論文

展延性マグネシウム合金 AZ31 板の機械的性質に及ぼす 温間圧延条件の影響

鑑田 征雄* 高松 和也** 橋詰 壮***

Effect of Warm-Rolling Conditions on Mechanical Properties of Magnesium Alloy AZ31 Sheet

Ikuyo YARITA*, Kazuya TAKAMATSU** and Tsuyoshi HASHIZUME***

(Received on September 27, 2006)

There is high demand for the use of magnesium alloys in automotive and electric parts, because that they have the lowest density among metals for practical use, and have excellent properties such as high specific strength, high vibration damping ratio and high electromagnetic interference shielding. However, there is a little application for magnesium alloys as metal-forming products because of their poor plastic deformability in the normal temperature range and their high production cost. To promote products manufactured by metal forming, rolling technologies enabling the production of thin sheets with suitable mechanical properties and surface qualities are required. For this purpose, hot-rolled AZ31 sheets are experimentally rolled with or without lubrication under temperatures ranging from 293K to 573K, and warm-rolled sheets are annealed for 1h at 523K. Grain structures are observed and their mechanical properties such as tensile strength, elongation and r value are investigated by tensile tests. Finally, the effect of warm-rolling conditions on their grain structures and mechanical properties are discussed for both as-rolled and annealed sheets.

Key words: magnesium alloys, warm rolling, tensile test, mechanical properties, grain structure

1. 緒言

マグネシウム合金は、実用金属中で最も軽量であり、比強度が高い、電磁シールド性がよい、振動吸収性がよいなど優れた特性を有し、自動車部品や電気・電子機器などの多くの製品に利用されつつある。しかしながら、常温では底面すべりしか起こらず温間加工が必要となるとともに、表面の研削加工処理なども必要となり加工コストが非常に高くなる。このため、塑性加工による製品は鋳造やチクソモールディングなどの溶融加工による製品に比べ非常に少ないのが現状である。

この現状に対し、最近ではマグネシウム合金（以下、Mg合金）の塑性加工に関する研究も多く行われるようになっていく。圧延を例にとると、冷間圧延時のエッジ割れ挙動¹⁾、高速大圧下圧延時の変形挙動²⁾、圧延温度や圧下率などの圧延条件が材料特性に及ぼす影響³⁾、圧延温度が結晶組織や成形性に及ぼす影響⁴⁾などの効率的な圧延や材料特性に関する研究報告がなされ、製造技術の確立に向けた基礎的研究が行われている。筆者らは、平面ひずみ圧縮試験時のMg合金AZ31の変形挙動を明らかにするとともに⁵⁾、板圧延時の変形・負荷挙動に及ぼす温間圧延条件の検討を行ってきた⁶⁾。

本研究では、Mg合金AZ31熱間圧延材を用い、448 Kから

573 Kにおいて潤滑を2条件変えて圧延実験を行い、結晶組織を観察するとともに、温度、圧下率、潤滑条件などの圧延条件が0.2%耐力、引張強さ、全伸びおよび r 値などの機械的性質に及ぼす影響を調査した。また、焼鈍による結晶組織や機械的性質の変化についても調べた。

2. 温間圧延実験

2.1 供試材

供試材はMg合金AZ31の熱間圧延板材（板厚2.5mm）を448 Kから再結晶が完了すると思われる573 Kにおいて潤滑をDry、合成エステル⁷⁾の2条件にて温間圧延したままの材料および523 K×1hにて焼鈍した材料を用いた。後述するように、焼鈍温度523 Kではどの温間圧延材でも完全に再結晶することを確認している。なお、圧延温度が常温および373 Kでは、クラック発生の限界圧下率が20%以下であり⁶⁾、効率的な圧延は期待できないと判断し、448 K以上で圧延した材料について引張試験による機械的性質を調査した。

Table 1に化学組成を示す。

Table 1 Chemical composition of AZ31 sheets (mass%)

Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Mg
3.00	1.00	0.40	0.003	<0.01	<0.01	Bal.

2.2 温間圧延

Fig. 1に使用した圧延機の概要を、Table 2に圧延実験条

* 千葉工業大学工学部 〒275-0016 習志野市津田沼 2-17-1

** 千葉工業大学大学院工学研究科 同上

*** 日本金属㈱ 〒174-8560 東京都板橋区舟渡 4-10-1

件を示す。圧延機は段数 2 段，ロール径 $\phi 150$ mm，上下のロールとも 200 V-100 W の棒状ヒータが 12 本挿入されており設定温度まで加熱，制御できるようになっている⁶⁾。試験片は 70 mm 幅×2.5 mm 厚×長さで小型電気炉にて所定の温度に 30min 均熱した後，所定の圧下率が得られるよう圧延した。圧延前後の材料の温度差は 20 K 以内であった。圧延は常温から 573 K まで行った後，空冷している。潤滑は Dry，合成エステル の 2 条件で行った。潤滑油は圧延直前にロール表面に塗布している。なお，圧延温度 573 K では，圧延材は完全に再結晶されており，熱間圧延の範疇となるが，本稿では温間圧延として扱った。

焼鈍条件は，圧延後に変形組織が残留する圧延温度 448K，圧下率 25%の材料について焼鈍し，完全に再結晶する 523K×1h で大気焼鈍とした。Fig. 2 に Dry で圧延した場合の圧延材と焼鈍材の結晶組織を示す。十分に再結晶していることが分かる。

Fig.1 Outline of warm-rolling apparatus

2.3 圧延実験結果

2.3.1 圧延温度と顕微鏡組織

Fig. 3 に圧下率 25%，Dry で圧延した温間圧延材(as-rolled 材)および焼鈍材(annealed 材)の圧延温度 473 K，523 K およ

Table 2 Experiment conditions for warm-rolling

Rolling mill	2-high
Roll	$\phi 150 \times w80$
Roll material	SKD61
Rolling speed	4.2 m/min
Aimed rolling temperature	448 K, 473 K, 498 K, 523 K, 573 K
Lubrication (Kinematic viscosity)	Dry Synthetic ester (33.1 mm ² /s at 313 K)

As-rolled sheet
Rolling temp. 448 K
Reduction 25%
Dry lubrication

Annealed sheet
Annealing condition
523 K × 1 h

Fig. 2 Microstructures of as-rolled and annealed sheets

び 573 K における板厚中心部の光学顕微鏡結晶組織写真を示す。473K における as-rolled 材の結晶粒は変形組織が認められ，細粒と粗大粒の混粒結晶組織になっており，完全には再結晶していない。Annealed 材は結晶粒が成長し，均一に等軸化していることが分る。523 K の場合には，as-rolled 材でも動的再結晶により結晶粒は等軸化しているが，完全に変形組織は取りきれしていない。焼鈍を行うことで再結晶化し，結晶粒は等軸化する。573 K の場合には，as-rolled 材でも完全に再結晶しており，annealed 材の組織と大きな

Fig. 3 Comparison of microstructures between as-rolled sheet and annealed sheet at rolling temperatures of 473 K, 523 K and 573 K (Dry lubrication, reduction 25%)

違いはない。圧延温度の上昇とともに組織は均一化、等軸化、粗大化の傾向が見られる。

2.3.2 圧下率と顕微鏡組織

Fig. 4 に圧延温度 473 K における as-rolled 材の圧下率による光学顕微鏡組織の変化を示す。圧下率が高くなると結晶粒は細かく均一になることが分かる。特に、40%では等軸晶になり、均一に細粒化している。圧延のままでは完全に再結晶しておらず、双晶変形がみられる。これは圧下率が 19%以下で顕著である。

Fig. 4 Effect of reduction on microstructure of as-rolled materials (Rolling temp. 473 K)

2.3.3 潤滑の顕微鏡組織に及ぼす影響

Fig. 5 に温度 523 K において Dry 圧延の場合と合成エステルを使用して約 25% 温間圧延した場合の as-rolled 材および annealed 材の板厚表面層と中心層の顕微鏡組織を示す。As-rolled 材をみると、合成エステルを用いた場合に比べ、Dry で圧延した材料の結晶組織は、表層部では細粒化しており、板厚中心部では細粒と粗大粒が混在して板厚方向に不均一である。Annealed 材では不均一性は小さくなるが、合成エステルの場合に比べると混粒組織であり、焼鈍前の結晶組織の影響が残っていることが分かる。

3. 機械的性質

3.1 実験方法

圧延条件が圧延後の板材の機械的性質に及ぼす影響を、引張試験により調べるとともに、焼鈍によりその性質がどの程度変化するかを調べた。引張試験は、圧延温度 448 K 以上の as-rolled 材と annealed 材について行った。試験片は JIS13 号 B に相似形状で、平行部長さが 30 mm の試験片を主に圧延方向から放電加工により採取した。圧下率 25% の合成エステルを使用した圧延材に関しては、圧延 (L) 方向と幅 (C) 方向から試験片を採取して引張試験し、異方性を調べた。 r 値は、塑性ひずみ 13% まで負荷した後に除荷して求めた。引張試験は常温において 1 mm/min の引張速度で行った。

3.2 引張試験結果

3.2.1 圧延温度の影響

Fig. 6 に圧下率 25% の場合の圧延温度が圧延材の 0.2%

Fig. 5 Effects of lubrication on uniformity of micro-structures of as-rolled and annealed materials (Rolling temp. 523 K, reduction 25%)

耐力、引張強さ、全伸びに及ぼす影響を示す。圧延温度の上昇とともに、圧延時の潤滑や焼鈍の影響は小さくなることが分かる。

耐力、引張強さは as-rolled 材のほうが大きく、圧延温度が高くなるほど耐力、引張強さは低下する。448 K から 498 K では、潤滑条件の影響が現れており、合成エステルを用いたものより Dry のほうが耐力、引張強さともに大きくなっている。焼鈍を行うと、耐力、引張強さはほとんど圧延素材と一致し、潤滑条件による影響が減少している。圧延温度 523 K では動的再結晶などにより、潤滑や焼鈍の影響はほぼなくなり、圧延素材とほぼ同程度にまで下がる。573 K では潤滑や焼鈍の有無に関係なく母材の耐力や引張強さと同じ値を示している。

全伸びは圧延温度が高くなるしたが大きくなるが、573 K では合成エステルを使用した as-rolled 材以外は結晶粒が大きくなるために若干低下する。圧延温度 523 K では as-rolled 材でさえも圧延素材と同程度以上の伸びとなる。523 K 以下では、合成エステルを用いたものより Dry の場合のほうが伸びは大きい。再結晶温度以下の 448 K から 498

K の圧延では焼鈍による伸びの改善効果は大きいですが、圧延温度 523 K 以上ではその効果は小さくなる。573 K では、合成エステルを使用した as-rolled 材が若干大きい伸びを示しているが、潤滑条件や焼鈍による影響はほとんど無くなり、伸びはほぼ同程度となる。

以上のように、焼鈍により耐力や引張強さは圧延素材とほぼ等しくなるが、伸びは 523 K で圧延素材の伸びより大きくなる。573 K ではどの条件でも圧延素材の伸びより大きく、条件による差は小さい。

Fig. 6 Effects of rolling temperature on 0.2% proof stress, tensile strength and total elongation (Reduction 25%)

523 K 以下において、全伸びに潤滑や温度の影響が大きく現れたのは、せん断帯によるものと考えられる。473 K 以下の圧延では、Fig. 7 に示すように、粗大な結晶と微細な結晶がほぼ等間隔に並んだ带状組織になる⁶⁾。特に潤滑を用いた場合には、摩擦発熱による圧延材料表面層の温度が Dry の場合より低くなり、せん断帯は発生し易くなる。Fig. 8 に 1 例を示すように、圧延温度が 498 K 以下の as-rolled 材は圧延時に発生したせん断帯に沿って破断が発生し、進展している。これから、Mg 合金の塑性加工ではせん断帯が発生しない温度条件にて加工することが重要であると示唆される。

Fig. 7 Shear bands occurred in the thickness direction (Rolling temp. 448 K)

Fig. 8 Fracture occurred during tensile testing (Rolling temp. 448 K)

3.2.2 圧下率の影響

Fig. 9 に圧延温度 473 K における圧下率が圧延材の 0.2% 耐力、引張強さおよび全伸びに及ぼす影響を示す。圧下率が大きくなるにしたがい耐力は高くなるが、引張強さ、全伸びは明確な傾向はない。潤滑条件の影響は顕著に現れており、Dry で圧延した材料の方が耐力は高く、伸びも大き

Fig. 9 Effects of rolling reduction on 0.2% proof stress, tensile strength and total elongation (Rolling temp. 473K)

い。焼鈍をしてもこの傾向は同じである。引張強さは圧下率や潤滑条件による影響がほとんど無い。焼鈍を行うと、引張強さは低下し、圧延素材と同程度になり、全伸びも改善される。

3.2.3 圧延方向と幅方向の異方性

Fig. 10 に合成エステルを用い圧下率 25% で圧延をした材料の L 方向と C 方向の 0.2% 耐力、引張強さ、全伸びと圧延温度との関係を示す。耐力、引張強さは C 方向のほうが高い値となる。温度が高くなるとその差は小さくなり、523 K 以上では L 方向と C 方向とも同程度の値になる。圧延温度 573 K では耐力と引張強さは L 方向、C 方向とも素材の値とほぼ一致する。全伸びは、L 方向と C 方向との差が特に大きく、圧延温度 448 K、as-rolled 材の L 方向では 5% 以下の伸びで破断しているが、C 方向では 25% 程度の伸びが得られている。523 K 以上では L 方向と C 方向の伸びの差は小さくなり、焼鈍することで差はほとんど無くなるとともに、素材の全伸びの値以上になる。さらに、573 K では as-rolled 材のほうが annealed 材より伸びは大きくなる。

Fig. 11 に合成エステルを用い、圧下率 25% の圧延材の r 値と圧延温度との関係を示す。 r 値は素材が $r_0=2.1$, $r_{90}=3.1$ 程度と最も高く、圧延温度が高くなるに従い低下する。本温度領域では、L 方向に比べ、C 方向の r 値のほうがほぼ 1.0 程度高い。As-rolled 材と annealed 材との差はほとんどなく、523 K、573 K ではほぼ等しくなる。圧延温度 573 K では $r_0=1.5$, $r_{90}=2.4$ 程度である。

4. 結 言

展延性マグネシウム合金 A Z 31 の温間圧延条件が機械的性質に及ぼす影響と焼鈍による機械的性質の変化を引張試験により調査した結果から以下のことが言える。

- (1) 圧延温度の上昇とともに、0.2% 耐力、引張強さ、伸びに及ぼす圧延時の潤滑や圧延後の焼鈍の影響は小さくなる。圧延温度 523 K、573 K では、0.2% 耐力、引張強さは圧延素材とほぼ等しくなる。全伸びは圧延温度が高くなるにしたがい大きくなり、as-rolled 材でも 523 K 以上では圧延素材以上になる。
- (2) 焼鈍により、耐力や引張強さは圧延素材とほぼ等しい値になる。全伸びは 523 K 以上では焼鈍効果がなくなってくる。
- (3) 圧延温度が 498 K 以下の as-rolled 材では圧延時に発生したせん断帯に沿って破断が発生し、ほとんど伸びが得られない。
- (4) 圧下率は 0.2% 耐力に影響する程度で、引張強さや全伸びへの影響は小さい。
- (5) 圧延温度 498 K より低い圧延温度では 0.2% 耐力、引張強さ、伸びは L 方向に比べ、C 方向の方が高く、面内異方性が大きい。523 K 以上ではその差は小さくなり、焼鈍することで機械的性質の差は無くなる。 r 値は、素材が最も高く、圧延温度が高くなるに従い低下するが、L 方向ではほぼ 1.5 以上、C 方向では 2.4 以上を示す。

参 考 文 献

- 1) 阿高松男・桜井勇旗・柳本潤・柳田明：54 回塑加連講

Fig. 10 Effect of rolling temperature on planar anisotropy

Fig. 11 Effect of rolling temperature on r value

論, (2003), 103-104.

- 2) 宇都宮裕・左海哲夫・吉田典弘：56 回塑加連講論, (2005), 9-10.
- 3) 柴田佑輔・松本賢司・会田哲夫・高辻則夫・吉本隆志・松永卓・和田敏秋：56 回塑加連講論, (2005), 13-14.
- 4) 佐藤丈二：岐阜県製品技術研究所研究報告, No.3 (2002).
- 5) Yaritha, I., Naoi, T. & Hashizume, T.: JSME International Journal, Series A, 48-4 (2005), 299-304.
- 6) 鎌田征雄・橋詰壮・高松和也：塑性と加工, 47-549 (2006), 973-977.