

学位論文要旨

所属専攻 産業創造工学専攻

氏名 松本 翼

論文題名 長周期積層構造型マグネシウム合金におけるキンク変形挙動の解明

要 旨

長周期積層(LPSO)構造相を有する Mg-Zn-Y 合金は、鑄造材としては平凡な機械的特性しか示さないものの塑性加工を施すことで機械的特性が著しく向上することから、新たな軽量高強度展伸材として注目されている。Mg-Zn-Y 合金の強化相とされる 18R-LPSO 相は、hcp-Mg 構造を基本としてその最密充填面積層の 6 層毎に積層欠陥が導入された構造変調と、その積層欠陥を挟み込むかたちで 4 層の溶質原子濃化層が形成された濃度変調が同期した特徴的な構造である。またこの濃化層には  $L1_2$  クラスタが二次元単純六方格子の格子点に規則配列していることも報告されている。この特異な構造に起因して、LPSO 相は従来の hcp 構造の Mg 相とは異なる塑性変形挙動を示す。hcp 構造の Mg 相では、底面すべり、柱面すべり、錐面すべりが活動し、すべりの他に双晶変形が容易におこる。一方、LPSO 相はすべり系が底面すべりと柱面すべりに限定され、溶質原子濃化層を有する特異な構造に起因して双晶変形も抑制される。そのため LPSO 相ではすべりの他にキンク変形が生じることで塑性変形することが報告されている。キンク変形により形成されるキンク界面は、巨視的に見ると LPSO 相の主すべり面に垂直であり転位の運動を妨げると考えられるため、キンク変形は LPSO 型 Mg 合金の強度と延性を両立させるキーメカニズムであると指摘されている。LPSO 型 Mg 合金を展伸材として実用化するためには塑性変形挙動を十分に理解する必要がある、そのためにキンク変形について詳細に理解する必要がある。本研究では、キンク変形について理解が不十分である以下の 3 点を明らかにすることを目的とした。まずは①キンク界面の詳細な形成メカニズムである。次に、② $\alpha$ -Mg 相と LPSO 相の相境界における変形挙動である。最後に、③キンク界面の形成が加工硬化とひずみ緩和に及ぼす影響である。それぞれ、第 3 章、第 4 章、第 5 章で述べた。

第 3 章では①キンク界面の形成メカニズムを明らかにすることを目的とした。過去のキンク変形についての研究から、キンク界面は刃状転位の転位列で表されることが指摘されているが、転位列を形成する転位の源の説明が不十分である。過去の研究はそのほとんどが単軸圧縮や押出加工を用いて形成したキンク界面を観察する研究であった。そのため、形成が完了したキンク界面のみ観察が可能であり、界面形成の初期過程を観察することは困難

であった。そこで本研究では、試験片にひずみ勾配を与えることができる曲げ変形を用いてキック界面を導入した。曲げ変形を用いる場合、試験片には圧縮応力と引張応力が与えられ、圧縮引張応力中立面が存在する。曲げの際、最も強く圧縮される試験片内側がまずはじめにキック界面形成応力の閾値をこえ、キック界面が形成される。その後、曲げの進行に伴いキック界面形成応力の閾値を超える領域は応力中立面の方向に向かって広がるため、キック界面も応力中立面に向かって成長すると考えられる。つまり、曲げ変形の後、形成されたキック界面と応力中立面との領域を観察することで、形成初期段階にある界面から成長した界面までを連続的に観察できると考えた。LPSO 相単相となる Mg85Zn6Y9 合金の単結晶試験片に $\langle 1\bar{2}10 \rangle$ へ曲げを与えたところ、試験片の圧縮応力のかかる領域に多数のキック界面が形成されていたが、その成長は圧縮応力場に限られる傾向が見られた。形成されたキック界面の格子回転軸を調査したところ、 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 回転型の界面のみならず、 $\langle 1\bar{2}10 \rangle$ 回転型や $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ と $\langle 1\bar{2}10 \rangle$ の中間の軸で回転する界面が、曲げ試験片の内側の側面に沿って隣り合って形成されていた。 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 曲げの結果も同様であり、形成されるキック界面の格子回転軸の分布は曲げ方向によらないことが明らかになった。キック界面はその格子回転軸の特徴から大きく分けて3種類に分類できることが指摘されている。1つは底面 $\langle a \rangle$ すべりの単一すべりにより形成されると考えられている $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 回転型のキック界面である。2つ目は底面すべりの多重すべりにより形成されると考えられている $\langle 1\bar{2}10 \rangle$ 回転型を含む $\langle uv\bar{t}0 \rangle$ 回転型のキック界面である。3つ目は、柱面 $\langle a \rangle$ すべりにより形成されると考えられている $\langle 0001 \rangle$ 回転型のキック界面であり、これは350°C以上の高温に限り形成されることも指摘されている。しかしながら上記の分類は幾何学的に予測されたのものであるため、実際に形成された上記の3種類のキック界面を観察して界面の構造や周囲の転位分布を比較する必要がある。室温曲げにより形成された $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 回転型のキック界面と、 $\langle uv\bar{t}0 \rangle$ 回転型のキック界面を観察したところ、曲げにより形成されたくちばし状のキック界面のそれぞれの界面は、互いに交わっていないことが明らかになった。またどちらの界面においても形成初期段階にある低角度のキック界面はGN転位列により形成されていた。GN転位列に並んだ転位の転位密度を測定したところ、 $\langle uv\bar{t}0 \rangle$ 回転型のキック界面のGN転位列に並んだ転位の密度は、 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 回転型のキック界面の転位密度に比べて高いことが明らかになった。これは $\langle uv\bar{t}0 \rangle$ 回転型のキック界面は多重すべりにより形成されていることを示唆する結果である。次に2種類のキック界面を格子回転軸に垂直な $\langle 0001 \rangle$ から観察することで界面を成す転位のバーガスベクトルを調査したところ、 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 回転型のキック界面の近傍には $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 軸まわりの回転を生じさせるバーガスベクトルの転位のみが観察された。一方、 $\langle uv\bar{t}0 \rangle$ 回転型のキック界面の近傍には複数のバーガスベクトルの転位が共存していることが明らかになった。次に、 $\langle 0001 \rangle$ 回転型のキック界面を観察するためMg89Zn4Y7合金に450°Cで押出加工を施し、変形組織を観察した。高温押出後のLPSO相には $\langle uv\bar{t}0 \rangle$ 回転型のキック界面も多数形成されていたが、室温では形成が観察されなかった $\langle 0001 \rangle$ 回転型のキック界面が観察された。この界面を対象に転位観察を行ったところ、界面近傍には多数

の柱面 $\langle a \rangle$ 転位が観察された。また低角度のキंक界面である GN 転位列は柱面 $\langle a \rangle$ 転位の完全な刃状転位で形成されていたことから、 $\langle 0001 \rangle$ 回転型のキंक界面は柱面 $\langle a \rangle$ すべりの単一すべりにより形成されることが示唆された。形成初期段階にあるキंक界面の観察結果から、キंक界面形成の初期段階では結晶中にあらかじめ存在する SS 転位が GN 転位化することが示唆され、キंक界面形成の初期段階で起こると考えられる転位反応を提案するに至った。

第 4 章では② $\alpha$ -Mg 相と LPSO 相の相境界における変形挙動を明らかにすることを目的とした。実用化が期待されている LPSO 型 Mg 合金は、塑性変形挙動の異なる  $\alpha$ -Mg 相と LPSO 相からなる二相合金である。 $\alpha$ -Mg 相において重要な変形モードである双晶の形成が LPSO 相では抑制され、双晶変形に代わってキंक変形がおこるように、塑性変形挙動の異なる二相からなる合金であるため、相境界における双晶変形とキंक変形の変形挙動を理解する必要がある。本研究では、すべり方向との位置関係が異なる 6 種類の相境界を対象とし、相境界近傍においてビッカース圧子を用いたインデンテーションを行うことで試験片にひずみ勾配を与え、各相における変形挙動を調査した。a 軸方向からインデンテーションした結果、主すべり面である底面に垂直な相境界と底面に平行な相境界では、いずれの場合も LPSO 相に形成されたキंक界面の伝播は相境界でとまり  $\alpha$ -Mg 相には伝播していなかったが、キंक界面と相境界の交点から  $\alpha$ -Mg 相中へ双晶が形成されていた。また LPSO 相には双晶は形成されなかった。 $\alpha$ -Mg 相には $\{10\bar{1}2\}$ 引張双晶や、 $\{10\bar{1}2\}$ - $\{10\bar{1}3\}$ 二重双晶が形成されていたが、双晶は LPSO 相へ伝播しなかった。LPSO 相から拘束を受ける  $\alpha$ -Mg 相にはキंक界面も形成されていた。次に、c 軸方向からインデンテーションした結果、底面に平行な相境界では LPSO 相で形成されたキंक界面が相境界をこえて  $\alpha$ -Mg 相中へと伝播する傾向にあることがわかった。これは c 軸方向からの応力では $\{10\bar{1}2\}$ 引張双晶の形成が容易でないため、双晶に代わってキंक界面が形成されたと考えられる。また  $\alpha$ -Mg 相に形成されたキंक界面の近傍には双晶が形成されていた。

第 5 章では③キंक界面の形成が加工硬化とひずみ緩和に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。LPSO 型 Mg 合金の変形モードとして重要なキंक変形であるが、機械的特性の向上にも関係していることが指摘されている。しかしながらキंक界面そのものが転位のすべりに与える影響は未だ解明されていない。そこで本研究では 18R-LPSO 単結晶に形成されたキंक界面近傍においてナノインデンテーション試験を行い、硬さの分布からキंक界面の影響を把握することを目的とした。第 3 章の観察結果から GN 転位列であると考えられる低角度のキंक界面と転位列ではない高角度のキंक界面の 2 種類の界面に注目し、硬さ分布を調査した結果、キंक界面に近づくほど硬さは低くなり、キंक界面が形成されていない加工硬化した領域の硬さよりも低くなる傾向があることがわかった。また界面近傍における硬さの低下の度合いは、格子回転角度が高角度なキंक界面ほど大きいことが明らかになった。このことからキंक界面の形成によりひずみが緩和されていることが示唆され、その緩和の度合いは高角度なキंक界面ほど大きいことが示唆された。