

Spis treści

Streszczenie	9
Summary	11
Wykaz ważniejszych oznaczeń	13
Wprowadzenie	15
1. Monokrystaliczne nadstopy niklu – charakterystyka	17
1.1. Fazy w monokrystalicznych nadstopach niklu	21
1.1.1. Faza γ	22
1.1.2. Faza γ'	23
1.1.3. Węglik	24
1.1.4. Fazy topologicznie zwanie wypełnione (TCP)	24
1.2. Generacje monokrystalicznych nadstopów niklu	25
1.3. Mikrostruktura po krystalizacji	27
1.4. Obróbka cieplna	29
2. Odkształcenie monokrystalicznych nadstopów niklu	33
2.1. Odkształcenie fazy γ	33
2.2. Odkształcenie fazy γ'	34
2.3. Odkształcenie nadstopów niklu z dużym ułamkiem objętości fazy γ'	39
3. Pełzanie	44
3.1. Pełzanie w jednoosiowym stanie naprężeń	44
3.1.1. Pełzanie dyslokacyjne	46
3.1.2. Pełzanie dyfuzyjne	47
3.2. Pełzanie monokrystalicznych nadstopów niklu	49
3.3. Mechanizmy pełzania monokrystalicznych nadstopów niklu	49
3.3.1. Zakres niskich temperatur i wysokich naprężeń	50
3.3.1.1. Poślizg dyslokacji w fazie γ	51
3.3.1.2. Przecinananie wydzielen fazy γ' przez dyslokacje	51

3.3.2. Zakres średnich temperatur i średnich naprężeń	53
3.3.2.1. Poślizg dyslokacji w fazie γ	54
3.3.2.2. Tworzenie siatek dyslokacyjnych	54
3.3.3. Zakres wysokich temperatur i niskich naprężeń	56
3.3.3.1. Poślizg i wspinanie dyslokacji w fazie γ	57
3.3.3.2. Koagulacja wydzieleni fazy γ'	57
3.3.3.3. Rafting	58
3.3.3.4. Koagulacja mikrostruktury płytkowej γ/γ' po raftingu	62
3.3.3.5. Przecinanie płytek fazy γ' przez dyslokacje	63
4. Podsumowanie przeglądu literatury i cel pracy	64
5. Materiał do badań	66
6. Metodyka badań	68
6.1. Próby pełzania	68
6.2. Badania mikroskopowe	68
6.3. Ilościowa analiza mikrostruktury	72
6.4. Dyfrakcja promieni rentgenowskich	74
7. Mikrostruktura po obróbce cieplnej	75
7.1. Mikrostruktura nadstopu CMSX-4	75
7.2. Mikrostruktura nadstopu CM186LC	84
8. Próby pełzania	91
8.1. Pełzanie w niskich temperaturach i wysokich naprężeniach	91
8.2. Pełzanie w wysokich temperaturach i niskich naprężeniach	93
9. Mikrostruktura nadstopów CMSX-4 i CM186LC po pełzaniu	95
9.1. Zmiany mikrostruktury po pełzaniu w niskich temperaturach i wysokich naprężeniach	95
9.1.1. Dyslokacje w fazie γ	95
9.1.2. Przecinanie wydzieleni fazy γ' przez dyslokacje	100
9.1.3. Oszacowanie energii błędu ułożenia i energii granicy antyfazowej w fazie γ'	106
9.1.4. Ustalenie dominującego mechanizmu odkształcenia w pierwszym stadium pełzania	107
9.1.5. Podstruktura dyslokacyjna na granicach γ/γ'	109
9.1.6. Dyslokacje w obszarach eutektycznych	110
9.2. Zmiany mikrostruktury po pełzaniu w wysokich temperaturach i niskich naprężeniach	110
9.2.1. Zmiany kształtu wydzieleni fazy γ'	112

9.2.2. Poślizg i wspinanie dyslokacji w fazie γ	115
9.2.3. Tworzenie siatek dyslokacyjnych	116
10. Mikrostruktura łopatki z nadstopu CMSX-4 po eksploatacji w energetycznej turbinie gazowej	121
10.1. Zmiany kształtu wydzieleni fazy γ'	121
10.2. Podstruktura dyslokacyjna	127
11. Podsumowanie i dyskusja wyników badań	130
12. Wnioski	136
Podziękowanie	139
Literatura	141