

TiAl 金属間化合物の恒温鍛造に関する研究

家 口 心

要 旨

21 世紀を迎えた今なお、各種産業分野において工業技術の更なる発展を実現すべく、各種の優れた特性を具備した新材料の開発が期待されている。付加価値の高い製品、あるいは過酷な環境での使用に耐えられる製品を産み出したり、画期的な新技術を開発したりする際に材料技術が非常に重要な役割を果たすことは、これまでに各種の産業分野における技術進歩に及ぼした材料技術の影響を見れば明らかである。従って、今後の技術発展においては材料技術がキーテクノロジーとなる場面がますます多くなるものと予想される。

航空、発電、自動車などの産業分野では、エネルギー効率に優れる高性能な熱機関の開発のために、軽量で耐熱性に優れる構造材料が望まれている。従来の耐熱構造材料である鋼合金やニッケル合金は耐熱性はあるものの重く、また、アルミニウム合金やチタン合金は比較的軽量ではあるが耐熱性が不十分である。これらの優れた特性を兼ね備えた新素材として TiAl 金属間化合物が注目されている。しかしながら、本材料は常温延性に乏しく従来の方法では塑性加工などの成形加工が困難であることから、本格的な実用化には至っていない。よって、同材料の実用化のためには目的とする形状まで健全に成形できる適切な成形法の確立が要求される。これに対して現在、同材料の成形の可能性を持つ加工プロセスとして恒温鍛造が検討されている。恒温鍛造は被加工材と型とを等温に加熱保持しながら、低速度で加工を行う方法であり、この方法によると単純形状のプリフォームから、目的の形状に近いニア・ネット・シェイプまで一工程で成形できる可能性がある。また、加工に伴う組織変化により、被加工材に対し常温延性などの望ましい特性を付与できる可能性もある。しかしながら、この技術を本材料の成形法として確立するためには、十分に低い加工力で大きなひずみ量まで健全に加工できる最適な温度や速度等の加工条件に関するデータの整備や、高温加工条件で使用可能な型材の選定、被加工材と型の界面における摩擦や拡散接合を抑制する潤滑剤の開発など解決すべき問題も少なくない。

本研究は、TiAl 金属間化合物を本格的な実用化へと導くための主要な要素である、コストおよび品質面で妥当な成形法の確立を目指し、同材料の成形法としての恒温鍛造の有用性について各種の実験を通して立証すると共に、この技術を同材料の成形法として利用するための基礎的な情報を提供することを目的として行われたものである。

本論文はその一連の研究内容をまとめたもので全 8 章からなる。

第 1 章「まえがき」では、本研究の背景と目的、恒温鍛造の概要、および本論文の構成について述べた。

第 2 章「TiAl 金属間化合物の特性」では、金属間化合物に関する基礎的な特性を把握し、TiAl 金

学位記番号と学位：第 10 号，博士（工学）

授与年月日：平成 14 年 3 月 20 日

授与時の所属：大学院工学研究科機械システム工学専攻博士後期課程

属間化合物の実用化を見据えた研究開発の指針を示すことを目的とし、一般的な金属間化合物の特性と、Ti-Al 系金属間化合物の種類とそれぞれの特性についての調査結果まとめた。その結果から、Ti-Al 系金属間化合物の中では TiAl の γ 相と Ti_3Al の α_2 相が交互に積層したラメラ（層状）組織を持つものが、加工熱処理による組織制御が可能で目的とする特性を比較的容易に付与できると共に、恒温鍛造による変形の可能性があることから相対的に容易に実用化を図り得ることが理解できた。

第3章「高温変形特性」では、1100 °Cから 1200 °Cの間の各種温度、および $1 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ から $2 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ の範囲の各種ひずみ速度で行った TiAl 金属間化合物の単純圧縮試験について述べた。この試験に用いた被加工材は、そのほぼ全体がラメラ結晶粒で構成されたマイクロ組織を持つ TiAl 金属間化合物である。初期の結晶粒は約 100 μm に制御されている。また、熱間加工性の改善に寄与するとされるクロムを約 2.5 at.%含む。この試験により各条件における同材料の変形応力、およびひずみ速度感受性指数を評価した。その結果、同材料は、恒温鍛造による変形が可能であり、1150 °Cの $5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ から $2 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ のひずみ速度の範囲および 1200 °Cの $1 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ から $2 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ のひずみ速度の範囲において超塑性が発現することが明らかとなった。

第4章「マイクロ組織におよぼす恒温鍛造の影響」では、恒温鍛造のマイクロ組織への影響を調べるために行った、第3章で述べた単純圧縮試験により得られた被加工材のマイクロ組織の光学顕微鏡による観察および、組織内部における各構成元素の分布状況に関する EPMA による分析について述べた。これらの調査結果から、前記の TiAl 金属間化合物の結晶粒は恒温鍛造により微細化されるが、鍛造温度が低いほど、また、ひずみ速度が速いほど鍛造後の結晶粒はより微細となる傾向があることが判明した。また、鍛造後の結晶粒界には粒界すべりの促進に寄与すると見られるクロム富化相が検出されることが明らかとなった。

第5章「恒温リング圧縮試験」では、2種類の型材料および数種類の潤滑剤を使用し、真空および大気中で行った恒温下でのリング圧縮試験について述べた。用いた被加工材は第3章のものと同種である。この試験の主な目的は、同材料の恒温鍛造に適した型材と潤滑剤の組合せについて調査することである。この試験により、型の損傷、潤滑剤の特性、そして摩擦係数について評価した結果、同材料の恒温鍛造用型材料として、真空中ではモリブデン合金の TZM、大気中ではセラミックスの SiAlON が使用できることが明らかになった。また、真空中での TZM 型を用いた恒温鍛造に対しては、BN 系潤滑剤を使用することにより、低い摩擦係数と良好な潤滑剤の除去性が得られること、また、大気中における SiAlON 型を用いた恒温鍛造に対しては、型に BN 系潤滑剤を、被加工材にガラス系潤滑剤を用いることにより、低い摩擦係数と良好な潤滑剤の除去性が得られると同時に被加工材の酸化も防ぐことができることが判明した。

第6章「小型ディスク成形実験」では、ジェットエンジンのタービンディスクを想定したボス・リム付き小型ディスクの恒温鍛造による成形について述べた。用いた被加工材は第3章のものと同種である。この試験により同材料の成形の可能性について検討した結果、恒温鍛造により単純な円柱状プリフォームからディスク形状へのニア・ネット・シェイプ成形が可能であることに加えて、このディスク成形を行う上で欠陥の無い良好な型充満性を示すプリフォーム寸法が存在することが明らかとなった。

第7章「鍛造行程の有限要素法による解析」では、近年発達して来た有限要素法により第6章で行った小型ディスク成形工程のシミュレーションを試み、恒温鍛造行程に対する有限要素法による数値解析の有用性について検討した。この解析から、被加工材の材料流動様式や材料内部の応力や

ひずみの分布等に関する情報が得られたと他, 実際の工程に近い加工荷重も求められた。よって, 有限要素法による解析は試行錯誤的な実作業によらない最適な工程の設計等に有用であることが明らかとなった。

第8章「あとがき」では, 一連の研究結果を総括する。

本研究により, TiAl 金属間化合物の恒温鍛造による成形の可能性を示すことができたと共に, この恒温鍛造を行うための各種の技術的な情報も提示できた。従って本研究は恒温鍛造を用いた TiAl 金属間化合物の成形プロセスの確立, ひいては同材料の実用化に寄与するものであると考える。

主指導教員 大内 清行

Study on Isothermal Forging of TiAl Intermetallics

Shin KAGUCHI

Abstract

Much attention has recently been paid to TiAl intermetallics in many industrial fields, such as aerospace, generation, and automobile as a new material having excellent characteristics, such as low density and high heat resistance. However it has not been put into practical use yet because the material has some weak points also, such as low ductility at room temperature and poor workability. Therefore, establishment of forming process of the material is necessary to put the material into practical use. Isothermal forging is worthy of remark as a forming process of this material. This method involves maintaining both the forging dies and the workpiece at the uniform temperature, and forging at low speed. Implementing this method may make it possible to form the material from simple-shaped preform to near-net-shaped product in a single process. In addition, this method can make it possible to provide the forged material desirable characteristics, such as room temperature ductility by microstructural change during forging. However, there are some obstacles to overcome for establishment of this method as a forming process of the material. A database must be prepared on the optimum working conditions, such as temperature and strain rate, on which the material can be deformed to large strain soundly with sufficiently small stress. And useable die-materials and lubricants must be selected or developed. The die must withstand high temperature forging condition, and the lubricant must prevent the diffusion bonding and reduce the frictional force between die and workpiece.

The purpose of this study is to prove the usefulness of the isothermal forging as a forming process of TiAl intermetallics through various experiments, and to provide fundamental informations about techniques for making use of this method.

This paper consists of eight following chapters.

Chapter 1, the introduction, gives a brief statement on the background and the purpose of this study, outline of isothermal forging, and construction of presented paper.

Chapter 2 describes the researching results on characteristics of general intermetallics and Ti-Al based intermetallics via many kinds of literatures. The purpose of this research is to understand fundamental characteristics of intermetallics, and to indicate the direction for research and development of TiAl intermetallics for putting into practical use of the material. As a result, it was clarified that TiAl intermetallics having lamellae (γ/α_2) structure is easy to be put into practical use respectively because it is possible to control the microstructure of the material and provide the material desirable characteristics by thermo-mechanical processing, in addition, the material has a possibility of forming by isothermal forging.

Chapter 3 deals with isothermal simple compression tests of a TiAl intermetallics carried

out at temperatures ranging from 1100 °C to 1200 °C and at rates of strain ranging from 1×10^{-4} s⁻¹ to 2×10^{-3} s⁻¹. The work-material used for these tests has duplex structure consists of most of lamellae grain and little γ grain. The initial grain size is controlled to about 100 μ m. Chromium that is thought to improve the hot workability is added about 2.5 at.% to the material. From the tests, flow stress and strain rate sensitivity exponent at each condition were evaluated. As a result, it was clarified that the material can be deformed soundly until 70 % of reduction in height by isothermal forging, and the material shows superplasticity in the rate of strain ranging from 5×10^{-4} s⁻¹ to 2×10^{-3} s⁻¹ at 1150 °C, and 1×10^{-4} s⁻¹ to 2×10^{-3} s⁻¹ at 1200 °C.

In chapter 4, it is described about microscopic observations and analyses on distributions of some kinds of compositional elements in the microstructure with EPMA on the specimens forged isothermally under the conditions mentioned in chapter 3. The purpose of these observations and analyses is to investigate the effect of isothermal forging on the microstructure. Through these investigations, it became clear that isothermal forging could refine the grain of preceding TiAl intermetallics, and the grain size was made smaller when it forged at higher strain rate and lower temperature in the testing ranges presented, and chromium enrich field which is considered to contribute the grain boundary sliding of the material was detected in the grain boundaries after isothermal forging.

Chapter 5 deals with isothermal ring compression tests of preceding TiAl intermetallics with two kinds of die materials and some kinds of lubricants. The main purpose of the tests is to investigate optimum combinations of die materials and lubricants for the isothermal forging of the material. The tests were carried out not only in vacuum but also in air. As a result of evaluations on damage of the dies, characteristics of the lubricants and frictional shear factors by the tests, it was clarified that a molybdenum alloy TZM die and a BN type lubricant are suitable for the isothermal forging in vacuum because the combination brings about low frictional shear factor and good removability of the lubricant, on the other hand, ceramics SiAlON die and a BN type lubricant applied to the die surface and a glass type lubricant applied to the workpiece are suitable for the isothermal forging in vacuum because the combination brings about not only low frictional shear factor and good removability of the lubricant but also protection against oxidation of the workpiece.

In chapter 6, it is described that isothermally forging tests of the preceding TiAl intermetallics from cylindrical preforms to a disk with boss and rim sections. The purpose of the tests is to evaluate the usefulness of the isothermal forging for forming of the material. As the result of the tests, it became clear that sound product filled up the die cavities perfectly was obtained by isothermal forging; therefore isothermal forging is useful for forming of the material. However, it also shown that there is an optimum size of the preform for bringing about excellent material flow and obtaining the sound products.

Chapter 7 deals with the numerical analysis of isothermally forging process by employing FEM. A forging process of the disk with boss and rim sections, described in chapter 6, was simulated actually by the analysis. The purpose of this simulation is to evaluate usefulness of

the numerical analysis with FEM. As a result of the analysis, it is obtained that flow patterns and internal distributions of equivalent stress/strain of the forging material, forging load and other things were obtained. This matter suggested that the FEM analysis is useful for estimation of optimum conditions for various isothermally forging processes without practical examinations.

Chapter 8 is a summary of presented study.

Professor (Chairperson) Kiyoyuki OHUCHI