

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	TiAl基合金における組織構成要素の機械的特性と組織設計 — β -Ti相の役割と酸素の影響—
Title(English)	Mechanical Properties of Microstructure Constituents and Microstructure Design in TiAl Base Alloys: Role of β -Ti Phase and Effect of Oxygen
著者(和文)	岡田陽太郎
Author(English)	Yotaro Okada
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第289号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小林 寛,藤居 俊之,木村 好里,村石 信二,小林 郁夫,竹山 雅夫
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第289号, Conferred date:2025/3/26, 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

(博士課程)

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		岡田 陽太郎	
論文審査 審査員		氏 名		職 名		氏 名	職 名
	主査	小林 覚		准教授	審査員	小林 郁夫	准教授
	審査員	藤居 俊之		教授		竹山 雅夫	特任教授
		木村 好里		教授			
		村石 信二		教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「Mechanical Properties of Microstructure Constituents and Microstructure Design in TiAl Base Alloys: Role of β-Ti Phase and Effect of Oxygen」と題し、8 章から構成されている。 第 1 章「General Introduction」では、航空機エンジン部材としての TiAl 基合金の有用性と現状を述べるとともに、本合金はβ-Ti、α_2-Ti₃Al、γ-TiAl（以後 β、α_2、γ 相と称する）三相から構成され、α_2/γ ラメラ組織を基本としつつβ 相を導入する組織制御を行うと優れた特性を引き出し得る特徴を有することを指摘している。一方、本合金の利用拡大には、ニアネット成形を可能とする金属射出成型（MIM）や三次元積層造形（AM）など粉末プロセスに適した新たな合金が必要であり、その開発には粉末プロセスにより混入する酸素の状態図および各組織構成要素の機械的性質に及ぼす影響を明らかにし、それらの知見を利用して逆問題アプローチによる組織制御を行うことが不可欠であることを述べ、本研究の意義、目的および構成を述べている。 第 2 章「Local Deformation Analysis Using DIC Technique under <i>In-situ</i> Tensile Test」では、モデル合金を用いて α_2/γ ラメラ組織および β 粒と γ 粒からなる試料を準備し、SEM 内引張試験による変形挙動をデジタル画像相関（DIC）法により調べている。塑性変形は、他の相と共存する場合には γ 相にて優先的に生じ、特に β 相と共存する試料では引張強度および延性ともに増加すること、また、γ 単相の場合には塑性変形しないことを見出した。したがって、β 相の存在は γ 相の塑性変形を助長する効果があると推察している。 第 3 章「Formation and Characterization of β-Ti Phase in TiAl Alloys without and with Oxygen」では、前章の結果を受け、酸素無添加および添加した Ti-Al-Cr 系モデル合金を用いて、α_2/γ ラメラ組織中への β 相の形成挙動と組織形態を調べている。β 相は、酸素の有無によらず、まず粒界からセル状形態を有し、セル内が β 相と γ 相からなる不連続型（モード I）およびラメラ界面上に優先成長方位をもって板状に析出する連続型（モード II）で生成する。また、酸素の添加は β 相の形成を遅滞させ、これは酸素の添加により β 相の生成に必要な溶質元素（Cr）濃度の増大に起因すると推察している。以上より、損傷許容設計の観点から、モード I による β 相の生成は方位制御不能ラメラ粒界を制御する上で有効であると指摘している。 第 4 章「Cr Effect on Young's Modulus and Hardness of the β、α_2 and γ Phases Evaluated by Nano-indentation」では、Ti-Al-Cr 系合金に認められる $\beta/\alpha_2/\gamma$ 三相共存領域が熱処理温度によって大きく変化するという知見から、平衡組成の異なる β 相およびそれと平衡する α_2 相および γ 相のヤング率（E）と硬さ（H）に及ぼす Cr 濃度の影響をナノインデンテーション（NI）法により調べている。β 相の E は約 150 GPa と他の相よりも低く、その Cr 濃度依存性も小さい。一方、β 相の H は約 6.6 GPa であり、α_2 相と同程度、また、γ 相の約 2 倍となる。γ 相の H は Cr 濃度に依らず一定であるのに対し、β 相の H は Cr 濃度の増加に伴って大きく増大し、これは Cr の Al サイトへの占有による bcc から B2 への規則化に起因すると推察している。したがって、溶質元素濃度の高い β 相の導入は変形
--

を担う γ 相の変形能を高める効果が大きくなると指摘している。

第5章「Oxygen Effect on Young's Modulus and Hardness of the Constituent Phases Evaluated by Nano-indentation」では、酸素を 1 at.% 添加した Ti-Al-Cr 系合金の平衡化材に認められる各構成相の酸素濃度を軟 X 線分光法により同定するとともに、 E と H を NI 法により調べ、前章の結果と比較している。酸素は、 β 相にも僅かに固溶する (0.43 at.%) もの、大半は α_2 相に固溶しその濃度は 3.34 at.% と著しく増大する。しかし、 β 相の E と H の固溶酸素による増加の程度は α_2 相よりも著しく大きい。 β 相中への僅かな酸素の固溶による特性の増大効果は、八面体位置の空隙にそれよりも大きな原子半径を有する酸素の侵入によるすべり面の歪みに起因すると推察している。一方、酸素は γ 相には殆ど固溶せず (0.19 at.%), 特性の変化も認められない。以上の結果から、酸素を合金元素として利用すれば、前章と同様に β 相の導入により延性や靱性を損なわない組織設計が可能であると提案している。

第6章「Temperature Effect on Young's Modulus and Hardness of the Constituent Phases Evaluated by Nano-indentation」では、第4章と同様の Ti-Al-Cr モデル合金を用いて、TiAl 基合金の使用目標温度である 1073 K までの β 相と γ 相の E と H を高温 NI 法により取得することを世界で初めて試みている。 β 相の E は 1073 K まで殆ど変化しないが、 γ 相の E は 873 K 以上になると大きく減少する。また、 β 相の H は 1073 K において 5.0 GPa まで低下するが、室温から 1073 K まで γ 相よりも高い値を維持する。各相の相対的な特性は 1073 K においても室温と大きく変化せず、したがって、室温での特性データは 1073 K での組織設計に利用可能であること指摘している。

第7章「Utilization of Mechanical Properties of the Constituent Phases for Alloy Design」では、前章までに得た知見から、MIM および AM 両方のプロセスにより成形する動翼が既存の合金を凌駕する高温強度と室温破壊靱性を有する、という企業側の要求特性を満たす組織設計指針を提案している。すなわち、酸素を不純物ではなく合金元素の一つとして考え、 α_2/γ ラメラ組織の粒界を不連続型の析出を利用した β/γ セル状組織で被覆する手法を用いれば、要求特性を満足することを企業との共同研究により実証している。

第8章「Conclusions」では、各章で得た知見を総括している。

以上を要するに、本論文は、TiAl 基合金における各組織構成要素の特性を明らかにし、それに基づいてラメラ粒界を不連続型析出による β 相にて被覆する組織制御法を提案し、既存の合金を凌駕する特性を実証したものであり、工学上並びに工業上貢献するところが大きい。よって本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値のあるものと認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。