W101

軽合金を用いた板材成形の可能性
高速突起成形技術の開発行武栄太郎^{*1}, 根岸繁夫^{*2}, 本橋嘉信^{*3}Potentiality of Light metal alloys Sheet-forming
High-Speed Boss FormingE. Yukutake¹, S. Negishi², Y. Motohashi³^{*1} IBARAKI Prefectural Industrial Technology Center
Nagaoka37821-1, Ibaraki-machi, Higashi-ibaraki-gun, Ibaraki, 311-3195 Japan

A new method of forming boss on a Magnesium alloy sheet has been developed by utilizing a friction stir technology. This new technology enables the press-forming of Mg alloys at room temperature without external heating devices. Rolled and extruded sheets of AZ31 Mg alloys the thicknesses of which are from 0.8 to 2mm were used as work-pieces. Forming a boss the size of which shall be from $\phi 3 \times 4$ to $\phi 7 \times 5$ mm on the Mg sheet has been made by pressing a tool rotating on the sheet. We believe that this new forming technology for Mg alloys must be used in many fields of applications.

Key Words: Magnesium alloy, Friction stir, Press-forming

1. 背 景

・軽量化への対応

携帯電話やモバイルパソコンなど携帯型情報端末では、機器の小型化は成熟しているが、軽量化については軽金属材の適用などさらなる軽量化が必要不可欠となっている。情報家電においても同様で、軽量化とともに扱い易さや静穏化対策が求められている。自動車産業では、環境対応が喫緊の課題であり、特に自動車のCO₂削減に向かう軽量化など環境対応力が企業の競争力を左右するものとなっている。トヨタ自動車(株)の報告によれば、自動車重量1kg削減によるCO₂削減効果は5kg (10・15モードにて10万km走行した場合)であり、車体重量の軽量化は環境負荷対応策の1つとして期待されている。

・複雑形状化への対応

中国などとの低コスト化競争に勝ち抜くため、各製品の部品点数削減が強く求められている。その結果、各部品形状は益々複雑化している。特に自動車部品ではその傾向が強く、プレス製品では従来の2次元形状から3次元複雑形状を実現するニーズが増加している。携帯電話やモバイルパソコン等では急速な高機能化及び小型化が進んでおり、その複雑形状製品(高付加価値製品)を量産する生産技術が市場から求められている。

・板鍛造技術の進展

軽量化および複雑形状化を解決すべく板鍛造技術開発が進展している。これを実現するには金型技術の高度化及び複雑化が課題であり、主に家電メーカーでの取り組みが盛んとなっている。しかし、携帯電話など情報端末はモデルチェンジが非常に早く、製品サイクルも短いため、新製品開発期間をどう短縮するかが最大の課題となっている。

これらの解決策として軽金属であるマグネシウム合金が脚光を浴びており様々な研究^{1~3)}がおこなわれている。しかし、マグネシウム合金板材には常温ですべり系である底面{0001}が板面に平行に配列する強い底面集合組織を有する^{4~6)}ため、プレス加工は常温では非常に困難であり、すべり系の増加する高温(250℃以上)での成形加工が一般的であり生産性、製造コストに劣る。そこで、マグネシウム合金板材を用いた量産化を実現するための摩擦攪拌・熱を用いた摩擦攪拌プロセスによる結晶組織制御(動的再結晶)をもちいた高速突起成形技術の確立を目指した。

^{*1} 茨城県工業技術センター (〒311-3195 茨城県東茨城郡茨城町長岡 3781-1)

^{*2} 山野井精機㈱ (〒300-2347 茨城県つくばみらい市豊体 1670-3)

^{*3} 茨城大学名誉教授 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

2. 高速突起成形方法

2・1 高速突起成形装置

突起部成形方法の概略を Fig.1 示す。汎用工作機器を用いて高速で回転する回転ツールを素材に押しつけることで突起の成形に成功した。本実験での回転ツール形状は、外径 $\phi 10$ 、内径 $\phi 3$ および外径 $\phi 15$ 、内径 $\phi 5$ の 2 種類で行い、外径 $\phi 3$ 、 $\phi 5$ の中実突起を成形した。さらに、外径 $\phi 15$ 、内径 $\phi 5$ の回転ツール内部に $\phi 3$ のピンを挿入し中空突起も一行程で成形を可能にした。これらの回転ツールにより 1 秒以下での高さ約 5mm の突起成形を実現した。

Fig.1 Overview of Boss forming

2・2 成形条件及び評価方法

供試材には、市販材の AZ31 合金マグネシウム合金圧延板材（板厚：2.0mm）を用いた。突起部成形は室温で行い、幅 30mm、長さ 100mm の板状材の試験片を作製し、連続して 5 個の突起部を成形した。回転ツール回転数 100rpm～5000rpm で板に接触させ、そこから回転ツールが供試材へ接触してからの押込み量を 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5mm と変化させ、突起成形し外観および内部組織を観察した。突起内部は光学顕微鏡により結晶組織の塑性流動を観察し突起成形過程を検討した。

3. 突起成形部評価

3・1 突起部外観

Fig.2 に押込み量を変化させ突起部成形を行って得られた供試材外観写真（AZ31 マグネシウム合金、板厚：2.0mm）を示す。押込み量を増加させると、突起成形高さが増加する。押込み量 0.1mm においても小さな突起部が形成され、0.3mm 以上では約 2mm の円筒状の突起が形成される。

Fig.2 Various heights of Boss

押込み量 0.5mm では、5mm 以上の円筒状の突起が形成された。突起部周辺には回転ツールの外周に約 0.5mm 盛り上がったバリが各条件で観察されるが、回転ツールにより

押し込まれた供試材は突起部へ 90%以上塑性流動している。回転ツールの供試材との接触面には供試材の凝着が確認されたが、その凝着量は少なくツール表面に 10 μm 程度の厚さで存在する。連続で突起成形を行ってもその凝着量に大きな変化は無く 10 μm 程度（回転ツールへの凝着厚さ）である。

3・2 突起部内部組織

Fig.3 に供試材と回転ツールとの接触面近傍の光学顕微鏡による組織観察を示す。成形後回転ツールと接している表面の結晶粒径は摩擦攪拌（連続的せん断強加工）により微細化され、1～5 μm 程度の結晶粒を有することが観察された。これは、突起成形中、強加工により動的再結晶が起きていることを示しており、突起成形中の変形抵抗が低下することが予測される。よって、大きな変形を伴う突起成形加工が比較的小さな加工負荷かつ短時間で可能となる。

Fig.4 に突起成形部平行断面写真を示す。突起部断面組織は層状組織を有しており、回転ツールとの接触面では摩擦攪拌効果により結晶粒が微細化されており、平均粒径 5 μm 以下であり、母材より微細化された。突起部中心部では強加工と摩擦熱による再結晶により結晶粒が成長しており、約 100 μm の結晶粒も観察された。この結晶粒のバラつきは突起成形後の残留熱及び変形量（ひずみ）が影響していると考えられる。

Fig.3 Tool contact surface

Fig.4 Parallel section of the molded Boss

3・3 突起部表面温度

Fig.5 に突起成形時の素材表面各所の最高温度分布を示す。突起成形時の最高温度は突起付け根付近で約 290℃を示した。これは、供試材（マグネシウム合金、アルミニウム合金）が溶解することなく固相状態で突起成形が完了していることを示している。また、マグネシウム合金の再結晶温度は 300℃付近であり、突起成形時には回転ツールによる摩擦攪拌により連続的な強いせん断変形が付加され動的な再結晶が積極的に起きる。よって、変形抵抗の著しい低下が起きており、小さな負荷で大変形を短時間で可能にしている。

回転速度のもっとも高い回転ツール外周部では約 200℃を示した。これは、発生した熱が治具、金型および供試材へ分散するため温度上昇が小さいと考えられる。よって、回転ツール外周部の素材強度が保たれるため、回転ツールを押し込んだ際に供試材の外部流出を防いでいると推察される。突起側面では温度が低いことから、突起部と回転ツールとの摩擦抵抗が小さいと考えら、突起部がねじ切れることなく成形される。突起成形時の回転ツールへの負荷変化は、回転ツールと素材が接触した直後大きく負荷がかかる。しかし、1 秒以内に急激に負荷が小さくなる。これは、回転ツールと素材との接触面での摩擦攪拌により動的再結晶が積極的におき変形抵抗が低下することに起因していると考えられる。

Fig.5 Temperature of Tool contact surface

3・4 穴アリ突起部成形

Fig.6 上段に突起部中心に穴のある突起部成形を行った外観写真を示す。形状は外径φ5、内径φ3、高さ約5mmの中空突起である。1行程1秒以内で成形した。回転ツールは中心穴内部にピンを固定したものである。この結果、突起成形と同時に中心穴加工を実現した。また、中心のピンにより被加工材を押し込むため裏面に発生していた引けを結果的に押し潰すため引けが消失した。

Fig.6 下段に中空突起部の垂直断面写真を示す。外・内部組織も微細組織を有し緻密となった。内部ピンの影響で被加工材と回転ツールとの接触面積が増加することで摩擦攪拌領域が増え突起部全体が微細化され、結晶粒径のバラつきが改善された。

Fig.6 Vertical sections of the hollow boss

3・5 突起部引張試験

Fig.7 に突起部引張試験結果を示す。常温で引張速度 1mm/min で引張試験を行った。突起部にねじ山加工を突起成形後に行い、ピンをねじ込み引張試験を行った。破壊時の最大引張荷重約 16kN（中空突起 $\phi 5$ - $\phi 2$ ）を示した。これは、スタッド接合と比べ 40%以上接合強度が高く、母材強度と同等であり摩擦熱を用いた突起成形による強度低下はほとんどない。また、中実突起と比べ中空突起の単位面積当たりの耐荷重が大きい。これは、突起部全体が微細化しているため強度が向上したと考えられる。試験温度 200℃でも母材同等の強度を示した。破断部は突起部付け根から抜けるような状態で破断した。

Fig.7 Tensile test of Boss

4. 応用例

4・1 プレス加工によるカバー試作例

Fig.8 に携帯機器カバー試作例を示す。マグネシウム合金展伸材（板厚：2.0mm）をブランクに加工後、本研究で開発した突起成形技術で4隅に $\phi 5$ （中空： $\phi 3$ ）高さ 5mm の突起を成形した。突起成形後、サーボプレスで絞り加工でカバーを試作した。潤滑油を一切使用しないため表面処理が容易で歩留まりも高い。

Fig.8 Portable device cover (AZ31)

4・2 摩擦攪拌による締結

Fig.9 に異種金属を締結した例を示す。締結部材にあらかじめテーパ状の穴加工を行い、その上部に被加工材を重ね回転ツールで押し込むことで、摩擦攪拌、摩擦熱により変形抵抗が低下し被加工材が加工穴へ流動し締結が完了する（加工時間：約 0.6 秒）。各温度（室温、200℃）での締結部引張せん断強度を Fig.10 に示す。室温ではスポット接合より 20%以上高く、温間（200℃）でも同様にスポット接合より高い強度を示す。本締結技術では、リベット接合のようにリベットを必要としないため部品点数削減により軽量化効果、コスト削減が期待できる。また、溶接が困難な異種金属の締結も可能とする。さらには、締結部形状により締結強度を自由に設計することが可能であり、幅広い製造分野での応用展開が期待される。

Fig.9 Fastener component of AZ31 and SPCE

Fig.10 Joint strength at various temperatures

4・3 ねじ付突起成形

Fig.11(a)に1ショットで作製した外側ねじ付突起を示す。通常切削によるねじ切り加工を必要とするが、突起成形技術を応用することで、ねじ付突起の成形加工も可能となる。成形時間は通常の突起成形と変わらず高速で加工できる。内部結晶組織は動的再結晶により再結晶した等軸で微小な結晶組織を有する。

Fig.11(b)に内部にねじ山を有する突起を示す。外ねじと同様に1ショットで成形加工した。成形時間も1秒程度であり製造時間の削減が期待できる。

ねじ山を有する突起成形加工では、切りくずが発生しないため、歩留まりが高く、作業環境もクリーンで切削切子等による粉じん災害の危険性が低い。また、マグネシウム合金だけでなくアルミニウム合金、真鍮等への加工も可能である。

Fig.11 Thread boss forming

4・4 異形状突起成形

本開発技術では、加工ツールを回転させ突起成形を行うため、円柱状の突起成形加工が主であるが、外形を多角形や楕円等様々な形状にすることも可能である。図12に四角形状の突起を示す。加工治具を工夫することで外形を様々な形状に加工することができる。これにより、突起だけでなく匡体のリブや位置決めピン等の様々な用途が考えられ、多業種分野での応用展開が期待される。

Fig.12 Square Boss

5. 今後の展開

図13にサイズの異なる形状の突起を連続に加工した一例を示す。異なるサイズの突起を連続的に加工することで製造コスト削減が期待できる。今後は、プレス加工金型内部への本開発技術の移転を検討しており、プレス金型の高機能化によりさらなるコスト削減、生産性向上が期待できる。また、マシンングセンター等汎用性の高い工作機械への装着が可能な突起成形用回転ツールの開発も進めている。

Fig.13 Boss of various sizes

本技術開発は、平成19～21年度経産省戦力的基盤技術高度化支援事業採択案件「難加工材の3次元精密順送プレス技術の開発」研究開発成果である。

6. まとめ

- 1) 摩擦攪拌プロセス (FSP) を利用し、金型を温めることなく $\phi 3$ 以上、高さ 3mm 以上の突起部を 1 秒以内に成形することができた。
- 2) ボス成形加工後の予熱が結晶成長に強く影響する。したがって、成形加工直後の急冷は結晶成長の抑制に有効である。
- 3) 突起部強度は母材と同等であり、摩擦攪拌による突起部成形は新しい 3 次元加工として有効である。
- 4) 通常のプレスフォーミングと比べ負荷荷重は 50% 以上軽減されたため、金型に加わる負荷が小さくなり金型の高寿命化が期待できる。
- 5) 局部加熱が可能で必要な箇所だけ摩擦熱で加熱するため外部熱源に比べ省エネ効果が非常に高い。
- 6) 突起成形負荷荷重が小さいため、大きな加工装置が必要ないため、設備投資にかかるイニシャルコストが低い。
- 7) 本技術開発を用いた製造応用分野は幅広く、突起成形だけでなく締結、リブ成形等、多業種分野での応用展開が期待できる。

参考文献

- (1)高津正秀：軽金属，Vol.54，p493（2004）
- (2)小島陽：軽金属，Vol.58，p526（2008）
- (3)東健司：軽金属，Vol.59，p576（2009）
- (4)金子純一：日本金属学会誌，Vol.64，p141（2000）
- (5)行武栄太郎：塑性と加工，Vol44，p276（2003）
- (6)E. Yukutake, J. Kaneko, M. Sugamata: Mater. Trans., Vol44，p452（2003）