

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Precipitation of Laves phase in eutectoid type reaction: δ -Fe $\rightarrow$ γ -Fe + Laves in Fe-Cr based ferrous alloys
著者(和文)	袁哲韜
Author(English)	Zhetao Yuan
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11770号, 授与年月日:2022年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小林 寛,竹山 雅夫,史 蹟,村石 信二,上田 光敏
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11770号, Conferred date:2022/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第		号	学位申請者氏名	袁テツトウ	
論文審査 審査員		氏 名	職 名		氏 名	職 名
	主査	小林 寛	准教授	審査員	上田 光敏	准教授
	審査員	竹山 雅夫	教授			
		史 蹟	教授			
		村石 信二	准教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「Precipitation of Laves phase in eutectoid type reaction: δ -Fe $\rightarrow$ γ -Fe+Laves in Fe-Cr based ferrous alloys」と題し、以下の5章から構成されている。

第1章「General Introduction」では、火力発電はミドルまたはベースロード電源としてこれまで高効率化に向けて蒸気条件の向上がなされてきたこと、今後期待される脱炭素社会の実現においても電力の安定供給と脱炭素化の両立を可能にする不可欠な電源であると述べている。また、蒸気タービン発電の大型高温部材に使用されている高Crフェライト系耐熱鋼において炭化物の粗大化等に起因したクリープ強度の低下が生じる問題が起きていること、粗大化に対する優れた安定性が期待される Laves 相 (Fe_2M) が、 δ -Fe 相の共析型分解反応経路 ($\delta\rightarrow\gamma\text{-Fe}+\text{Fe}_2\text{M}$) における相界面析出により微細分散することが最近見出され、その知見を新たな強化相として利用するためには同分解反応経路における析出機構の理解と制御が課題となることを指摘し、本研究の意義、目的および構成について述べている。

第2章「Phase Equilibria in the Fe-Cr-M (M: Hf, Ta) Ternary Systems」では、本研究において着目する Fe-Cr-Hf および Fe-Cr-Ta 3 元系における $\delta/\gamma/\text{Fe}_2\text{M}$ 3 相間の相平衡を調べている。その結果、擬共析反応トラフ ($\delta\rightarrow\gamma+\text{Fe}_2\text{M}$) が 9.5 at.%Cr 等濃度縦断面において、Fe-Cr-Hf 3 元系では 1220 °C/0.1 at.%Hf、Fe-Cr-Ta 3 元系では 1150 °C/0.6 at.%Ta において存在し、いずれの系においても Cr 濃度の低下に伴い高温高 M 濃度側に移行することを見出している。また、先行研究において報告されている Fe-Cr、Fe-Hf、Fe-Ta 各 2 元系状態図および本研究で得られた Fe-Cr-Hf および Fe-Cr-Ta 3 元系状態図の結果を再現するように各相の 3 元相互作用因子を調整した熱力学データベースを構築し、それを用いた状態図計算により、両 3 元系の δ 相の共析型分解経路 ($\delta\rightarrow\gamma\text{-Fe}+\text{Fe}_2\text{M}$) における $\delta\rightarrow\gamma$ 変態および Laves 相の析出に対する過飽和度を異なる Cr 濃度を有する合金において見積もっている。

第3章「Effect of γ growth rate on the competition of the precipitation modes: interphase precipitation vs. fibrous precipitation」では、第2章で得た状態図の知見に基づき、Laves (Fe_2Ta) 相の析出に対する過飽和度を固定しつつ $\delta\rightarrow\gamma$ 変態に対する過飽和度を系統的に変化させた Fe-Cr-Ta 3 元共析合金を準備し、上記共析型分解経路における析出モードの競合 (相界面析出またはファイバー状析出) の支配因子について調べている。その結果、 Fe_2Ta 相の析出モードは γ 相の成長速度の増加に伴いファイバー状析出から相界面析出に変化することを見出し、この析出モードの遷移は、 γ 相の成長速度と棒状 Laves 相の長手方向の成長速度の競合により半定量的に説明されると述べている。

第4章「Effects of Laves phase forming element on the nucleation of interphase precipitation」では、第2章で得た状態図の知見に基づき、 $\delta\rightarrow\gamma$ 変態および Laves (Fe_2Hf および Fe_2Ta) 相の析出に対する過飽和度を種々に変化させた Fe-Cr-Hf および Fe-Cr-Ta 3 元合金を準備し、 γ 相の成長速度を変えて上記共析型分解経路による Laves 相の相界面析出の有無を調べている。その結果、相界面析出の生じる γ 相の上限成長速度を Hf 添加合金では 150 $\mu\text{m/s}$ 、Ta 添加合金では 5-8 $\mu\text{m/s}$ と見積もっている。また、レッジ機構による相界面析出モデルにより相界面析出の上限核生成速度を見積り、Hf 添加合金では 1 ms 未満に対し、Ta 添加合金では 数 10 ms となることを見出している。また、認められた合金元素による核生成速度の違いは、Laves 相の析出に対する化学的駆動力の違いにより説明されると述べている。

第5章「Improvement in heat treatability to achieve a fine dispersion of Laves phase through interphase precipitation」では、上記共析型分解経路において Laves 相が δ 相中に直接析出する反応 (直接析出) に着目して合金元素の効果を調べている。直接析出の速度は Hf 添加合金に比べて Ta 添加合金において 2~3 桁遅いこと、直接析出は相界面析出に対して高温側でより遅くなり、両析出モードの開始線の時間差は Hf 添加合金では 10 s 程度と短いものに対し、Ta 添加合金 60 s 程度と長いことを見出している。この両析出モードの時間差および前章において得られた相界面析出速度を考慮すると、肉厚の大きい材料中に相界面析出により Laves 相を微細分散する場合には、Laves 相の析出の駆動力を低減し析出速

度を低下させ、 γ 相の成長速度を Laves 相の核生成が生じる速度に調整する方法が有効であると提案している。

第 6 章「General Summary」では、本研究で得られた知見を総括している。

以上を要するに、本論文は、高 Cr フェライト系耐熱鋼の新たな強化法として期待される δ -Fe 相の共析型分解反応経路 ($\delta \rightarrow \gamma\text{-Fe} + \text{Fe}_2\text{M}$) における Laves 相の析出を相平衡および組織形成の観点から調べ、その機構と合金元素の効果に基づいて組織制御法の指針を提案するものであり、工学上ならびに工業上貢献するところが大きく、よって本論文は博士（工学）の学位論文として十分価値があるものと認められる。