速報論文

マグネシウム合金の熱間転造加工によるねじの作製

野田雅史* 森 久史** 船見国男***

辻村太郎** 東 健司****

Screw Processing by Hot Form Rolling on Magnesium Alloy

Masafumi NODA*, Hisashi MORI**, Kunio FUNAMI***,

Taro TSUJIMURA** and Kenji HIGASHI****

(Received on September 8, 2006)

In this research, we examined the rolling and processing of AZ31Mg alloy at 623 K and 723 K using various strain rates to fabricate an AZ31Mg alloy cross-slot screw. We successfully made one without any defects in appearance. The hardness of the thread of the new cross-slot screw is higher than that of the central part, and the grains of the thread are fine. The different characteristics of these two parts are attributed to the refinement of composition due to dynamic recrystallization induced during the hot rolling.

Key words: forming property, form rolling, nonferrous metal, magnesium alloy, recrystallization, hardness

1. 緒 言

鉄道車両では車両の軽量化が課題とされており、部材肉厚の軽減、部品点数の削減及び積極的な軽量材料の適用などが検討されている¹⁾。マグネシウム合金は金属材料の中でも最も軽量であり比強度が大きい合金である。しかし、強度レベルがアルミニウム合金にまで達しないことから一次構造部材としての適用は困難であるが、高い強度を要求されない部品にはマグネシウム合金製の部品は有効であると考えられる。マグネシウム合金製の車両部品の開発例については幾つか示されてきたが、実用化に対する検討課題は多い²⁾。その中で、最も使用頻度の多いねじに対するマグネシウム合金の適用が考えられる。ねじの大きさは多岐に渡り、その多くは小型部品であるが、使用量が多いと車両全体の重量が増してくる。したがって、マグネシウム合金製ねじを作製して車両締結や内装部材の締結に適用できれば全体重量の1~5%程度の重量軽減を行える可能性がある。

しかし、マグネシウム合金は室温では底面すべり以外のすべり面のせん断抵抗が大きいことから、加工が極めて難しい合金である。ところが、著者の一人はマグネシウム合金を適切な温度と歪速度で引張変形を付与した場合におい

て、高温変形が生じ、変形条件によっては著しい延性が認められることを報告している³⁾。

上述の報告より、マグネシウム合金の部品化は高温変形を利用して可能となり、目的とするねじにおいても加熱を伴う転造を行うことによって作製できると考えられる。加熱下における塑性加工では、再結晶温度によって区分されることがあり、再結晶温度以上での加熱条件下での加工が熱間加工、再結晶温度付近あるいは以下の加熱条件下での加工は温間加工である。本研究では、マグネシウム合金AZ31に対して熱間転造加工を行ってねじを作製し、ねじ加工のメカニズムを材料組織上から検討するために、金属組織観察、硬度測定及び方位測定を行った。

2. 実験方法

試験材には、市販のMg-Zn-Al合金(AZ31)押出材を用いた。Fig.1に試験材の初期組織を示す。また、Table1に試験材の引張特性を示す。初期組織は等軸形状の結晶の状態で平均結晶粒径は50 μ mである。作成したねじは、鉄道車両の部品締結で最も使用頻度の高い十文字穴付き小ねじ(JIS-B1111)であり、寸法はM8 $\times$ 1である。加工は、まず試験材から熱影響を抑えながら丸棒(ϕ 12mm $\times$ 30mm)形状に切出した後、ねじ面を転造加工、頭部を鍛造加工で加工した。

ねじ転造は平ダイスのねじ転造加工装置を用いて行った。転造加工は623K及び723Kの2種類の温度下において回転速度400rpmで行った。このとき、転造加工の温度は平ダイスに設置した加熱炉により制御した。AZ31の再結晶化

* (株)JR 総研エンジニアリング 〒185-8540 国分寺市光町 2-8-38

** (財)鉄道総合技術研究所 〒185-8540 国分寺市光町 2-8-38

***千葉工業大学工学部 〒275-0016 習志野市津田沼 2-17-1

****大阪府立大学大学院工学研究科 〒599-8531 堺市中区学園町 1-1

(連続再結晶)が生じはじめる温度は 473K~523K の範囲以上である。本研究の転造加工は加工時の動的再結晶と静的再結晶化を利用することを目的とするため、再結晶が発現する以上の温度で行った。

加工後のねじの状態を金属組織観、方位解析及び硬度測定を行った。金属組織観察及び方位解析は、ねじを軸方向に精密切断機で切断し、軸方向断面のねじ山部分について行った。金属組織は軸断面方向をエメリー研磨とバフ研磨後にしゅう酸水溶液 (10%) 99cc と HNO_3 1cc を混合した腐食液を用いて腐食処理して光学顕微鏡を用いて行った。一方の方位解析測定は電子線後方散乱回折像 (EBSD) を付随した FE-SEM を用いて行った。硬度は径方向断面の分布として得た。硬度測定はマイクロビッカース硬度計を用い、測定条件は荷重 50gf、負荷時間 15s で行った。

Table1 Mechanical properties of test specimen

Mechanical Property	Value
0.2 % Proof stress (MPa)	110MPa
Tensile strength (MPa)	180MPa
Elongation (%)	5.8%
Vickers Hardness	50HV

Fig.1 Microstructure of test specimen on AZ31 magnesium alloy

3. 実験結果及び考察

転造加工温度 723K で作製したねじの外観を **Fig.2** に示す。作製したねじは、外観上 (外観形状検査基準 (JIS-B1071)), 幾何的誤差は認められず、また、ねじ山の膨れ、割れ、座面変形等の欠陥発生はなく、表面欠陥の発生は認められなかった ((JIS-B1042 に従う)。金属組織を観察したところ、ねじの断面中心部は結晶粒が粗大化しているが、ねじ山の結晶粒は **Fig.1** の初期状態よりも微細であった。

Fig.2 View of rolling worked samples of screw

Fig.3 Microstructure near the screw thread

ねじ軸断面の金属組織観察を行った結果、ねじ中心部は結晶粒の形状が等軸状でありながらも **Fig.1** に比べて粗大化していたが、ねじ山の結晶粒は微細化していた。**Fig.3** にねじ山の金属組織の状態を示す。**Fig.3** はねじを軸方向に切断して、ねじ山組織を断面から観察した結果である。写真中の黒い点は組織観察時の腐食処理時に生じたピットであり、加工に伴う材質欠陥ではない。通常、ねじ山の断面金属組織にファイバー状組織が認められ、ファイバー組織は加工に伴って導入される塑性フローによるものであるとされている⁴⁾。

しかし、本研究で作成したねじ山の断面金属組織には塑性流動の痕跡は認められない。このことは、再結晶による結晶組織の変化が生じたためであると考えられる。ここで、注目するのは、ねじの中心部の結晶粒径は $70 \sim 90 \mu\text{m}$ と粗大化したのに対してねじ部分の結晶粒が微細化していることである。再結晶化は組織の微細化を伴うとされることから、塑性フローが認められないことから、転造加工中に再結晶化が生じていると考えられる。

ねじ山断面の結晶粒径に及ぼす加工温度の影響を調べるために、ねじ山の粒径分布を調べた結果が **Fig.4** である。**Fig.3** と **Fig.1** を比較すると、ねじ山の結晶粒径は初期粒径よりも微細化している。加工温度 623K では粒径 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ の範囲における結晶粒が多く存在すると同時に、局所的に粒径 $20 \mu\text{m}$ の結晶粒が数カ所認められる。一方の加工温度 723K では、623K での加工条件で見られたように、粒径 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ の範囲における結晶粒分布を示し、特に粒径 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ の結晶粒が多く認められた。すなわち、転造加工の温度が高くなるに伴って、ねじ面の結晶粒が微細化することが考えられる。このことは、ねじの結晶粒中に塑性フロー

Fig.4 Distribution of grain size near the screw thread

等が認められないこと及び結晶粒が微細化していることから、再結晶による結晶粒の変化の影響が大きいと考えられる。

再結晶には動的再結晶と静的再結晶とに分けられ、動的再結晶は加工中における回復と粒成長との繰返しによるものであるのに対して、静的再結晶は回復が生じた後に粒成長が生じる現象と考えられている⁵⁾。加えて、マグネシウム合金では集合組織の形成も考えられる⁶⁾。そこで、ねじ転造に対する動的及び静的再結晶の寄与について検討することにした。

本研究でのねじ作製時における転造時間はわずか 1s 程度である。加工時間で考えると動的再結晶の寄与はなく、主に静的再結晶の寄与が大きいと考えられる。ところが、粒形成がすべて静的再結晶機構に支配されると考えた場合、静的再結晶粒の粒径が温度とともに増加することから、723K の加工材の結晶粒が 623K の加工材に比べて大きいはずである。しかし、Fig.3 及び Fig.4 において結晶粒と加工温度との関係に相反する挙動が認められるはずである。また、すべり系が少ないとされる AZ31 において静的再結晶時には完全集合組織の発現があると考えられる。このことから、再結晶に伴う新粒方位の特徴を調べるため、結晶粒の方位分布測定を行った。

Fig.5 に結晶粒方位分布図を示す。(a)の 723K では、結晶粒に特定方位は認められなかったが、(b)の 623K では底面 (0001) 方位の結晶粒が多く認められている。AZ31 の完全集合組織化では底面方位に完全に配列するようになる。しかし、本研究で調べた結果では、(b)に示すように底面方位が多く認められるものの、全面が底面方位に配列しているのではなく、転造加工による結晶方位のランダム化及び微細化が生じた。このように温度の相違で結晶方位が異なっていることが分かる。

これが静的再結晶の寄与だけであるとするのであれば、結晶方位は 723K 及び 623K と同じであり、また、試験温度が高かった 723K の方が 623K での加工ねじに比べて結晶粒径は大きいはずである。しかし、結晶方位測定の結果が異なり、結晶粒径も 723K の方が 623K よりも微細であった。この事実より、動的再結晶機構の発現が寄与していると考えられる。ただし、正確な寄与率は不明である。本研究のような転造加工をはじめとする熱間加工においては、動的再結晶化と静的再結晶が生じる⁷⁾ことがあり、また、静的

再結晶粒成長は動的再結晶粒を受け継いで生じる⁵⁾。このことから、723K と 623K では、加工上においては温度差の影響として見られる。金属組織学上においては再結晶粒成長を決定する動的再結晶の影響が大きいと考えられる。

既報では動的再結晶は歪速度に影響することが示されている⁵⁾。AZ31 に対する 723K 及び 623K における引張試験で得られた伸びを比較すると、723K の方が本素材においてはひずみ速度 $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ において約 200%程度大きい。つまり、723K における変形には 623K での変形に比べて歪量が多いことがわかる。転造時間が一定であることから、歪速度として評価すると、723K の方が 623K に比べて動的再結晶が生じやすくなる。加工温度 723K では 623K に比べて歪エネルギーが大きいので、動的再結晶の駆動力である核生成サイトの発生頻度が増加すると考えられる。その後に静的再結晶が起きると考えれば、同一時間で比較した場合、623K に比べて核生成と成長が遅く、さらに成長しても隣接成長粒と衝突して粒成長が停止しやすくなる。このことから、加工温度は動的再結晶の発現機構に影響を及ぼしていると考えられる。

ねじ面の結晶粒は複雑な再結晶挙動により微細化している状態にあり、このような組織改善が生じると材料の特性は変化すると考えられる。一般的に金属材料の降伏挙動に及ぼす結晶粒度の影響は大きいといわれており、マグネシウム合金においても同様であると考えられている⁸⁾。そこで、ねじ山面の結晶粒微細化に伴う硬度変化を調べた。

(a) T=723K

(b) T=623K

Fig.5 Grain orientation maps near the screw thread

Fig.6 に断面ビッカース硬度分布を示す. 試験材の初期硬度は Table1 に示すように 50HV である. 一方のねじの硬度は, 微細な結晶粒の部分であるねじ山で 100HV 近傍あり, 初期硬度と比較して 40HV 程度の硬度上昇がある. 本研究における硬度上昇については, 加工硬化及び結晶粒微細化硬化が考えられる. しかし, 当該ねじでは, 動的再結晶による微細化が生じていると考えられ, 加工時の転位や加工組織はすでに動的回復により喪失していると考えられる⁷⁾. したがって, ねじ面の硬度上昇は, 加工硬化よりはむしろ結晶粒微細化の影響が大きいと考えられる. 以上のことから, 熱間転造加工により AZ31 合金でねじの作製が可能になることが分かった. ねじは, 転造中の動的再結晶と静的再結晶の両方の機構で高温変形しやすくなったためであると考えられる. その結果, ねじ山の結晶粒は微細化し硬度が増していると考えられる.

Fig.6 Vickers hardness distribution for cross section area

4. まとめ

本研究では, マグネシウム合金 AZ31 に熱間転造加工を行ってねじを作製し, 転造加工中に生じる加工のメカニズムを材料組織上から検討するために, 金属組織観察, 硬度測定及び方位測定を行った. その結果, 再結晶温度以上の 2 種類の温度下において, 表面欠陥等が発生せずにねじを作製することが可能になった. 金属組織観察を行った結果, ねじ山断面の結晶粒は初期粒に比べて著しく微細化した. 方位測定等を行うことにより, ねじ加工が行えた理由として, 転造中に動的並びに静的再結晶が生じたためであると考えられた. ねじ山の硬度は中心部に比べて増加しており, 硬度増加の原因は結晶粒の微細化によるものであると推定された.

謝 辞

本研究を実施するにあたり, ご協力いただきました, (株) 栗本鐵工所 道浦博士 様, (株) 喜多川テクノ 喜多川眞好 様に厚くお礼申し上げます.

参 考 文 献

- 1) 森久史・野田雅史: 機械の研究, **58-1** (2005), 77-82.
- 2) 上田光二・谷州博・中橋喬・坂本満・上野英俊: 第 138 回日本金属学会春講演, (2006), 118-118.
- 3) 渡辺博行・向井敏司・石川皓一・大神田佳平・高津正秀・東健司: 軽金属, **49-8** (1999), 401-404.
- 4) 山本晃: ねじ締結の原理と設計, (1995), 167-178, 養賢堂.
- 5) 牧正志・田村今男: 鉄と鋼, **70-15** (1984), 2073-2080.
- 6) 稲垣裕輔: 金属誌, **69-3** (2005), 283-290.
- 7) 楊統躍・三浦博己・酒井拓: 金属誌, **68-11** (2004), 946-951.
- 8) 小池淳一・宮村剛夫: 軽金属, **54-11** (2004), 460-464.