

氏 名	堤 三 佳
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 1764 号
学位授与の日付	平 成 10 年 9 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	工 学 研 究 科 機 械 物 理 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	FATIGUE AND CREEP FATIGUE BEHAVIOR OF HEAT RESISTANT ALLOYS WITH ANISOTROPIC AND COMPOSITE MICROSTRUCTURES (異方性・複合組織を有する耐熱合金の疲労およびクリープ疲労挙動) (主査)
論 文 調 査 委 員	教 授 大 谷 隆 一 教 授 井 上 達 雄 教 授 駒 井 謙 治 郎

論 文 内 容 の 要 旨

各種高温機器に使用される耐熱金属材料は、優れたクリープ強度を有することを第一の条件として開発されてきた。とりわけ超高温に晒されるガスタービンの高温部位用耐熱合金は、その発展過程を顧みるといづれも特有の複雑な組織によって耐クリープ性の向上が図られてきたが、将来の材料は組織の異方性および複合化によってより苛酷な条件に対処する必要がある。本研究は、このような異方性・複合組織を有する先進型合金が、最も苛酷な実働荷重条件である熱疲労において発現する破壊特性を実験によって明らかにすることを目的に実施された。

1章では、いづれも特有の異方性かつ複合性組織を有する一方向凝固ニッケル基 casting 合金 Mar-M247 (DS材)、酸化物分散強化メカニカルアロイ Inconel MA754 (ODS MA材) およびラメラ組織 casting 金属間化合物 Ti-34wt.%Al (TiAl casting 材) の3種類の先進型耐熱合金を選択した理由を述べている。また、熱疲労破壊は熱サイクル中の高温時に生じるクリープ疲労破壊あるいは低温時に生じる疲労破壊が支配要因であることに言及し、クリープに取って代わって両種の疲労に関する材料評価の重要性並びにその試験条件について説明している。

2章ではニッケル基DS材 Mar-M247について検討している。凝固方向に対して負荷方向が 0° 、 45° および 90° をなす3種類の平滑丸棒試験片を用いて、き裂発生および微小き裂成長の挙動を観察した。得られた結果は以下のである。高温クリープ疲労では、いづれの負荷方向についても粒界き裂が発生する。 0° 材では荷重軸垂直方向の粒界の除去による粒界き裂発生の抑制が期待されたものの、実際には粒界が微視的に湾曲しており、局所的に荷重軸と大きな傾きをなす部分が存在するため、そこが粒界き裂の発生源となる。ただし、発生したき裂の大部分は粒界屈曲部で停留し、成長するき裂に対しては1次デンドライトによる阻止効果が認められる。他方、 45° および 90° 材ではき裂が結晶粒界に沿って高速で成長し続け、異方性組織が不利に働くとともにデンドライト組織等の複合組織によるき裂阻止効果は認められない。つぎに、室温疲労ではき裂は casting 欠陥を起点として、あるいはすべり帯に沿って発生する。ただし、成長過程ではいづれの方位でも結晶粒界やデンドライト組織を貫通し、それらの阻止効果は認められない。以上のように負荷条件およびき裂の発生と成長過程の違いによって組織の寄与が異なることが明らかとなった。

3章ではニッケル基ODS MA材 Inconel MA754について検討している。ただし、高温クリープ疲労について、試験片の負荷方向が結晶伸長方向に一致している場合に限られる。平滑材の微小き裂は、一方向に伸長した結晶粒界を連結する荷重軸に垂直な方向の短い粒界に発生する粒界き裂と、荷重軸方向の粒界上の起点から発生する粒内き裂の2種類に分類される。前者は早期に発生するが、荷重軸方向の粒界に挟まれた状態にあるため停留する。後者のき裂は発生時期は遅いが、大きなき裂に成長し、試験片の破損をもたらす。き裂が大きくなるほど異方性粒界がき裂を阻止する効果は小さくなる。

4章ではラメラ組織 casting TiAlについて検討している。まず、ラメラが荷重方向にほぼ一致する 0° 材について、破損寿命のひずみ波形および温度依存性を調べた。特徴的な結果は、クリープ疲労条件下での粒界破壊と破損寿命の低下、疲労条件

下での初期鑄造欠陥からの粒内き裂と1073Kまでの温度上昇に伴う破損寿命の増加現象、1173Kでの顕著な表面酸化層割れ誘起破壊などである。つぎに、高温疲労およびクリープ疲労の巨視き裂成長試験を実施した。成長速度はそれぞれ有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} およびクリープJ積分範囲 ΔJ_c によって整理される。さらに、ラメラ方位が0°、45°および90°の試験片について大気中・室温で疲労試験を実施し、走査電子顕微鏡によるき裂成長過程の観察を行った。45°および90°材ではラメラに沿うき裂成長が主体であり、き裂が隣接するラメラ界面に移行することによってブリッジングが形成され、伝ば抵抗の増大がもたらされる。ただし、ラメラを垂直に突破する0°材の場合と比較して極めて小さい。特に45°材では応力拡大係数のモードII成分が無視できるほどラメラ界面の抵抗は小さい。

5章では、前章までに得られた3材料についての結果を耐熱鋼の従来データと比較し、それぞれの組織異方性と複合性の効果を明確にした。主な結論は以下のとおりである。Mar-M247およびInconel MA754の一方制御結晶粒界はクリープ疲労強度を増加させる有力な異方性組織であるが、粒界破壊を完全に阻止することはできない。また、Mar-M247のデンドライト組織はき裂の障害物として働くが、2次デンドライトアームの界面はき裂経路となる。他方、疲労き裂の成長に対してはいずれの組織も抵抗とならない。TiAlのラメラ組織は疲労き裂の伝ば抵抗を増大させ、疲労寿命を増加させるが、室温の高ひずみ低サイクル疲労では低延性のため寿命は増加しない。TiAlの高温クリープ疲労破壊は他の合金と同様、粒界破壊によってもたらされ、ラメラ組織の異方性・複合性効果はない。MA754の酸化物 Y_2O_3 分散強化は1273K近傍の高温で大きな効果を発揮するが、室温では小さく疲労強度の向上に有効でない。Mar-M247の結晶方位依存性については、0°材にくらべて45°および90°材のヤング率が大きく、弾性異方性が2軸熱応力に対して不利に働く可能性がある。TiAlのラメラ方位依存性については、45°および90°材の疲労破壊がモードI型ラメラ剥離であり、その伝ば下限界近傍のK値は0°材の1/3以下であるので、実用上2軸熱応力に対する小さな剥離抵抗が懸念される。

6章では以上の結果をまとめて結論としている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、異方性かつ複合化した組織を有する耐熱金属材料として、一方凝固ニッケル基鑄造合金Mar-M247(DS材)、酸化物分散強化メカニカルアロイInconel MA754(ODS MA材)およびラメラ組織鑄造金属間化合物Ti-34wt.%Al(TiAl鑄造材)の3種類の先進型耐熱合金を試験材料として、それぞれの室温疲労および高温クリープ疲労挙動に及ぼす異方性組織あるいは複合組織の影響を実験によって明らかにし、各破壊過程における組織異方性・複合性発現の相違、その合金間の相違等を検討したものである。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) ニッケル基DS材およびODS MA材の一方制御結晶粒界はクリープ疲労強度を増加させる有力な異方性組織であるが、局所的に応力軸と大きな傾きをなす湾曲部が存在するため、粒界破壊の発生を完全に阻止することはできない。
- (2) DS材のデンドライト組織はクリープ疲労き裂の障害物として働くが、2次デンドライトアームの界面はき裂伝ば経路となり、有害である。他方、疲労き裂に対しては結晶粒界、デンドライト組織いずれも大きな障害あるいは伝ば抵抗とならない。
- (3) TiAlのラメラ組織は、疲労き裂の伝ば抵抗を増大させる効果が大きい。しかし、高温クリープ疲労における粒界破壊に対してはその異方性・複合性効果は期待できない。
- (4) DS材の γ 相の方位依存性については、0°材にくらべて45°および90°材のヤング率が大きく、2軸熱応力下ではその方向に過大な応力が生じる可能性がある。TiAlのラメラ方位依存性については、45°および90°材の疲労破壊がモードI型ラメラ剥離であり、その伝ば下限界近傍のK値は0°材の1/3以下であるので、実用上2軸熱応力に対する小さな剥離抵抗が問題となる。

以上要するに、本論文は、耐熱合金の強度向上を意図した異方性・複合性組織が熱疲労条件下の疲労き裂あるいはクリープ疲労き裂に対して十分に有効に働かなかつたり、疲労あるいはクリープ疲労のどちらか一方に対して無効あるいはデメリットとなったりすることを指摘した。この結果は既存材料の使用並びに新規材料の開発にとって有力な指針となるものであって、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成10年7月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。