

10章 問題解答

予習

1.

(1) ① 固溶体 ② 固溶強化 ③ 置換 ④ 侵入

(2) ⑤ 析出 ⑥ 析出強化

2.

(1) ⑦ クリープ ⑧ クリープ強さ ⑨ クリープ破断強さ ⑩ クリープ破断寿命

(2) ⑪ クロム ⑫ Cr₂O₃膜

演習問題A

10-A1

1) ニッケル-銅合金

モネル 400 等のモネル合金が代表例で、耐食性、加工性に優れることから、船舶や石油精製プラントなどの耐食材料として使用されている。

2) ニッケル-クロム合金

ニクロム線とも呼ばれる Ni-20Cr 合金や耐熱超合金が代表的なニッケル-クロム合金である。電気抵抗が高く耐酸化性に優れることから、電熱線や耐熱材料として使用されている。

3) ニッケル-鉄合金

PC パーマロイが代表的な合金で、電磁特性に優れていることから、電子機器部品の材料として用いられている。

4) ニッケル-モリブデン合金

ハステロイ B に代表される合金で、塩酸や硫酸に強いことから、塩酸や硫酸に対する耐食材料として用いられる。

5) ニッケル-チタン合金

代表的な合金としてニチノールが挙げられ、形状記憶特性や超弾性特性に優れていることから、眼鏡のフレームや歯科矯正用ワイヤー、人工衛星のアンテナ材料などに用いられている。

10-A2

γ' 相形成元素の添加量が比較的 low 鍛造加工が可能な合金である。鍛造加工により結晶粒を微細化することが可能であり、室温強度や疲労強度が高いのが特徴である。代表的な合金として IN718 合金や HASTELLOY-X 等があり、主にガスタービンディスクなど中温度で強度が要求される部材として用いられている。

10-A3

1) 普通鑄造法

ロストワックス法により製品形状を有する鑄型を作り，そこに真空溶解したマスターインゴットを注いで製品を作る方法。粗大結晶粒からなる多結晶構造組織となる。

2) 一方向凝固法

ロストワックスで準備した鑄型を水冷板上に設置し，鑄型に溶湯を注いだのちに炉から引き抜いていき，結晶粒を一方向に成長させて製品を作る方法。結晶成長方向と直交する結晶粒界がない組織となる。

3) 単結晶法

一方向凝固法の鑄型の下部に結晶成長制御回路を設けて単一の結晶粒のみを成長させて製品を作る方法。結晶粒界を完全に排除した単結晶超合金が得られる。

・高温における結晶粒界の影響

クリーブ破壊に代表される高温での材料の破壊は負荷応力に直交する結晶粒界におけるボイドやキャビティの発生・成長が起点となる場合が多く，したがって，結晶粒界，特に負荷方向と垂直に近い位置関係を有する結晶粒界は高温での強度劣化の原因となる。

10-A4

鑄造超合金の主たる強化機構は γ' 析出物による析出強化である。 γ' 相とは， Ni_3Al の金属間化合物で，fcc 結晶構造の面心位置にニッケル原子が，頂点の位置にアルミニウム原子が規則的に配置した L1_2 構造と呼ばれる規則的な結晶構造を持っている。 γ' 相は母相である γ 相に整合析出し，熱力学的にも安定である。 γ' 相は 800°C 程度までは，温度上昇に伴い強度が増加する逆温度依存性を有している。析出強化の他に，母相の γ 相の固溶強化も高温強度向上に寄与している。

10-A5

鑄造超合金のクリーブ強度を向上させる主な因子としては，以下の4つがあげられる。

- 1) 負荷と垂直な結晶粒界：クリーブ破壊の主な起点が負荷方向と垂直な結晶粒界であるため，結晶粒径を大きくしてその密度を減少させることや，一方向凝固あるいは単結晶化させて負荷方向と垂直な結晶粒界を取り除くことにより，クリーブ強度が向上する。
- 2) ラフト組織：鑄造超合金がクリーブ変形を受けると γ/γ' 組織がラフト化する。ラフト組織はクリーブ負荷による転位の運動を阻害し，クリーブ強度を高めると考えられている。
- 3) γ' 相の体積率： γ' 相が有する強度の逆温度依存性により γ' 相の体積率が高くすることで，クリーブ強度の向上が期待できる。ただし， γ' 相の体積率が約 65% で高温強度が極大値を示し，それ以上では逆に強度が低下する。
- 4) 材料の融点：融点を下げる元素を取り除き融点を上昇させることによりクリーブ強度の

向上が期待できる。単結晶超合金は融点を下げる粒界強化元素を含まないため融点が高く、したがって、一方向凝固超合金よりクリープ強度に優れる。

※ 演習問題 B については、正答はありません。皆さん自身が考えたり、調べたりした結果に基づいて解答してもらうことを考えています。したがって、以下はあくまで解答例です。

演習問題 B

10-B1 解答例

耐食性に優れ、比較的安価で加工性が良いことから、キッチンのシンク等の材料として Ni を多量に含むステンレス鋼が使われている。

電気抵抗が高く耐酸化性に優れることから、加熱器や電気コンロに Ni-20Cr 合金製のニクロム線が使われている。

10-B2 解答例

一般的に、フェライト鋼やステンレス鋼に比べ、ニッケル基の耐熱超合金は高価であることから、コストの面でニッケル基の耐熱超合金の使用は必要最小限に押さえるべきである。しかし、温度が高くなり高温強度や耐酸化性の観点からフェライト鋼やステンレス鋼の使用が困難な条件では、ニッケル基の耐熱超合金が使用される。

なお、耐食性・耐酸化性の観点からはフェライト鋼はステンレス鋼やニッケル基耐熱用合金に劣るものの、フェライト鋼の熱膨張係数が小さいため温度分布等による熱応力が小さくなることから、蒸気タービンなどの使用が可能な温度環境下ではフェライト鋼が使われることが多い。

10-B3 解答例

ニッケルを含まないニッケルフリーのステンレス鋼やチタン合金に変更することにより対応する。例えば、Ni-Ti 系の形状記憶合金から bcc 構造を有する β 型の Ti-Cr-Sn-Zr 合金などへ変更して対応する。