

## INDICE

**I- DIFETTI RETICOLARI**

<b>I.1 Disordine termico</b> .....	1
<b>I.2 Difetti di punto</b> .....	3
Distorsione reticolare .....	4
Energia di formazione .....	4
Energia di migrazione .....	4
<b>I.2.1 Vacanze</b> .....	5
Concentrazione di vacanze in equilibrio ad una determinata temperatura .....	5
Vacanze ottenute per tempra .....	7
Migrazione di vacanze .....	8
Velocità di migrazione delle vacanze .....	8
Misure sperimentali della concentrazione di vacanze .....	9
Le sorgenti di vacanze nei metalli .....	10
<b>I.2.2 Atomi sostituzionali</b> .....	12
<b>I.2.3 Atomi interstiziali</b> .....	12
<b>I.2.4 Autointerstiziali</b> .....	13
<b>I.2.5 Difetti complessi</b> .....	14
Alterazione delle proprietà meccaniche indotta dai difetti di punto .....	16
<b>I.3 Dislocazioni</b> .....	18
Diversi tipi di dislocazioni .....	19
Dislocazioni irregolari .....	22
Distorsione attorno ad una dislocazione .....	23
Segno di una dislocazione .....	24
Densità di dislocazioni .....	24
Movimento delle dislocazioni .....	24
Forza agente su una dislocazione .....	27
Energia di una dislocazione .....	28
Tensione di linea .....	30
Interazioni tra dislocazioni .....	32
Interazione di dislocazioni con impurità .....	36
Origine e moltiplicazione delle dislocazioni .....	38
Sorgenti di Frank-Read .....	41
Tecniche sperimentali per studiare le dislocazioni .....	42
<b>I.4 Difetti di superficie</b> .....	43
<b>I.4.1 Superfici tra fasi diverse</b> .....	43
Misura dell'energia superficiale .....	45
Adsorbimento .....	47
<b>I.4.2 Difetti di impilamento (stacking faults)</b> .....	48
Dislocazioni parziali e stacking faults .....	48
<b>I.4.3 Bordi di grano</b> .....	52
Giunti a basso angolo .....	54

Energia dei bordi a basso angolo .....	56
Giunti ad alto angolo .....	57
Modello del giunto basato sulle unità strutturali .....	59
Migrazione dei bordi di grano attivata termicamente .....	60
Effetti chimici ai bordi di grano .....	64
Dimensione media del grano .....	64
Area del bordo di grano .....	64
Forma del grano .....	65
Orientazione del grano .....	65
<b>I.4.4 Geminati</b> .....	66
Geminati coerenti ed incoerenti .....	68
<b>I.4.5 Superfici tra fasi solide diverse</b> .....	70
<b>II- DEFORMAZIONE PLASTICA</b>	
<b>II.1 Geometria dello scorrimento</b> .....	73
<b>II.2 Linee di scorrimento</b> .....	75
<b>II.3 Deformazione di monocristalli</b> .....	76
Curve $\tau$ - $\varepsilon$ dei metalli e.c. ....	79
Curve $\tau$ - $\varepsilon$ dei metalli c.f.c. ....	79
Curve $\tau$ - $\varepsilon$ dei metalli c.c.c. ....	80
<b>II.4 Deformazione di policristalli</b> .....	80
Effetto della temperatura .....	81
<b>II.5 La legge di Cottrell-Stokes</b> .....	82
<b>II.6 Teorie dell'incrudimento</b> .....	83
Teoria di Taylor [1934] .....	84
Teoria di Seeger [1961] .....	85
Teoria di Kuhlmann-Wilsdorf [1962] .....	89
<b>II.7 Come spiegare la dipendenza dello sforzo di deformazione dalla temperatura?</b> .....	89
<b>II.8 Superplasticità</b> .....	92
<b>II.9 Resistenza meccanica ad alta temperatura</b> .....	95
Il creep.....	95
Analisi delle curve di creep.....	97
Misura dell'energia di attivazione $Q$ .....	99
Scorrimento delle dislocazioni.....	103
Formazione di sub-grani.....	103
Scorrimento del bordo di grano.....	103
Variazioni strutturali durante il creep.....	103
Deformazione di monocristalli.....	103
Deformazione di policristalli.....	104
La natura del creep.....	105
Regole generali per migliorare la resistenza a creep.....	107
Applicazione pratica delle curve di creep.....	107

---

Test di stress-rottura.....	108
Frattura transcristallina e intercristallina.....	109
Presentazione dei dati di creep.....	111
Il parametro di Larson-Miller.....	111

### **III- MECCANISMI DI RAFFORZAMENTO NEI METALLI**

<b>III.1 Dimensione del grano cristallino</b> .....	115
<b>III.2 Strutture con più fasi metalliche</b> .....	117
<b>III.3 Indurimento da soluzione solida</b> .....	119
<b>III.4 Indurimento da precipitazione</b> .....	124
<b>III.5 Indurimento dovuto a dispersione di particelle ceramiche fini</b> .....	129
<b>III.6 Rafforzamento dovuto a fibre</b> .....	131
<b>III.7 Strutture di incrudimento</b> .....	134
<b>III.8 Tessiture</b> .....	135

### **IV- RECUPERO, RICRISTALLIZZAZIONE E CRESCITA DEL GRANO**

<b>IV.1 Energia immagazzinata durante la deformazione plastica</b> .....	140
<b>IV.2 Recupero</b> .....	141
Formazione dei sub-grani .....	141
Studio dell'evoluzione strutturale .....	145
<b>IV.3 Ricristallizzazione</b> .....	147
Le leggi della ricristallizzazione .....	147
Formazione dei nuclei di ricristallizzazione .....	147
Migrazione di un bordo di grano indotta da stress .....	148
Crescita dei nuovi grani .....	148
Effetto della temperatura sulla cinetica di ricristallizzazione .....	149
Effetto della dimensione del grano iniziale sulla cinetica di ricristallizzazione ..	150
La temperatura di ricristallizzazione .....	151
<b>IV.4 Crescita del grano</b> .....	151
Fattori che influenzano la crescita del grano .....	152

### **V- SOLIDIFICAZIONE**

<b>V.1 Termodinamica e cinetica della solidificazione</b> .....	155
<b>V.2 Nucleazione omogenea</b> .....	155
<b>V.3 Embrioni nel liquido</b> .....	158
Velocità di nucleazione omogenea $N_{hom}$ .....	158
<b>V.4 Nucleazione eterogenea</b> .....	159
<b>V.5 Gli inoculanti</b> .....	162
<b>V.6 La velocità di crescita</b> .....	162
<b>V.7 Solidificazione di metalli puri e leghe</b> .....	163
<b>V.8 Solidificazione unidirezionale di un metallo puro</b> .....	163
<b>V.9 Solidificazione delle leghe (sottoraffreddamento costituzionale)</b> .....	166

---

---

<b>V.10 Solidificazione monodirezionale di una lega con 2 componenti</b> .....	166
<b>V.11 Distribuzione del soluto nel liquido avanti all'interfaccia S-L</b> .....	167
<b>V.12 Condizione per avere sottoraffreddamento costituzionale</b> .....	170
<b>V.13 Strutture di solidificazione</b> .....	172
<b>V.14 Controllo delle strutture di solidificazione</b> .....	173
<b>V.15 Segregazione</b> .....	176
<b>V.16 Distribuzione del soluto nella solidificazione monodirezionale</b> .....	177
<b>V.17 Macrosegregazione e microsegregazione</b> .....	179
<b>V.18 Porosità</b> .....	180

## **VI- METALLURGIA DELLE POLVERI**

<b>VI.1 Principali vantaggi</b> .....	185
<b>VI.2 Principali svantaggi</b> .....	185
<b>VI.3 Tipologie dei prodotti sinterizzati</b> .....	185
<b>VI.4 Gli stadi della metallurgia delle polveri</b> .....	186
La produzione delle polveri .....	186
La pressatura delle polveri .....	187
L'aggiunta di lubrificante .....	188
La sinterizzazione .....	189
<b>VI.5 Le lavorazioni complementari</b> .....	190
<b>VI.6 I meccanismi della sinterizzazione</b> .....	191
Meccanismi di sinterizzazione: materiali monofasici .....	191
Meccanismi di sinterizzazione: materiali polifasici .....	192
<b>VI.7 Processi innovativi nella metallurgia delle polveri</b> .....	193
Pressatura isostatica a freddo .....	193
Pressatura isostatica a caldo .....	193
Formatura delle polveri direttamente in atomizzazione .....	194
Spark Plasma Sintering (SPS) .....	194
<b>VI.8 Comparazione dei costi della metallurgia delle polveri con quelli di altri processi</b> .....	194
Confronto con lavorazione per asportazione di truciolo .....	194
Confronto con la lavorazione senza asportazione di truciolo .....	195

## **VII- SVILUPPO E PERFEZIONAMENTO DI NUOVI MATERIALI**

<b>VII.1 Leghe in condizioni di non equilibrio termodinamico</b> .....	197
<b>VII.1.1 Leghe amorfe</b> .....	197
<b>VII.1.2 Leghe con grano ultrafine</b> .....	201
<b>VII.1.3 Leghe in parte amorfe in parte nanocristalline</b> .....	204
<b>VII.1.4 Soluzioni solide sovrassature</b> .....	205
<b>VII.2 Sinterizzati con densità molto alta</b> .....	206
<b>VII.3 Schiume metalliche</b> .....	206
<b>VII.3.1 Metodi di produzione</b> .....	207
<b>VII.3.2 Realizzazione di forme complesse</b> .....	210

---

<b>VII.3.3 Applicazioni strutturali.....</b>	<b>212</b>
<b>VII.3.4 Applicazioni funzionali.....</b>	<b>213</b>
<b>VII.3.5 Problemi e sviluppi della ricerca.....</b>	<b>214</b>
<b>VII.4 Acciai a composizione controllata per applicazioni strutturali nei futuri reattori a fusione nucleare.....</b>	<b>215</b>
<b>VII.5 Materiali con proprietà funzionalmente graduate.....</b>	<b>215</b>
<b>VII.6 Leghe ad alta entropia.....</b>	<b>216</b>
<b>VII.7 Manifattura Additiva.....</b>	<b>219</b>

---