

バニシング加工を利用した金属材料の組織制御

東京工業大学 工学院

助教 朱 疆

(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017011)

キーワード：バニシング加工，表面改質，組織制御

1. 研究の目的と背景

マグネシウム合金は比強度が高い合金として、自動車、飛行機、スポーツ用品、インプラントなど多岐に使用されている¹⁾。しかし様々な用途に応じてマグネシウム合金の高性能化及び長寿命化を実現するには、引張強度・疲労強度・耐摩耗性・耐腐食性など様々な機械的性質を高める必要がある。従来主流であった合金化による材料特性の改良は、希土類元素の供給不安定、およびリサイクル性に問題がある。一方、金属熱処理などの結晶制御加工は、板材のような素材の一次加工に適用されているが、様々な形状を有する製品の二次加工には適用されていない。そこで、様々な製品形状において、任意の部分の結晶組織および材質を自在に制御できるバニシング加工が期待されている。

バニシング加工は図1に示すように、金属表面の微小な塑性変形を利用した加工法であり、表面粗さを改善するだけでなく、材質改善にも有効である^{2, 3, 4)}。従来のローラーを利用したバニシング工具は平坦な加工物と円筒状の加工物を加工しやすいが、複雑曲面を持つ加工物への加工が困難である。本研究では曲面の加工が対応できるボールバニシング工具を開発し、それを用いてマグネシウム合金の表面粗さ、ビッカース硬さ、結晶粒径と結晶配向性などの表面改質効果の評価を実施した。

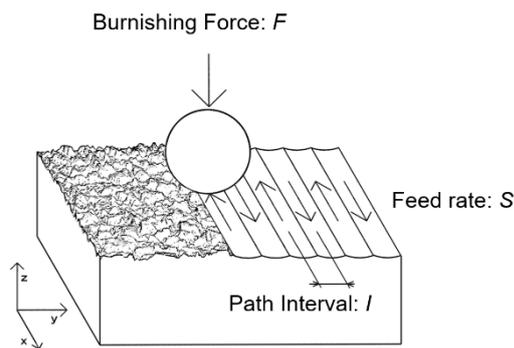


図1 バニシング加工の概略図

2. 実験方法

2.1 オンマシナリ制御可能なバニシング実験システムの構成

本研究では、ロードセルとエアシリンダーを内蔵した、加工中のバニシング力をリアルタイムで検出することが可能なボールバニシング工具を開発した。ボールバニシ

ング工具及びその概要は図2に示す。より安定な加工力を得るために、本研究ではエアサーボコントローラを用いて、加工力をオンマシナリで制御できる実験システムを構築した。システムの構成は図3に示すように、サーボコントローラが上位制御PCから目標値を読み取り、ロードセルから検出した測定値との比較により、電空レギュレータに与える指令電圧を調整することで、エアシリンダーの出力を制御する。工具先端に直径5 mmのタングステンカーバイド球をバニシングボールとして用いられる。

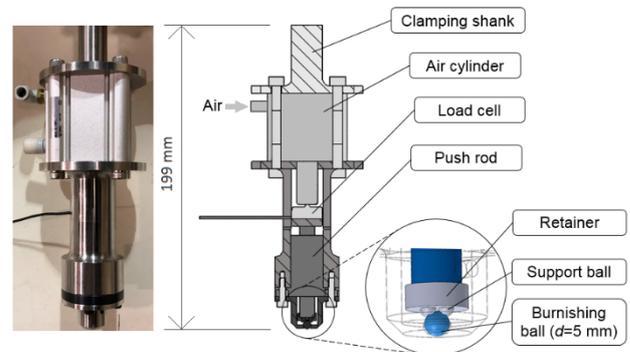


図2 ボールバニシング工具の写真と設計図

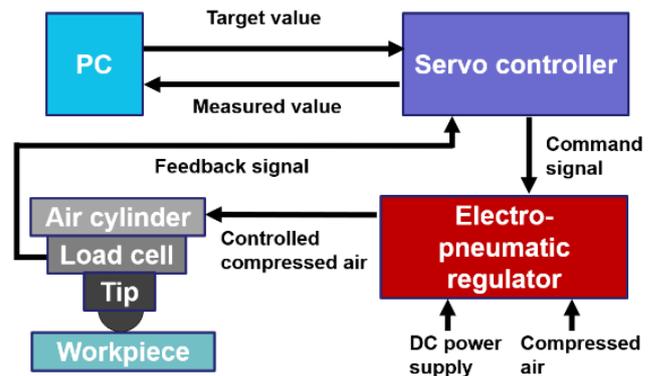


図3 制御システムの構成

2.2 実験条件

圧延で作られたマグネシウム合金 AZ31 (ビッカース硬度 65, ヤング率 44.8 GPa) の板 (100 mm×100 mm×5 mm) を被加工物として使われる。AZ31 の化学成分は表1に示す。バニシング工具をNCフライス盤に取り付けて、走査線軌跡で加工を行い、加工された表面に対して表面粗さ、

ビッカース硬さ、結晶粒径、結晶配向性の評価を試みた。

表1 マグネシウム合金 AZ31 の主な化学成分

元素	Al (%)	Zn (%)	Mn (%)	Mg (%)
割合	2.5-3.5	0.6-1.4	0.2-1.0	Rem.

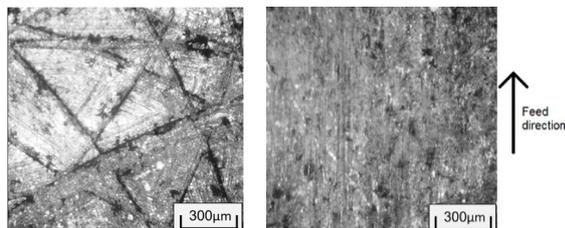
3. 実験結果

3・1 加工条件が表面粗さに及ぼす影響

表2に示すようにバニシング力、送り速度、パス間隔、及び加工前の表面粗さを変化させ実験を行った。加工前と加工後の試験片表面を図4に示す。バニシング工具の送り方向は上下方向である。

表2 加工条件

バニシング力: F (N)	50, 100,
送り速度: S (mm/min)	100, 200
パス間隔: I (mm)	0.05, 0.1, 0.15, 0.3, 0.5
加工前粗さ: $Ini Ra$ (μm)	0.33, 1.95



(a)加工前

(b)加工後

図4 バニシング加工前後の試験片表面

加工した試験片の送り方向と垂直する方向の表面粗さを共焦点非接触粗さ測定機 (NanoFocus 社の μ Surf-S システム) を用いて計測した。図5は加工前の試験片と $F=100$ N, $S=100$ mm/min, $I=0.05$ mm で加工された試験片の表面粗さプロファイルを示す。試験片の表面粗さは加工前の $Ra=1.95 \mu\text{m}$ から $Ra=0.26 \mu\text{m}$ に低減されたことが確認した。また、バニシング力と送り速度を固定し、パス間隔を変化して加工実験を行い、表面粗さの測定結果は図6に示す。この結果より、パス間隔が表面粗さ Ra への影響は支配的であることが分かった。

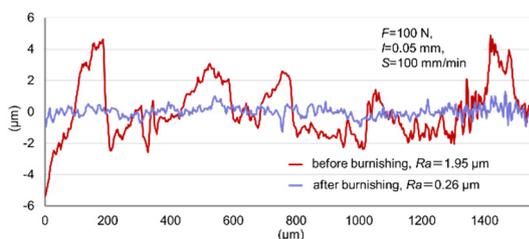


図5 試験片の断面プロファイル

理論的にはバニシング加工した後の表面形状が単なるボールの直径とパス間隔に依存するが、バニシング力が大

きくなり、またパス間隔が小さくなると、バニシングボールと加工物間の摩擦力及び粘着力が発生することにより、加工物の表面に点状の剥離が発生するので、実際に計測した表面粗さは理論的計算した粗さより高くなると考えられる。この推測を検証するために、より強いバニシング力で加工を試みた。 $F=500$ N, $I=0.15$ mm, $S=100$ mm/min の加工条件で加工した結果より、図7に示すように重度の剥離 (窪み) が発見された。

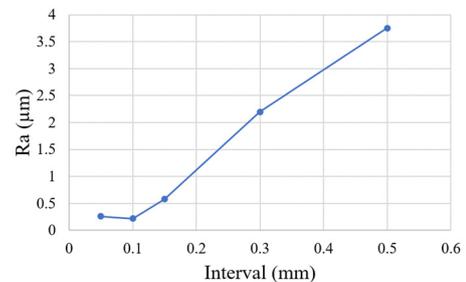


図6 表面粗さとパス間隔の関係

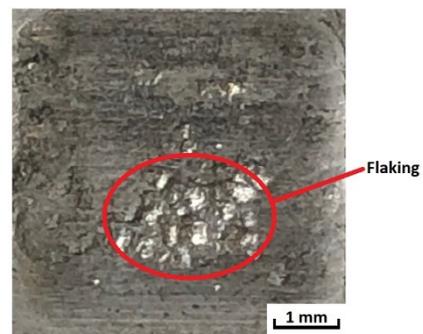


図7 500Nで加工した試験片の表面
(5mm×5mm)

3・2 表面硬さと結晶粒径への影響

バニシング加工より試験片の硬度、結晶粒径及び結晶配向性の変化を評価するために、前加工の影響を除去する必要がある^{5, 6)}。そのためバニシング実験を行う前に、加工物の AZ31 板を 500°C 、1 時間でアニーリングした。試験片表面のビッカース硬度をマイクロビッカース硬度計 (アカシ, HM-124S) より測定した。

各加工条件 (バニシング力、送り速度とパス間隔) の影響を調べるために、3 因子 3 水準の直交表を利用し 9 つの加工条件を設計した⁷⁾。加工条件を表3に示す。この加工条件で加工した試験片の表面ビッカース硬度を表4に示す。バニシング加工の条件にかかわらず、硬さが上がったことが分かった。

表3 加工条件

No.	パニング力 F(N)	パス間隔 I(mm)	送り速度 S(mm/min)
1	100	0.1	100
2	200	0.1	200
3	50	0.1	50
4	100	0.05	50
5	50	0.05	200
6	200	0.05	100
7	100	0.15	200
8	200	0.15	50
9	50	0.15	100

表4 ビッカース硬度, 結晶粒径, 加工硬化層の結果

No.	ビッカース硬度 (HV)	結晶粒径 (μm)	加工硬化層厚さ(mm)
1	110.1	8.3	0.81
2	149.2	6.7	0.94
3	105.5	8.5	0.81
4	128.0	7.8	1.34
5	106.9	8.6	0.60
6	129.6	5.8	0.94
7	124.3	7.8	0.93
8	140.9	6.4	1.07
9	113.2	7.2	0.59
加工前	62.0	8.9	-

$$S/N = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \dots\dots\dots (1)$$

タグチメソッドを利用し, 式(1)で各パラメータのS/N比を計算し, 結果を図8に示す. S/N比が高いほど, 硬さが高いと示している. 一つのパラメータに対し, 各因子の値の差が大きいほど, パラメータの影響も大きい. 図8により, パニング力が表層部の硬さ変化に重要な要因であることが分かった.

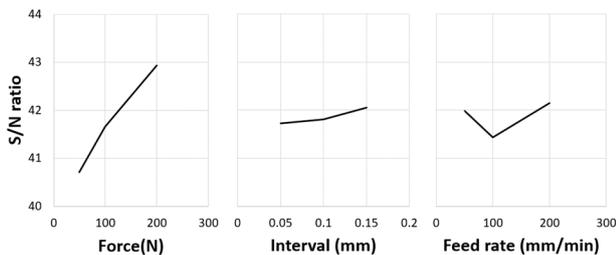
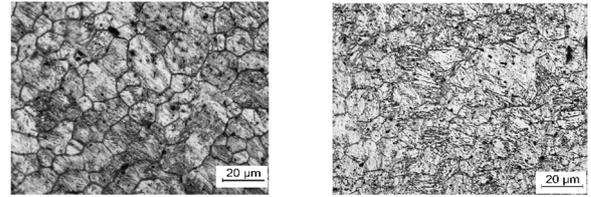


図8 加工条件とビッカース硬度のS/N比

硬度向上の原因は結晶粒の微細化による欠陥の増加と考えられる⁸⁾. 試験片表面の結晶を観察するために, 表面を研磨, エッチングし, 光学顕微鏡で観察した. 例としてパニング加工前と加工後(9番)の試験片の顕微鏡写真を図9に示す.



(a)加工前 (b)加工後

図9 試験片表面の顕微鏡写真

画像処理ソフト ImageJ (National Institutes of Health)を利用して計算した各試験片の結晶粒径の平均値を表4に示す. パニング加工より試験片の結晶粒径が小さくなったことを確認した. これは, 加工したときに加工物の表面が工具から垂直方向の押し付け力と水平方向の摩擦力両方を受けたことにより, 表層部の結晶粒径が微細になったと考えられる.

結晶粒径のS/N比を式(1)より計算し, 図10に示した. ここで高いS/N比は小さい結晶粒を代表する. ビッカース硬度と同様に, パニング力の影響が一番大きいと確認した.

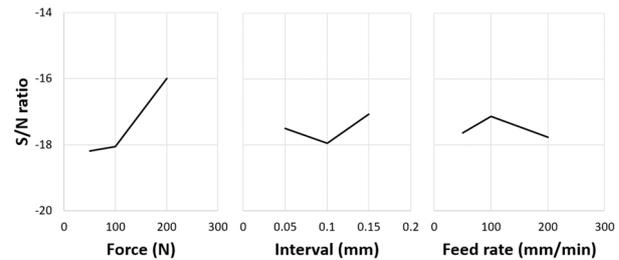


図10 加工条件と結晶粒径のS/N比

実際の応用に表層部以下に改質された部分, いわゆる加工効果層の厚さも重要である. 加工効果層を評価するために, 各試験片の断面を切断, 研磨, エッチングし, 顕微鏡で観察した. 加工前と加工後(2番)の試験片の断面写真を図11に示す. 左側が表面であり, 右側が試験片の内部である. 写真から内部の結晶粒が表面の結晶粒より大きいと分かった. 結晶粒径が変化する部分を加工硬化層と見なし, 加工硬化層の厚さを計測した. その結果を表4に示す. 4番の試験片の加工硬化層が一番厚く, 厚さが1.34mmに達したことが分かった.

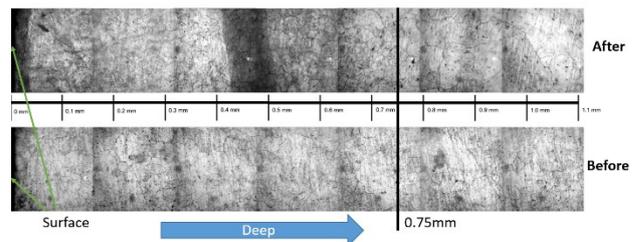


図11 試験片断面の顕微鏡写真

3・3 結晶配向性への影響

結晶の配向性が金属の重要な性質の一つであり、金属の強度や耐食性に大きな影響を与える⁹⁾。配向性の変化の原因は主に機械的な加工と思われるので、バニシング加工より試験片の結晶配向性変化への影響を評価した。微小部X線回折装置 D8 DISCOVER μ HR を用いて計測した試験片のスペクトルを図 1 2 に示す。

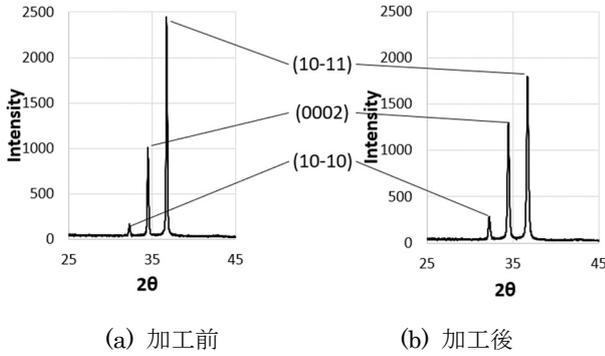


図 1 2 X線回折分析結果

マグネシウムのスペクトルに結晶方向を表すピークがいくつかあるが、一般的に 2θ は約 32.2° の(10-10), 34.4° の(0002), 36.6° の(10-11), 三つのピークに着目する。ピークの高さはピークが代表する方向の結晶の割合を示す。バニシング加工を実施することにより、三つのピークの高さは全部変わることが分かった。より定量的に評価するために、下記の式を用いて結晶方向の変化を評価した。

$$\eta_a = \frac{\frac{I_a}{I_a+I_b+I_c}}{\frac{I_{a0}}{I_{a0}+I_{b0}+I_{c0}}}, \dots\dots\dots (2)$$

$$\eta_b = \frac{\frac{I_b}{I_a+I_b+I_c}}{\frac{I_{b0}}{I_{a0}+I_{b0}+I_{c0}}}, \dots\dots\dots (3)$$

I_a, I_b, I_c はそれぞれバニシングされた試験片の(10-10), (0002), (10-11)のピークの高さであり, I_{a0}, I_{b0}, I_{c0} はバニシングされない試験片のピークの高さである。 η_a は垂直方向, η_b は水平方向の結晶方向の変化量を表す。計算した結果は $\eta_a=1.38, \eta_b=1.84$ となり、両方1より大きいのである。つまり(10-10)方向の結晶数と(0002)方向の結晶数両方が増加したと言える。バニシング加工は加工物に垂直方向の力を加え、(10-10)方向の結晶数が増加したと考えられるが、(0002)方向の結晶数が増えた原因は水平方向の摩擦力であると考えられる。

9つの試験片の結晶配向性を全部計測し、計算した η_a と η_b を表7に示す。加工条件の影響を調査するために、 η_a と η_b のS/N比を計算し、結果を図13示す。実験結果により、結晶方位に対し、一番影響的なパラメータはバニシン

グ力であることが確認した。

表 7 各試験片の結晶配向性の変化

No.	η_a	η_b
1	1.31	1.78
2	2.57	0.94
3	1.45	1.67
4	1.94	1.26
5	1.71	1.62
6	2.18	1.15
7	1.81	1.51
8	1.61	1.49
9	1.83	1.38

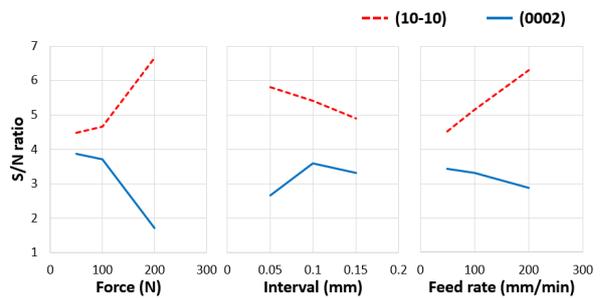


図 1 3 結晶配向性変化の S/N 比

3・4 残留応力への影響

圧縮残留応力は疲労強度、耐食性などの向上に役立つ。本研究でバニシング加工により残留応力の変化を調べた。まず各試験片の表面残留応力を計測した。ここで x 方向を送り方向, y 方向を送り方向と垂直するパス間隔方向とし、計測した残留応力を表8に示す。正の値は引張残留応力であり、負の値は圧縮残留応力である。結果により3番の試験片の残留応力は一番大きく、x方向とy方向の残留応力がそれぞれ-186.3 MPaと-87.8 MPaである。

そしてz方向の残留応力の分布も検討した。表面は自由のため表面でのz方向残留応力を0とし、試験片2番の残留応力の深さ方向の分布を図14に示す。残留応力が深さ約0.25mmのところと最大値の-32 MPaになり、さらに深くなると残留応力が減少すると分かった。

表 8 試験片の表面残留応力

No.	x 方向 (MPa)	y 方向 (MPa)
1	-87.7	-22.4
2	-59.2	-32.8
3	-186.3	-87.8
4	-106.9	-51.8
5	-134.2	-66.9
6	-15.5	-5.3
7	-117.6	-59.6
8	-59.1	-19.5
9	-108.4	-43.6

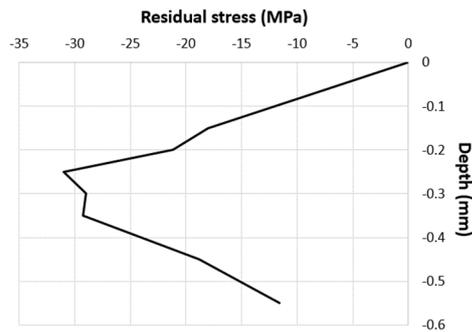


図 14 z 方向の残留応力分布

4. 結論

本研究でロードセルが内蔵されたバニシング工具とバニシング力の制御システムを開発した。この工具と制御システムを用いて、バニシング加工よりマグネシウム合金 AZ31 の組織制御の可能性を検討した。バニシング力、パス間隔と送り速度を変化しながら、加工条件が表面粗さ、硬度、結晶粒径、加工硬化層厚さ、結晶方位及び残留応力に及ぼす影響を実験的に明らかにした。本研究で得られた知見は以下になる。

1. バニシング加工により、表面粗さ Ra が加工前の 1.95 μm から 0.26 μm まで低減されたことが確認した。そして微細な剥離の影響でパス間隔が小さすぎると、またはバニシング力が強すぎると表面粗さが普通の加工条件より高い。

2. バニシング加工により硬度の向上と結晶の微細化が確認した。加工前のビッカース硬度 HV62 から最大の HV149.2 に向上したことが分かった。表面の平均結晶粒径が加工前の 8.9 μm から、最小 5.8 μm に微細化した。そして断面の結晶粒径を観察することで、加工硬化層の厚さが最大 1.34mm になったことを分かった。硬度と結晶粒径に対し、バニシング力の影響が一番大きいと分かった。

3. X 線回折装置を用いて結晶方位の変化を確認した。結晶方位に対し、バニシング力の影響が一番大きいと分かった。

4. バニシング加工後、圧縮残留応力を計測した。一番大きい圧縮残留応力は、送り方向において 186.3 MPa であり、パス間隔方向において 87.8 MPa である。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団一般研究開発助成(AF-201711)を受けたものであり、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Hui Dua, Zunjie Wei, Xinwang Liu, Erlin Zhang, "Effects of Zn on the microstructure, mechanical property and bio-corrosion property of Mg-3Ca alloys for biomedical application," *Materials Chemistry and Physics*, Volume 125, Issue 3, 15 February 2011, Pages 568-575.
- 2) P Zhang, J Lindemann, WJ Ding, C Leyens, "Effect of roller burnishing on fatigue properties of the hot-rolled Mg-12Gd-3Y magnesium alloy," *Materials Chemistry and Physics*, Volume 124, Issue 1, 1 November 2010, Pages 835-840.
- 3) AM Hassan, AS Al-Bsharat, "Influence of burnishing process on surface roughness, hardness, and microstructure of some non-ferrous metals," *Wear*, Volume 199, Issue 1, 1 November 1996, Pages 1-8.
- 4) Liviu Luca, Sorin Neagu-Ventzel, Ioan Marinescu, "Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels," *Precision Engineering* Volume 29, Issue 2, April 2005, Pages 253-256.
- 5) SK Mishra, SM Tiwari, JT Carter, A Tewari, "Texture evolution during annealing of AZ31 Mg alloy rolled sheet and its effect on ductility," *Materials Science and Engineering: A*, Volume 599, 2 April 2014, Pages 1-8.
- 6) MT Perez-Prado, OA Ruano, "Texture evolution during annealing of magnesium AZ31 alloy," *Scripta Materialia*, Volume 46, Issue 2, 18 January 2002, Pages 149-155.
- 7) Fang-Jung Shiou, Shih-Ju Huang, Albert J. Shih, Jiang Zhu and Masahiko Yoshino, "Fine Surface Finish of a Hardened Stainless Steel Using a New Burnishing Tool," *Procedia Manufacturing*, Vol.10, 2017, pp. 208 – 217.
- 8) H. Watanabe, H. Tsutsui, T. Mukai, K. Ishikawa, Y. Okanda, M. Kohzu, K. Higashi, "Grain size control of commercial wrought mg-al-zn alloys utilizing dynamic recrystallization," *Mater. Trans.* 42 (2001) 1200–1205.
- 9) Z Pu, GL Song, S Yang, JC Outeiro, OW Dillon Jr, D.A. Puleo, I.S. Jawahir, "Grain refined and basal textured surface produced by burnishing for improved corrosion performance of AZ31B Mg alloy," *Corrosion Science*, Volume 57, April 2012, Pages 192-201.