アルミニウム-マグネシウム合金鋳物の被削性について*

財満 鎮雄** 小山 欽市*** 村本 光熙****

Shigeo Zaima, Kinichi Koyama and Mitsuhiro Muramoto: On the Turning-Machinability of Aluminium-Magnesium Cast Alloys. The turning tests were carried out on aluminium cast alloys. The specimens were metal moulding rods of 80 mm ϕ × 120 mm and were melted with different amounts of magnesium in the range of 0.5~8.5%. The effects of magnesium additions on the machinability of aluminium alloys were examined mainly in the sight of the cutting resistance, cutting surface and growth of the built-up edge and chip treatment.

According to the results, the cutting resistance decreases gradually with the rise of the magnesium content and when the magnesium content is over 2.5%, the cutting resistance shows almost constant values with the cutting speed of 100~500 m/min in this experiment. The cutting resistance of the G-2 tool shows a tendency similar to that of the SKH-4 tool, but the value of the former is about 40% higher than the latter. It seems that the cutting resistance of the alloy is not influenced by heat treatments such as quenching or tempering. However, it can be said that the hardness decreases and the

** 静岡大学工学部機械工学科 (Department of Machinery, Faculty of Engineering, Shizuoka University, Hamamatsu)

*** 株式会社建材社東京支店 (Keizansha Co.Ltd., Tokyo)

**** 三菱電機株式会社群馬製作所 (Mitsubishi Electric Work Co.Ltd., Gunma)

* 1966 年 4 月本会東京大会に発表

cutting resistance increases slightly by quenching, and by tempering the cutting resistance decreases again slightly and is nearly equal to the as-cast cases. When the magnesium content is small, there is the formation of many built-up edges and continuous straight-type chips which poses a question of treatment. When the magnesium content is over 2.5%, however, there is no such a problem. The surface roughness is comparatively good with more than 2.5% magnesium, and the surface of the as-cast alloy is inferior to the heat treated alloy. The machinability is improved by magnesium additions, but it seems that there is no great difference in the adding effect if the magnesium content is more than 2.5%.

(Received May 2, 1966)

I. 結 言

軽量で適当な強度をもち、しかも耐食性も優れているため、アルミニウム合金の機械部品への進出が目立ってきた。しかし、その機械加工に関してはまだ未解決の問題が残されているようで、ある種の合金では工具寿命の点ではなんらの問題もないが、良好な切削仕上面の得られにくいものがあり⁽¹⁾、またアルジルのように普通鋼材ではみられないような激しい工具摩耗を呈するものもある⁽²⁾。著者らはアルミニウムおよびその合金の被削性について検討しており、さきに合金元素として重要な成分の一つである珪素⁽³⁾、銅⁽⁴⁾、などについて合金の被削性におよぼす添加効果を求めた。本報においては合金元素として、やはり重要な成分元素であるマグネシウムの添加が、合金の被削性におよぼす影響について切削抵抗、仕上面粗さおよび切屑状況などの点より検討した結果を報告する。

II. 試 料

実験に供したアルミニウム-マグネシウム合金鋳物は新塊高純度アルミニウムを(1S)使用し、0.5~8.5%Mgの範囲で5種類に添加量をかえてTable 1に示すように、マグネシウム添加量零のものを含めて、6種類の金型鋳造棒

Table 1 Chemical compositions of used specimen.

No. of specimen	Nominal magnesium percentage	Chemical composition (%)	
		Mg	Al
1	0		99.8 (1S)
2	0.5	0.54	R
3	1.5	1.55	R
4	2.5	2.53	R
5	6.0	5.96	R
6	8.5	8.39	R

(80mmφ×120 mm)を溶製した。

原料としてアルミニウムは1S材(99.8%Al)を使用し、750°Cに黒鉛のつば中で溶解した。溶解炉は試験用シリコン坩堝を使用した。マグネシウム地金1種を配合量測定して投入攪拌した後、内径80 mmφ、長さ200 mm、肉厚

約10 mmの金型(150°~250°Cに予熱)に680°~700°Cの鋳込温度で鋳込んだ鋳造材の表面層約2 mmを荒削りして取除き、直径76 mmの丸棒を供試試料とした。これらの試料の組織をみればマグネシウム8.5%ではβの存在がはっきり認められ、マグネシウム6.0%および2.5%のものでは粒界にわずかに析出物があり、βのような組織も極くわずかに認められるようであった。

これらの試料について、マグネシウム含有量と剪断強度 τ 、およびビッカース硬さ(5 kg荷重) Hvの関係を示せばFig.1のようになる。剪断強度はマグネシウム2.5%程度までは添加量の増加とともに強化されるが、2.5%をこえ

Fig.1 Relation between magnesium content and shearing strength or Vickers hardness.

るとマグネシウム添加量の増加にかかわらず、ほぼ一定の剪断強度を示すようになり、また熱処理による変化もほとんど認められていない。しかし、硬さはマグネシウム添加量の増加とともに次第に硬化し、かつ鋳造のままのものより溶体化処理したものはやや軟化するが、焼もどしによつて再び硬化して鋳造のままのものよりやや高い硬さを示している。

本系の実用合金としては、展伸材ではマグネシウム2.5%程度の52S、4%程度の56Sがあり、鋳造材ではヒドロナリウムといわれるマグネシウム4%程度のJIS 7種Aと10%程度の7種Bがあり、いずれも機械的性質、アルマイト加工性、耐食性が良好でかつ被削性も良好であるといわれているものである。

III. 実 験 要 項

- (1) S.Zaima; Proc.7th Japan Cong.Test.Mat.,(1964), 75.
- (2) 森永, 財満, 飯尾: 本誌, 30(1966),463.
- (3) S.Zaima; Proc.8th Japan Cong.Test.Mat.,(1965), 84.
- (4) S.Zaima; Proc.9th Japan Cong.Test.Mat.,(1966), 25.

使用機械は OKK-RAMO 型高速精密旋盤 (主軸回転数 55 ~ 2,500 rpm, ベット上の振り 370 mm, 5.5 kW) により, 工具は刃先形状 0- θ -7-7-7-0-0 の高速度鋼 (SKH 4) 製, および超硬合金 (G 2) 製片刃バイトの 2 種類の工具を使用した. ここで横すくい角 θ は前者では $-5^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ および 30° の 5 種類に, 後者では $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ および 30° の 4 種類に変化した.

切削条件は切削速度を $V=100, 300$ および 600 m/min の 3 種類, 送りを $f=0.06, 0.13$ および 0.25 mm/rev の 3 種類, 切込み $t=1.0$ mm 一定として, これらの条件を適宜組合せて切削条件を変化した乾式切削である. 切削抵抗の測定には前報で説明した工具動力計⁽²⁾ (軟鋼製円板状バイト保持器に歪ゲージを貼付けてピックアップとした) により自動平衡式記録計に記録した. 片刃バイトを使用したので, 切削抵抗として主分力 T と送り分力 F の 2 分力を測定した.

IV. 切 削 抵 抗

アルミニウム-マグネシウム合金鋳物のマグネシウム含有量と切削抵抗の関係を示せば, 高速度鋼バイトおよび超硬バイトの場合にそれぞれ Fig. 2, 3 のようになる.

高速度鋼バイトの場合, 横すくい角 θ が大きくなるにしたがつて切削抵抗は次第に小さくなるが, マグネシウム含有量が 2.5% 程度をこえると送り f が同一ならば切削速度

よぼす切削速度の影響が認められ, その傾向は横すくい角 θ が小さいほど甚だしく, 切削速度の上昇につれて切削抵抗は減少する. 横すくい角が $\theta = -5^\circ \sim 0^\circ$ と小さい間は切削抵抗が増大し, とくに送り分力も主分力と同程度の大きさを示しているが, これは後述の構成刃先の生成や, 切削の際のバリ発生 (バリは切削巾を増加させるので, 切削抵抗が大きくなる) のためと思われる. 切削抵抗, とくに主分力と送りの関係も横すくい角が一定ならばほぼ比例関係にあり, 送りが倍加すれば切削抵抗も倍加するようである. 超硬バイトの場合も高速度鋼バイトの場合と同様な傾向がみられるが, 両者の切削抵抗を比べれば, たとえば Fig. 4 のように主分力, 送り分力ともに超硬バイトによる方が約 40% 程度大きい値を示している. なお, 超硬バイトの実験範囲では横すくい角が大きい場合でも, マグネシウム添加量が 8.5% と多い場合でも, 切削抵抗に切削速度依存性が認められ, 切削速度の上昇とともにわずかながら切削抵抗とくに主分力が減少する.

本実験では片刃バイトを使用し, 切込みに対して送りを小さくつたので, 送り $f=0.06 \sim 0.13$ mm/rev 程度では一応 2 次元切削に近似して考えることができる. さて, 2 次元切削理論では Fig. 5 のように 2 次元切削を図解して, 工具すくい面に垂直力 N_0 と摩擦力 F_0 との合力 R が切削抵抗として作用し, その反力として被削材剪断面に切削力

Fig. 2 Relation between magnesium content and cutting resistance in the case of SKH4-tool.

V にかかわらず切削抵抗はほぼ等しい値を示している. マグネシウム含有量が減少するにしたがつて, 切削抵抗にお

R が作用するとする. 切削力 R を図のように切削方向分力 F_c と, それに垂直分力 F_t とに分ければ, 工具すくい面上

の摩擦係数 μ はつぎのように与えられる⁽⁵⁾。ただし、工具すくい角を α とする。

$$\mu = \tan \beta = F_0 / N_0 = (F_t + F_c \tan \alpha) / (F_c - F_t \tan \alpha) \quad (1)$$

の場合について高速度鋼バイト、超硬バイトの工具すくい面における摩擦係数を求めてみれば Table 2 のようになる。これからみれば、マグネシウム添加量が増加するにしたがって摩擦係数は減少し、2.5% マグネシウム以上にな

Fig.3 Relation between magnesium content and cutting resistance in the case of G 2-tool.

Fig.4 Effect of tool material on cutting resistance.

ここで本実験の結果より切削方向分力 F_c に主分力 T 、垂直分力 F_t に送り分力 F を近似的に適用して、切削速度 $V=300$ m/min, 送り $f=0.13$ mm/rev, 横すくい角 $\theta=20^\circ$

(5) たとえば、精機学会編：改訂精密工作便覧（コロナ社，昭33年版），25 など。

Fig.5 Illustration of orthogonal cutting.

Table 2 Comparison coefficient of frictions on tool face between two tool materials considered to orthogonal cutting.

Nominal magnesium percentage	Coefficient of friction	
	SKH 4-tool	G 2-tool
0	1.008	1.100
0.5	1.155	1.071
1.5	1.008	0.974
2.5	0.845	0.974
6.0	0.802	0.943
8.5	0.797	0.835

ると減少の割合は少なく、高速度鋼バイトに比べて超硬バイトの方が摩擦係数が大きくなる。マグネシウム添加量の少ない場合に摩擦係数が非常に大きく、1より大きい値となることもあるのは、後述のように、構成刃先の生成が旺盛であることもその原因の大きなものと思われる。

V. 剪 断 応 力

Fig.5において切込みを t 、切屑の厚さを t_c 、切削速度を v 、切屑の流出速度を v_c とし、剪断角を ϕ とすれば、切削比 r_c は

$$r_c = t/t_c = v_c/v = \sin \phi / \cos (\phi - \alpha) \quad (2)$$

一方、剪断ひずみ γ は⁽⁵⁾

$$\gamma = \cot \phi + \tan (\phi - \alpha) \quad (3)$$

(2)、(3)より剪断角 ϕ を消去すれば

$$\gamma = (r_c + 1/r_c) \sec \alpha - 2 \tan \alpha \quad (4)$$

単位時間に工具によりなされる仕事は vF_c であるが、この仕事は工具すくい面上の摩擦仕事 $v_c F_0$ と、被削材の塑性変形仕事 $AvK_c\gamma$ の和に等しいと考えられる⁽⁶⁾。ここで A は切削面積、 K_c は平均剪断降伏応力である。すなわち、工具先端が切削面をこすらないとすれば次式が成立する。 $(F_0 = F_t + F_c \tan \alpha)$

$$vF_c = v_c F_0 + AvK_c\gamma \quad (5)$$

(5)と(2)より

$$K_c = (F_c/A - r_c F_t/A) / \gamma \quad (6)$$

よって、工具すくい角と切削巾を与え、切込量 t 、切削比 r_c 、切削方向分力 F_c 、垂直分力 F_t を与えれば K_c が求められる。本実験において2次元切削に近似して切削が純粋剪断によるものと考え、横すくい角 $\theta = 0^\circ$ および 20° 、切削速度 $V = 300$ m/min、送り $f = 0.06$ mm/revとして(6)式にしたがつて、切削抵抗から剪

Fig.6 Calculated shearing force.

断力を求めれば Fig.6 のようになる。前述の剪断試験よりの実測値では、マグネシウム 2.5% 以上ではマグネシウム

量にかかわらずほぼ一定の剪断応力(約 14 kg/mm²)となり、ここでの計算値がやや大きい値を示しているが大差な

Fig.7 Aluminium-Magnesium system diagram.

Fig.8 Influence of heat treatment on cutting resistance.

い。これは工具先端の摩擦などを無視し、切屑厚さの測定にも凹凸が多いための誤差が大きいことも原因であろう。また、マグネシウム 1.5% 以下の材料では、実験値と計算値との差が大きく、これは切屑厚さ測定の際の誤差などを考慮しても甚だしく、後述の切屑形態からもみるように切屑生成が純粋な剪断のみによるものではないことが原因と思われる。いずれにしても、マグネシウム 2.5% 以上で

(6) D.S.Dugdale and H.E.Enahoro: Intern. J. Mach. Tool Des. Res., **34** (1964), 219.

は切削がほぼ純粋な剪断で進行するものとみて差支えないようである。

純粋剪断ではなくなり、かつ構成刃先の生成も大きいものと思われる。このことは析出による熱処理効果が期待出来ないマグネシウム 2.0% 以下でも切削抵抗に差が大きく認められることにも考えられる。しかし、いずれにしてもとくにマグネシウム 2.5% 以上の場合でも、本実験範囲の熱処理では実用上切削抵抗に大きい影響を示すとは認められない程度であつた。

VII. 構成刃先, 切屑処理

被削性の要素として構成刃先, 切屑処理の難易も忘れることは出来ない。

構成刃先は鋭利な切刃をくるんで鈍角にし、かつ切込量を増加させるから切削抵抗を増大させ、仕上面粗さを不良にし仕上寸法を狂わせる。たとえば Fig.9 は切削速度 $V=100$ および 600 m/min, 送り $f=0.13$ mm/rev

side rake angle	Mg (%)														
	0	2	4	6	8	0	2	4	6	8					
	cutting speed V=100m/min					SKH4-tool					V = 600m/min				
-5°	●	●	●	○	○	○	●	●	●	○		○		○	
0°	●	●	●	○	○	○	●	●	●	○		○		○	
10°	●	○	○	○	○	○	●	○	○	○		○		○	
20°	●	○	○	○	○	○	●	○	○	○		○		○	
30°	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○		○	
						G2-tool									
0°	●	●	○	○	○	○	●	●	○	○		○		○	
10°	●	●	○	○	○	○	●	●	○	○		○		○	
20°	●	○	○	○	○	○	●	○	○	○		○		○	
30°	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○		○	
depth of cut t=1.0mm feed f=0.13 mm/rev					● adhered in great quantities ● adhered in medium quantities ○ no adhered										

Fig.9 Observation of built-up edge on chip surface.

Photo.1 Chip form in the case of $V=300$ m/min, $f=0.13$ mm/rev, $t=1.0$ mm and G2-tool ($\theta=20^\circ$).

VI. 熱処理の影響

Fig.7 のアルミニウム-マグネシウム 2 元系状態図よりみるように、マグネシウム 2.5% 程度以上のものでは組織や性質に熱処理効果が期待出来るので、前述のようにこれらの試料を溶体化処理、焼もどし時効した場合の切削抵抗を求めれば、たとえば Fig.8 のようになる。図は切削速度 $V=300$ m/min, 切込み $t=1.0$ mm, 横すくい角 $\theta=0^\circ$, 20° の場合について高速度鋼バイト使用の例である。図にみるように、横すくい角が小さい場合多少の変化が認められ、溶体化処理材が切削抵抗が最も大きく、鋳造のままのものが最も小さい。溶体化したものは Fig.1 にもみるように硬さが低い、切削抵抗が大きくなることは切削機構も

の場合に構成刃先が切屑表面への付着状況を観察した結果の一例である。構成刃先の脱落系路からみれば一部は仕上面にのり、また直接脱落するものも考えられるが、切屑に付着して脱落するものから全体の傾向を類推することが出来る。これから横すくい角が小さくなるにつれ、マグネシウム量が少なくなるにつれ、かつ切削速度が減少するにつれて構成刃先は発生しやすく、切削抵抗増加の原因となる。また両工具を比較すれば、超硬バイトの方が構成刃先が発生しやすいようで、超硬バイトの方が高速度鋼バイトより切削抵抗の大きい値を示す一因とも思われる。

切屑発生状況をみれば、たとえば切削速度 $V=300$ m/min, 送り $f=0.13$ mm/rev, 超硬バイト 横すくい角 $\theta=20^\circ$ の場合 Photo.1 のようになるが、マグネシウム含有量

が多くなるにしたがつて不連続型の剪断切屑となり処理容易になる。また溶体化処理を施すと硬さが低下するため、連続型の切屑発生が多くなり、切屑処理は困難となるが、焼もどし時効を施せば剪断型が多くなり再び切屑処理は容易になる。

VIII. 仕 上 面 粗 さ

たとえば Photo.1 の切削条件における仕上面粗さ H_0 を大越式表面粗さ試験機 (触針型, サファイア触針先端半径

Fig.10 Relation between magnesium content and surface roughness.

10 μ)にて最大粗さ表示方式によつて測定すれば Fig.10 のようになる。鑄造のままの場合が仕上面粗さは多少劣るが、鑄造組織の不均一性が影響していると思われる。マグネシウム含有量が多くなるにしたがつて仕上面粗さは良好になり、純アルミニウムに近いほど仕上面が劣り Fig.9 の構成刃先の生成状況と対応している。工具材料の差はほとんどないとみられる。

IX. 結 言

以上要約すれば、0.5~8.5% マグネシウム範囲で種々にマグネシウム含有量を変化したアルミニウム-マグネシウム合金鑄物について、主として切削抵抗、仕上面粗さおよびそれに付随した構成刃先の生成、切屑処理などの見地より被削性を検討した。その結果、

(1) マグネシウム添加量が増加すれば切削抵抗は減少し、2.5% 以上になるとマグネシウム量、切削速度にかかわらず切削抵抗はほぼ等しい値を示す。超硬バイトでは高速度鋼バイトの場合と同様であるが、切削抵抗の値は前者の場合が約 40% 程度大きい値をとる。

(2) 工具すくい面の摩擦係数は超硬バイトの場合が高速度鋼バイトより大きく、2.5% マグネシウムまでは添加量とともに摩擦係数は減少するが、2.5% をこえるとほぼ一定の値を示すようになる。

(3) マグネシウム 2.5% 以上では切削が純粋剪断に近い機構で行なわれるようである。

(4) 溶体化処理、焼もどし時効など熱処理によつて鑄造のままに比べ、切削抵抗は大きく影響を受けないようである。

(5) マグネシウム添加量が 2.5% をこえると構成刃先、切屑処理の点からも問題は少ない。

(6) 仕上面粗さもマグネシウム添加量が 2.5% をこえると比較的良好であるが、鑄造のままのものは熱処理を施したもののより仕上面粗さはやや劣る。

したがって、アルミニウム合金の被削性におよぼすマグネシウムの添加効果は被削性を向上させるが、2.5% をこえるとその効果に大きな差はないといえる。

本報はその費用の一部を文部省科学研究費(各個研究)、一部は日本総合鑄物センター委託研究費によつた。付記して深謝の意を表する。