
2.4.2. Umocnienie wydzieleniowe	50
2.4.3. Umocnienie dyslokacyjne	50
2.4.4. Umocnienie dyspersyjne	63
2.4.5. Umocnienie granicami ziaren.....	64
2.4.6. Umocnienie za pomocą anizotropii.....	65
2.5. Mikrostruktura nadstopów na osnowie niklu	65
2.6. Właściwości nadstopów na osnowie niklu	68
2.6.1. Wytrzymałość na pełzanie.....	76
3. ZNACZENIE PARAMETRÓW MORFOLOGICZNYCH I STEREOLOGICZNYCH WYDZIELEŃ FAZY γ' W NADSTOPACH NA OSNOWIE NIKLU	84
3.1. Wydzielenia fazy γ' a wytrzymałość na pełzanie.....	84
3.2. Zjawisko raftingu – koagulacja i koalescencja wydzielań fazy γ'	86
3.3. Wpływ składu chemicznego i technologii wytwarzania na objętość względna, wielkość, kształt i rozmieszczenie wydzielań fazy γ' w nadstopach na osnowie niklu	93
3.4. Objętość względna wydzielań fazy γ' jako główne kryterium doboru składu chemicznego nadstopów na osnowie niklu.....	98

3.5. Wpływ parametrów morfologicznych i stereologicznych fazy γ' na właściwości nadstopów na osnowie niklu	105
4. WYDZIELENIA FAZY γ' W EUTEKTYCE ($\gamma+\gamma'$) W NADSTOPACH NA OSNOWIE NIKLU	115
4.1. Wpływ składu chemicznego i technologii wytwarzania na objętość względną, wielkość, kształt i rozmieszczenie wydzieleni fazy γ' w eutektyce ($\gamma+\gamma'$)	115
4.2. Wpływ parametrów morfologicznych i stereologicznych eutektyki ($\gamma+\gamma'$) w nadstopach na osnowie niklu na ich właściwości użytkowe	119
5. ZMIANY OBJĘTOŚCI WZGLĘDNEJ, WIELKOŚCI, KSZTAŁTU I ROZMIESZCZENIA WYDZIELEŃ FAZY γ' ORAZ EUTEKTYKI ($\gamma+\gamma'$) W NADSTOPACH NA OSNOWIE NIKLU W PROCESIE ICH OBRÓBKIE CIEPLNEJ	121
5.1. Wpływ struktury odlewniczej na obróbkę cieplną nadstopów niklu	121
5.2. Istota obróbki cieplnej odlewniczych nadstopów niklu	124
5.3. Projektowanie obróbki cieplnej odlewniczych nadstopów niklu	138
5.4. Optymalna mikrostruktura po obróbce cieplnej	139
6. METODY WYZNACZANIA OBJĘTOŚCI WZGLĘDNEJ ORAZ CHARAKTERYZOWANIA WIELKOŚCI, KSZTAŁTU I ROZMIESZCZENIA WYDZIELEŃ FAZY γ' W POLIKRYSTALICZNYCH I KIERUNKOWO KRYSTALIZOWANYCH NADSTOPACH NA OSNOWIE NIKLU	142
6.1. Metalografia ilościowa	142
6.2. Rentgenowska analiza strukturalna	151
6.3. Tomografia rentgenowska	153
6.4. Tomografia elektronowa.....	158
6.5. Tomografia atomowa.....	161
6.6. Inne metody	164
7. KOMPLEKSOWE PROCEDURY WYZNACZANIA OBJĘTOŚCI WZGLĘDNEJ ORAZ CHARAKTERYZOWANIA WYDZIELEŃ FAZY γ' W POLIKRYSTALICZNYCH I KIERUNKOWO KRYSTALIZOWANYCH NADSTOPACH NA OSNOWIE NIKLU	165
7.1. Preparatyka próbek do badań metalograficznych.....	165
7.2. Polerowanie	171
7.3. Identyfikacja fazy γ'	177
7.4. Charakterystyka jakościowa fazy γ'	179
7.4.1. Wydzielenia fazy γ' po obróbce cieplnej	179
7.4.2. Wydzielenia fazy γ' o kształcie motyla.....	185
7.4.3. Wydzielenia fazy γ' powstające w warunkach pełzania	187

7.5. Ocena ilościowa fazy γ' 189

7.5.1. Zróznicowanie wydzielen w osi dendrytów, przestrzeniach międzydendrytycznych, eutektyce i w pobliżu kolonii eutektycznych 189

7.5.2. Porównanie wyników parametrów opisujących wydzielenia fazy γ' z uwzględnieniem pomiarów w trzech zróznicowanych mikroobszarach struktury nadstopu na osnowie niklu i przy losowym wyborze miejsc do analizy 192

7.5.3. Wydzielenia fazy γ' I, II i III rzędu 200

7.5.4. Wydzielenia fazy γ' po obróbce cieplnej 204

7.5.5. Wydzielenia fazy γ' a stabilność strukturalna nadstopu 206

7.6. Metoda analizy obrazów 209

7.6.1. Krytyczna analiza danych literaturowych na temat ilościowego opisu fazy γ' 209

7.6.2. Weryfikacja parametrów fazy γ' za pomocą techniki FIB-SEM 214

7.7. Ustalanie niezbędnej liczby pomiarów, oszacowanie błędów pomiarowych i testowanie powtarzalności wyników badań 214

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI 219

BIBLIOGRAFIA..... 226

Streszczenie..... 260

CONTENTS

LIST OF DESIGNATIONS AND TERMS USED	11
1. INTRODUCTION	15
Rationale for undertaking the topic and purpose of the work	19
2. MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF NICKEL-BASED SUPERALLOYS	22
2.1. Microstructure of nickel-based superalloys as an effect of manufacturing and processing processes	22
2.2. Chemical and phase composition of nickel-based superalloys	27
2.3. γ' (gamma prime) phase and its stability in nickel-based superalloys	41
2.4. Mechanisms of strengthening in nickel-based superalloys	45
2.4.1. Solid solution hardening	48
2.4.2. Precipitation hardening	50
2.4.3. Dislocation strengthening	50
2.4.4. Dispersion reinforcement	63
2.4.5. Reinforcement of grain boundaries	64
2.4.6. Strengthening by anisotropy	65
2.5. Microstructure of nickel-based superalloys	65
2.6. Properties of nickel-based superalloys	68
2.6.1. Creep resistance	76
3. IMPORTANCE OF MORPHOLOGICAL AND STEREOLOGICAL PARAMETERS OF γ' PHASE PRECIPITATES IN NICKEL-BASED SUPERALLOYS	84
3.1. Precipitation of γ' phase and creep resistance	84
3.2. The rafting phenomenon – coagulation and coalescence of γ' phase precipitates	86
3.3. Influence of chemical composition and manufacturing technology on volume fraction, size, shape and distribution of γ' phase precipitates in nickel-based superalloys	93
3.4. Volume fraction of γ' phase precipitates as the main criterion for selection of chemical composition of nickel-based superalloys	98

3.5. Effect of morphological and stereological parameters of γ' phase on the properties of nickel-based superalloys..... 105

4. PRECIPITATES OF THE γ' PHASE IN $(\gamma+\gamma')$ EUTECTICS IN NICKEL-BASED SUPERALLOYS 115

4.1. Influence of chemical composition and manufacturing technology on volume fraction, size, shape and distribution of precipitates of γ' phase in $(\gamma+\gamma')$ eutectics 115

4.2. Effect of morphological and stereological parameters of the $(\gamma+\gamma')$ eutectics in nickel-based superalloys on their properties 119

5. CHANGES IN THE VOLUME FRACTION, SIZE, SHAPE AND DISTRIBUTION OF THE γ' PHASE PRECIPITATES AND THE $(\gamma+\gamma')$ EUTECTICS IN NICKEL-BASED SUPERALLOYS DURING THEIR HEAT TREATMENT 121

5.1. Influence of casting structure on heat treatment of nickel-based superalloys 121

5.2. The essence of heat treatment of cast nickel-based superalloys 124

5.3. Design of heat treatment of cast nickel-based superalloys..... 138

5.4. Optimum microstructure after heat treatment 139

6. METHODS FOR DETERMINING THE VOLUME FRACTION AND CHARACTERIZING THE SIZE, SHAPE AND DISTRIBUTION OF γ' PHASE PRECIPITATES IN POLYCRYSTALLINE AND DIRECTIONAL SOLIDIFIED NICKEL-BASED SUPERALLOYS..... 142

6.1. Quantitative metallography 142

6.2. X-ray structural analysis 151

6.3. X-ray tomography..... 153

6.4. Electron tomography 158

6.5. Atomic tomography 161

6.6. Other methods..... 164

7. COMPREHENSIVE PROCEDURES FOR DETERMINING THE VOLUME FRACTION AND CHARACTERIZATION OF γ' PHASE PRECIPITATES IN POLYCRYSTALLINE AND DIRECTIONAL SOLIDIFIED NICKEL-BASED SUPERALLOYS. 165

7.1. Sample preparation for metallographic studies 165

7.2. Polishing 171

7.3. Identification of the γ' phase..... 177

7.4. Qualitative characteristics of the γ' phase..... 179

7.4.1. Precipitates of γ' phase after heat treatment 179

7.4.2. Butterfly-shaped γ' phase precipitates 185

7.4.3. Precipitates of γ' phase under creep conditions 187

7.5. Quantitative evaluation of the γ' phase	189
7.5.1. Differentiation of precipitates in: dendrite axes, interdendritic spaces, eutectics and near eutectic colonies	189
7.5.2. Comparison of results of parameters describing precipitates of γ' phase considering measurements in three different micro-areas of superalloy structure on nickel-based and with random selection of sites for analysis	192
7.5.3. Primary, secondary and tertiary γ' phase precipitates.....	200
7.5.4. Precipitates of γ' phase after heat treatment	204
7.5.5. Precipitates of γ' phase and structural stability of superalloy.....	206
7.6. Image analysis method	209
7.6.1. Critical analysis of literature data on the quantitative description of γ' phase	209
7.6.2. Verification of γ' phase parameters by FIB-SEM technique	214
7.7. Determining the necessary number of measurements, analyzing measurement errors and testing the repeatability of test results.....	214
8. SUMMARY AND CONCLUSIONS.....	219
BIBLIOGRAPHY	226
Abstract.....	263