

学 位 論 文 の 要 旨

高強度マグネシウム合金の熱間鍛造に関する研究 (Hot forging of high tensile strength magnesium alloys)

氏 名 平 渡 末 二 印

本論文は自動車部品等の軽量化を目的としてこれまでに開発されていない高強度マグネシウム合金の製造とその熱間鍛造法について、サーボプレス等を使用して効率的に高強度マグネシウム合金の鍛造加工を実現できる革新的加工プロセスの開発に関する論文である。

本論文においては、まず、Mg-Al-Ca-Mn 系合金 (AXM4303 合金) の連続鍛造材を用いて単純圧縮試験を実施して 350°C と 400°C で材料の変形抵抗を明らかにし、リング圧縮試験により 3 種類の潤滑剤環境下において材料と金型間の摩擦係数を算出するとともに金型への固着を抑制できる潤滑剤を開発した。

さらに Mg-Al-Ca-Mn 系合金を用いて鍛造材から直接鍛造成形するための基礎的な検討を行うために、2 重円筒形状の金型を用い鍛造成形性と機械的特性におよぼす鍛造条件の影響を調査した。その結果鍛造温度 400°C 以上では鍛造成形性は良好になるが、引張強さと 0.2% 耐力は著しく低下する。鍛造温度 350°C 以下では引張強さと 0.2% 耐力は向上するが、鍛造成形性は悪化することがわかった。これより、Mg-Al-Ca-Mn 系合金の鍛造材を直接鍛造し良好な鍛造成形性を得るためには、400°C 以上で鍛造することが必要となるが、400°C における機械的強度は、引張強さ 289MPa、0.2% 耐力 282MPa と十分に高い強度は得られないため、機械的強度を向上させるためには低温で鍛造することが有効であるものの、成形性との両立は困難であることが判明した。そこで本章では EBSD による結晶方位解析の結果から機械的強度の要因を解析した結果、比較的低い鍛造温度 (300°C, 350°C) で加工した鍛造品の強度が高くなるのは、350°C 以下で動的再結晶が十分に進まず加工硬化によるひずみが残存していること、未再結晶領域の底面配向した集合組織が引張試験方向と平行に集積していること、が主な要因であることを明らかにした。

以上の結果より、鍛造温度 350°C 以下の鍛造成形性を向上させることを目的に潤滑剤、背圧鍛造の効果および生産性を考慮した鍛造速度の最適化を実施した。スクロール部品の鍛造成形性は背圧付与で著しく改善することが判明した。スクロール壁の成形性を改善するためには、背圧なしで発生した鍛造荷重 (初期荷重) に対してその 9 から 13% 程度の背圧を付与することが最も適していることが明らかとなった。この結果より 300°C 程度の低温でも割れの無い成形性が良好な鍛造スクロールを得ることを確認できた。

さらに、Al 量を 9~12% に調整した AZ91, AZ101, AZ111, AZ121 等の高強度マグネシウム合

金を双ロール鋳造法により連続鋳造し、得られた板材を鍛造用の素材として適用する実験を試みた。その結果、高 Al 含有双ロール鋳造材は、従来の AXM4303 連続鋳造材に比べて圧縮変形抵抗が低くなるという知見を得た。さらに、高 Al 含有双ロール鋳造材を用いて直接鍛造を試みた結果、350°C 鍛造の AZ121 は約 6 μm 程度まで微細化していることが判明し、晶出物についても微細に分散していることを確認した。300°C 鍛造品の AZ131 は結晶粒径が 350°C 鍛造の AZ121 ほど微細化はしていないことがわかった。300°C と 350°C の鍛造温度の違いは動的再結晶による微細化に強く影響していることから機械的特性を向上させるためには 350°C 程度の鍛造温度が有効であり、また成形性も良好となることが明らかになった。

以上、本研究で開発した Al 量を 12% まで増加させた高強度マグネシウム合金は鍛造用素材として十分な強度を有しており、熱間鍛造においても有効な加工用材料であることを明らかにした。これまで、販のマグネシウム合金では強度に対する要求が満足されなかったのに対して、本研究における高強度マグネシウム合金を鍛造加工に適用した研究は初めてである。提案した熱間鍛造加工法はマグネシウム合金製品の実用化に寄与し、本論文から得られた知見は、軽量化技術の発展に貢献できる。以上のように、本論文は工学の発展に寄与できるものであると考えている。

Summary

Hot forging of high tensile strength magnesium alloys

This thesis deals with an innovative hot forging process of high tensile strength magnesium alloy materials. By applying a servo press machine, a novel hot-forging process was performed with development of high strength magnesium alloys. In this thesis, friction properties and isothermal deformation resistance during hot forming (350°C and 400°C) of Mg-Al-Ca-Mn series magnesium alloy (AXM4303 alloy) were investigated by ring-compression tests. In ring compression tests, friction coefficients between dies and magnesium alloys are obtained using graphite, PTFE, and an oil lubricant. A novel lubricant that could prevent sticking between dies and material was developed by hot-forging experiments.

Effects of forming conditions on forming and mechanical properties of formed products were also examined by hot forging tests using a die with a double-cylindrical shape. It was found that forming at 400°C or above yields fairly good formability, but the tensile strength and the 0.2% proof stress are dramatically reduced. Forging at under 350°C improved the tensile strength and the 0.2% proof stress, but the formability became worse. We concluded that low forming temperature (300°C or 350°C) produces better mechanical properties because products forged at 400°C had tensile strength of 289MPa and a 0.2% proof stress of 282MPa. However, low forming temperature will yield poor formability, so it is important to balance good formability and high strength. To clarify how low forging temperature yielded high strength and poor formability, we performed an electron back-scatter diffraction pattern analysis. The main reason that products formed at relatively low temperature (300°C, 350°C) have high strength was the remaining hardened strain due to less dynamic recrystallization, and the high accumulation of transition of the texture which was oriented at the bottom direction along with the parallel direction with the same direction of the tension test pieces.

Based on these results, forming conditions of the magnesium alloys were optimized with regard to lubricant type, back pressure during forging, slide motion, and speed of the servo press machine in order to improve formability in hot forging under the above 350°C. We found that the effect of back pressure during hot forging is remarkable. We also concluded that a back pressure of 9 to 13% of the maximum forming load was appropriate for manufacturing products with a double cylindrical shape. By applying appropriate back pressure during hot forging, we confirmed that hot forging of magnesium alloy is possible and forged products without cracks at 300°C.

High tensile strength magnesium alloys containing 9 to 12% aluminum, such as AZ91, AZ101,

AZ111, and AZ121 have been made by twin roll casting. A new experiment was performed for hot forging of high strength magnesium alloys with high aluminum content was performed. From the results, using magnesium alloys with high aluminum content yielded less compressive deformation resistance than AXM403. It was also demonstrated that hot forging of magnesium alloys with high aluminum content produces small magnesium crystals (about 6 micrometers) and crystallized substances. The microstructure of AZ131 forged at 300°C did not become as small as that of AZ121 forged at 350°C. The effects of the dynamic recrystallization on the microstructures of products formed at two different temperatures (300°C and 350°C) seem to differ. Forging at 350°C improved mechanical properties and yielded the best formability.

We demonstrated that the proposed forging process of high tensile strength magnesium alloys containing relatively high amounts of aluminum such as AZ121 was effective for hot forging materials. We also found that the developed high aluminum content magnesium alloys exhibited good mechanical properties after hot forming. Conventionally, while the demand for strength in commercial magnesium alloys has not been satisfied in the commercial market, applying the proposed high tensile strength magnesium alloys with high aluminum content for hot forging material is the first finding from the thesis. The proposed hot forging process definitely contributes to the practical application of magnesium products, and the research can contribute to innovative lightweight technology. This thesis can thus be considered to contribute to the development of engineering.