

学位論文の要旨

氏名

奈良 大作

学位論文題目

Al-Si傾斜機能材料の作製とその半熔融加工条件最適化に関する研究

本論文では過共晶Al-Si合金の優れた特性に着目し、要素・構造用材料としての用途を広げるため、難加工材への適用が可能な半熔融加工法に取り組み、Al-Si複合材料と遠心力法で作製したAl-Si 傾斜機能材料 (FGM) を用いた基礎実験を通して実用化を目指したものである。その研究手法として、優れた機械的特性の獲得が期待される半熔融加工の有効性を加工特性や最適加工条件に着目して検討を行った。本研究により、これまで実用化を妨げていた諸問題を克服するための多くのノウハウを提示し、過共晶Al-Si 合金の要素・構造用材料としての用途を広げ、実用化に向けた可能性を明らかにすることができた。本論文は6章からなっていて、以下にその概略を示す。

第1章は「緒論」であり、本論文の位置付け、意義、目的及び論文の概要について述べている。

第2章は「Al-Si傾斜機能材料の作製と組織」であり、過共晶Al-25 mass% Si合金を用いた真空遠心力法による傾斜機能材料の作製プロセスについて述べた。作製した厚肉円筒管の組織傾斜について観察を行い、その体積分率は管の外周側が軽くてSi含有量が多く約60 mass% Si、内周側が重くてSi含有量が少なく約15 mass% Siという結果を得た。このSi分布は作製時の予測とは異なるものあり、この結果に至った原因をSi密度の温度依存性に着目し、Al-Si FGMにおけるSi粒子の分布形成過程について考察した。

第3章は「後方押し出し法におけるFGMの加工特性」であり、過共晶Al-Si合金の優れた特性を活用する可能性を検討するため、作製したAl-Si FGMを母材として後方押し出し半熔融加工試験を行った。ニアネットシェイプ加工の後方押し出し加工により作製したFGMカップは、580℃から590℃の溶解金属と固体Siが混在する温度範囲でうまく作製され、凝集したSi粒子の平均含有率は、底の部分で70 mass% Si、コンテナ壁に沿って押し出された部分では15 mass% Si程度となった。半熔融加工におけるAl-Si FGM中のSi粒子微細化には、塑性流動と粘性流動の複合効果が考えられ、Al-Si共晶組成融点直上の580℃付近での加工が要素材料としての実用化に適した条件であることを示した。

第4章は「落下鍛造型試験機による半熔融過共晶Al-Si合金の粘性測定」であり、自製の落下鍛造型粘度計を用いて過共晶Al-Si合金の半熔融加工による変形挙動解析を目的とした。落下鍛造型粘度計では、初期に増加するせん断速度域で粘性係数が減少し、その後のせん断速度の減少に伴い粘性係数が増加に転じる特性を示した。粘性係数 μ とせん断速度 $\dot{\gamma}$ との関係は、両対数グラフ上で直線関係となり、 $\mu = 1.78 \times 10^7 \dot{\gamma}^{-1.5}$ [Pa·s]と整理することが出来る。また、変形の実効時間vs粘性係数の関係は凸形状曲線となり、実行時間はせん断速度 70 s^{-1} 、粘性係数 $30 \text{ kPa}\cdot\text{s}$ で最大値をとる。この結果より、粘性係数 $30 \text{ kPa}\cdot\text{s}$ は、塑性加工から鑄造へと主たる変形プロセスが遷移する点に相当し、半熔融加工の最適条件であると推測した。

第5章は「ウェーブレット解析による半熔融加工条件の最適化」であり、過共晶Al-Si合金の半熔融加工による材料の組織構造を微細化することができる最適加工条件の検知を目的とした。半熔融状態の最適加工温度を見極めることは困難であることから、その検知方法として、ウェーブレット解析を適用して固体から半熔融状態へと変化するAl-Si合金ビレットの遷移点を検出する方法の検討を行った。ウェーブレット解析を実装した自製のシステムにより、一定負荷荷重下での温度上昇によるAl-Si合金の固体から液体への状態変化の不連続性をうまく検出することができた。その結果、最適条件下で圧縮したビレットは機械的特性の向上が期待されるSi粒子微細化の様相が確認でき、ウェーブレット解析の適用による半熔融加工条件評価法の有効性を明らかにした。

第6章は「結論」であり、第2章から第5章において得られた結果をまとめたものである。

Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

Studies on Manufacturing of Al-Si Functionally Graded Material and Its Optimization of Semi-Solid Forming Conditions

Name: Daisaku NARA

The doctoral dissertation deals with the possibility for practical usage of hypereutectic Al-25 mass% Si alloy which has been expected the utilization of superior properties, *e.g.*, low density, high wear resistance, low coefficient of thermal expansion, high strength at elevated temperature. Hypereutectic Al-Si alloy is a kind of processing resistant material because the primary crystal of Si is hard and the distribution of Si particles makes the machinability poor and then brings tool wear. The inherent character prevents the practical usage up to now and semi-solid forming, *i.e.*, thixoforming, to produce a near-net shape Al-Si product is examined to overcome the shortage. Thus the formability of semi-solid Al-Si alloy is evaluated by both Al-Si composite material and Al-Si functionally graded material (FGM) manufactured from Al-25 mass% Si master alloy. The know-how based upon the experiment for the commercial usage of hypereutectic Al-25 mass% Si alloy as a component and/or structural material is presented. The thesis consists of six chapters.

Chapter 1 “Introduction” provides the background and the purpose of this study.

Chapter 2 “Manufacturing and Structure of Al-Si Functionally Graded Material” gives an account of the possibility for manufacturing Al-Si FGM tube by the vacuum centrifugal casting method, which is applied to hypereutectic Al-25 mass% Si master alloy. The morphology and distribution of Si grains in the thick-walled tube are examined. The fraction of Si phase in the FGM tube is varied from over 60 mass% Si at outer surface to 15 mass% Si at inner surface. This feature contradicts with the expectation that Si particles that are lighter than Al matrix are gathered at outside of the FGM tube. This result is due to the higher density of Si solid particle in comparison with that of the Al-Si eutectic melt.

Chapter 3 “Formability of FGM by Backward Extrusion” gives a description of a backward extruding under semi-solid condition using Al-Si FGM billet for examine the possibility to utilize the excellent properties of hypereutectic Al-Si alloy. FGM cups are obtained successfully at a semi-solid metal and solid Si coexisting temperature range from 580 to 590 °C through a visco-plastic deformation. The fraction of Si phase in the FGM cup is varied from over 70 mass% Si at the bottom region to less than 15 mass% Si at the cup wall region. The optimum semi-solid forming produces a significant interaction with both plastic flow and viscous flow resistances and the most preferable temperature is inferred to be just over the eutectic melting point of around 580 °C.

Chapter 4 “Viscosity Measurement of Semi-Solid Hypereutectic Al-Si alloy in the Drop-Forge Viscometer” deals with the rheological behavior for a semi-solid forming of hypereutectic Al-Si alloy, using a self-made parallel-plate drop-forge viscometer. Drop-forge experiments show individually the features that the viscosity decreased in the early increasing shear rate stage and subsequently the viscosity turned to increase as the shear rate decreased. The summarized behavior between the viscosity, μ [Pa·s], and the shear rate, $\dot{\gamma}$ [s^{-1}], can be described by a power-law model of $\mu=1.78\times 10^7 \dot{\gamma}^{-1.5}$. The convex shape curve is observed between the effective duration for compressed specimen and the viscosity and the effective duration reaches a maximum at around $\mu=30$ kPa·s where $\dot{\gamma}=70$ s^{-1} . From the results, the viscosity $\mu=30$ kPa·s, which corresponds to the transition point from plastic forming to casting, seems to be the optimum condition for semi-solid forming.

Chapter 5 “Optimization of Thixoforming Condition by Wavelet Analysis” describes to detect an optimum operating condition for semi-solid forming, *i.e.*, thixoforming, that can form a fine grain structure. It is difficult to identify the optimum semi-solid state of the Al-Si alloy for thixoforming. Thus the possibility to apply a wavelet analysis for the detection of optimum semi-solid state is examined. The wavelet analysis implementing system successfully detects a discontinuity of deformation of hypereutectic Al-Si alloy with temperature increase under a constant applied load. Billet is compressed under the point of discontinuity and is confirmed through Si fine grain formation. Application of wavelet analysis seems to be effective against the detection of the optimum operating condition for thixoforming.

Chapter 6 “Conclusions” summarizes the developments and the findings, which are given an account of Chapter 2 through 5.