

Spis treści

Streszczenie	9
Summary	12
Wykaz ważniejszych oznaczeń i akronimów	15
1. Wstęp	17
2. Wprowadzenie do tomografii	20
3. Matematyczne podstawy tomografii	23
3.1. Metody rekonstrukcji stosowane w tomografii	24
3.2. Zastosowanie dwuwymiarowego przekształcenia Fouriera do jakościowej i ilościowej analizy obrazu	30
3.2.1. Wykorzystanie dwuwymiarowego przekształcenia Fouriera do określania wymiarów oraz pola powierzchni elementów obrazu.	33
3.2.2. Wykorzystanie dwuwymiarowego przekształcenia Fouriera do analizy uporządkowania elementów obrazu	35
3.2.3. Wykorzystanie dwuwymiarowego przekształcenia Fouriera do określania zorientowania elementów obrazu – mikroskop świetlny	37
3.2.4. Wykorzystanie dwuwymiarowego przekształcenia Fouriera do określania zorientowania elementów obrazu – transmisyjny mikroskop elektronowy	40
3.2.5. Zastosowanie dwuwymiarowego przekształcenia Fouriera do analizy obrazów wysokorozdzielczych HRTEM	42
3.2.6. Dwuwymiarowe przekształcenie Fouriera w analizie uprządkowania elementów struktury – podsumowanie.....	43
3.3. Zastosowanie przekształcenia Fouriera do rekonstrukcji obrazów w tomografii	44
3.3.1. Rekonstrukcja obrazu tomograficznego metodą wstecznej projekcji	45
3.3.2. Metoda ważonej wstecznej projekcji	47

3.3.3. Metody iteracyjne stosowane w rekonstrukcji obrazów tomograficznych.....	48
3.3.4. Dyskretne metody rekonstrukcji tomograficznej.....	50
3.4. Zniekształcenie obrazów tomograficznych.....	52
4. Tomografia elektronowa TEM.....	53
4.1. Rozdzielczość w jednoosiowej tomografii.....	59
4.2. Metody obrazowania.....	62
4.2.1. Obrazowanie TEM–BF.....	62
4.2.2. Obrazowanie STEM–HAADF.....	63
4.2.3. Obrazowanie EFTEM.....	67
4.2.4. Podsumowanie obrazowania w tomografii elektronowej.....	69
4.3. Metody rekonstrukcji stosowane w tomografii elektronowej TEM.....	71
4.4. Segmentacja i wizualizacja w 3D.....	72
5. Przykłady zastosowania tomografii TEM do obrazowania 3D elementów mikrostruktury materiałów inżynierskich.....	73
5.1. Obrazowanie 3D cząstek grafitu i nanocząstek złota.....	73
5.2. Obrazowanie 3D węglikoazotków w stali.....	74
5.3. Obrazowanie 3D cząstek tlenków w stopie Incoloy MA956.....	79
5.4. Obrazowanie 3D cząstek umacniających w nadstopie niklu Inconel 718.....	83
5.5. Obrazowanie w 3D wydzielań w stopie CMSX-4, tomografia STEM–EDX.....	88
6. Tomografia elektronowa FIB–SEM.....	92
6.1. Historia technologii FIB.....	95
6.2. Zogniskowana wiązka jonów – FIB.....	96
6.2.1. Artefakty przy ścienianiu wiązką jonów.....	97
6.3. Obrazowanie w SEM.....	98
6.3.1. Wpływ energii elektronów na wyniki obrazowania tomograficznego.....	103
6.3.2. Dobór powiększenia i przygotowanie próbki do obrazowania tomograficznego w SEM.....	105
6.4. Tomografia FIB–SEM–EBSD.....	107
6.5. Przetwarzanie danych i segmentacja.....	108
7. Zastosowanie tomografii FIB–SEM do wizualizacji i metrologii elementów struktury materiałów metalicznych.....	111
7.1. Obrazowanie FIB–SEM mikrostruktury stopu IN 718.....	113
7.2. Obrazowanie FIB–SEM mikrostruktury stopu W–TiC.....	118
7.3. Obrazowanie FIB–SEM mikrostruktury stali 13HMF.....	126

7.4. Obrazowanie FIB–SEM cząstek tlenków w stopie Incoloy MA956	133
7.5. Obrazowanie FIB–SEM wydzieliń fazy γ' w nadstopie niklu CMSX-4.....	136
7.6. Obrazowanie FIB–SEM wydzieliń fazy γ' w nadstopie niklu PWA 1497.....	151
8. Tomografia elektronowa – podsumowanie	156
Podziękowania	160
Literatura.....	161