

純チタンとその実用合金の力学特性に関する研究

出口, 岬

<https://hdl.handle.net/2324/6787646>

出版情報 : Kyushu University, 2022, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 出口 岬

Name

論 文 名 : 純チタンとその実用合金の力学特性に関する研究

Title

区 分 : 甲

Category

論 文 内 容 の 要 旨

Thesis Summary

自動車や船、航空機産業において、燃費性能の向上を目的とした構造材料の軽量化・高強度化が求められている。そのため、比強度に優れるチタンに注目が集まっている。また、炭素繊維強化プラスチックと、腐食性や熱膨張率の面での適合性に優れることから、チタンの需要は、特に航空機産業において、将来的にますます増加することが見込まれている。チタンは、その高い比強度に加えて、耐熱性、耐食性、生体適合性にも優れており、輸送機器以外にも、海洋建築物、電解層、熱交換機、人工骨やメガネフレームなどに広く用いられており、その用途は多岐にわたる。

チタンを輸送機器の構造用材料として安全・安心に利用するためには、製品成形時の加工性や事故時の衝突安全性能を十分に理解することが重要である。そのため、チタンとその実用合金の室温における塑性変形機構を調査することは喫緊の課題として位置づけられている。純チタンの塑性変形は、すべりと双晶によって生じる。また、純チタンや α 相を含むチタン合金では、室温で破断に至るようなクリープ変形が生じることが知られている。これらの塑性変形挙動には、化学組成、結晶粒径、変形温度などの多くのパラメータが影響すると報告されている。その一方で、変形挙動や機械的特性、特に加工硬化挙動に対するひずみ速度の影響については未解明な部分が多い。

本研究では、純チタンとチタン固溶体合金のすべり変形と双晶変形挙動におよぼす結晶粒径とひずみ速度の影響について調査し、機械的特性と微細組織の関係について考察した。また、汎用的なチタン合金であるTi-6Al-4V合金に関して、室温クリープ変形中の転位運動が加工硬化におよぼす影響を議論した。さらに、走査電子顕微鏡を用いた2種類の転位解析を用いて、錐面すべりの活動を捉え、機械的特性への影響を調査した。それらの研究成果から、ひずみ速度、転位運動および加工硬化の関係性を明らかにし、チタンとその実用合金における機械的特性の発現機構を解明することを本研究の目的とした。

第1章では、チタンとその実用合金の特徴をまとめた。次に、チタンの塑性変形の特徴として、すべり変形、双晶変形および室温クリープ変形の基礎的知見について説明した。また、一般的な金属における中・低温域のひずみ速度依存性について、これまでに理解されている内容を要約した上で、ひずみ速度に依存したチタンの特殊な変形挙動について述べた。

第2章では、本論文における実験方法をまとめた。

第3章では、平均結晶粒径210 μm (Ti-210)、30 μm (Ti-30)、5 μm (Ti-5) の純チタンに対して、 $10^6 \sim 10^0 \text{ s}^{-1}$ のひずみ速度で引張試験を行い、その機械的性質と、活動する双晶やすべりとの関係性について調査した。ひずみ速度の増加に伴い、0.2%耐力と最大引張強度はすべての試料で増加し、破断ひずみはTi-210で増加、Ti-5で減少し、Ti-30ではほとんど変化しないことがわかった。高ひずみ速度(10^0 s^{-1})と低ひずみ速度(10^6 s^{-1})を比較すると、高ひずみ速度の場合にTi-30とTi-210において双晶の発生頻度が増加し、Ti-5では双晶の頻度にひずみ速度の影響はなかった。1次錐面すべりの活動頻度は、低ひずみ速度においてTi-30とTi-5で高い傾向にあった。これらのことから、高ひずみ速度でTi-210が高延性を示すのは、双晶の発生頻度が高いためであり、また、Ti-5の低ひずみ速度における高延性は、1次錐面すべりの活性化に起因していることを明らかにした。

第4章では、純チタンに2 wt.%のAlを添加したチタン固溶体合金について、 $10^6 \sim 10^0 \text{ s}^{-1}$ のひずみ速度

で引張試験を行い、第3章の純チタンの結果と比較しつつ、合金の機械的性質と双晶変形およびすべり変形の関係について考察した。熱処理により、平均結晶粒径を $33\ \mu\text{m}$ (CG材) と $6\ \mu\text{m}$ (FG材) に調整した2種類を試料とした。純チタンと同様に、どちらの試料でも、ひずみ速度の増加に伴い 0.2% 耐力と最大引張強度は増加した。また、両方の試料で、ひずみ速度が減少すると均一伸びと破断伸びが増加する傾向を示した。高ひずみ速度 ($10^0\ \text{s}^{-1}$) で変形させたCG材において双晶の発生が確認されたものの、純チタンと比較して、その発生頻度は低く、双晶発生による加工硬化率の向上は認められなかった。高ひずみ速度 ($10^0\ \text{s}^{-1}$) と低ひずみ速度 ($10^{-6}\ \text{s}^{-1}$) で変形させたCG材に対してすべり線トレース解析を実施し、低ひずみ速度 ($10^{-6}\ \text{s}^{-1}$) の場合に1次錐面すべりの活動頻度が増加していることを明らかにした。このことから、純チタンと同様に、低ひずみ速度における延性向上の要因として、錐面すべりの活性化が示唆された。

第5章では、Ti-6Al-4V合金の室温クリープ変形挙動と組織変化を、クリープ試験、走査型電子顕微鏡観察および電子線後方散乱回折法を用いて検討した。室温で $874\ \text{MPa}$ 、 $889\ \text{MPa}$ 、 $904\ \text{MPa}$ の初期応力下で合金をクリープ変形させ、破断させた。変形中に実施した応力急変試験の結果、クリープ変形は転位の粘性的な運動によって律速されていることがわかった。クリープ試験を4回中断し、その都度すべり線トレース解析を実施した。その結果、変形初期には主に底面すべりや柱面すべりの単一すべりが生じ、変形が進行するとほとんどの結晶粒で多重すべりが生じることがわかった。また、1次錐面すべりを含む多重すべりが高頻度に生じた試験片部位では、試験片が破断に至る時点においても加速クリープが発現していなかった。クリープ変形中に材料内部に生じた結晶方位回転量と初期応力の関係を調査した結果、変形速度が遅くなる低応力ほど結晶方位回転量の平均値が増加する傾向を示した。すなわち、クリープ変形中の加工硬化挙動はひずみ速度依存性を示し、ひずみ速度が小さいほど加工硬化が進行することを明らかにした。

第6章では、室温で変形させたTi-6Al-4V合金の α 相内で活動した転位を、走査電子顕微鏡によるチャネリングコントラストイメージング (ECCI) 法により可視化するための観察条件について検討した。また、最適条件において可視化された転位像に関与する電子線の侵入深さを、集束イオンビーム装置を用いたシリアルセクション観察から実験的に確かめた。その成果から、ECCI法を用いた転位密度評価技術を確立した。また、室温クリープ変形させたTi-6Al-4V合金に対して、電子線後方散乱回折法による精密な結晶方位測定を実施し、局所的な結晶方位回転量に基づいた転位解析を実施した。その結果、ほとんどの結晶粒で、主すべりである柱面(a)転位すべりが活動している一方で、柱面(a)転位すべりのシュミット因子が低い一部の結晶粒では、 c 成分を含む転位の活動が認められた。

第7章では、本研究で得られた結果をまとめた。