3次元薄板加工技術の開発*

小原治樹** 渡邊隆博*** 大住 剛*** 羽多野正俊*** 二宮英治***

A Method to Machine Three-Dimensional Thin Parts

Haruki OBARA, Takahiro WATANABE, Tsuyoshi OHSUMI, Masatoshi HATANO and Eiji NINOMIYA

It is difficult to machine a comparatively wide but very thin three-dimensional parts, because it is easily deformed by the clamping force or machining force during the machining. In this paper, a simple method using low melting alloy (LMA), whose melting point is below 100°C , to support the thin parts is proposed. The parts are firmly supported and fixed on the LMA by adhesion or suction force. The LMA and the adhesive are removed after the machining by hot water. This method is suitable for machining a few three-dimensional thin parts, or prototype parts for preliminary assessment before mass production. The parts of minimum thickness $20\text{ }\mu\text{m}$ was obtained. The method and investigated results are described.

Keywords: Machining, low melting alloy, three-dimensional thin parts, adhesion, suction force

1. 緒 言

一般に3次元の薄板部品は金型を用いて製作されるが、金型製作にコストがかかるため試作品や少量部品の場合には切削加工などが必要となる。しかし薄板を加工するとき、板素材は既に反っていることが多く、このような板を図1(a)のように平坦なテーブルに固定すると、加工終了時に反りが回復して誤差となる。また図1(b)のように板側面からクランプすれば素材が座屈するという問題がある。さらに図2のように切削中に切削力によって板が変形することも問題となる。従来このような薄板の3次元加工問題についての議論は見られない。本報告ではこの問題に対し 100°C 以下の温度で溶融する低融点合金をバックアップとして使い、さらに被加工物とバックアップを接着剤または真空吸引を用いて固定して加工し、加工後に合金を加熱除去する方式を提案する。この方法は特別なジグを必要とせず、容易に複雑な3次元形状加工に対応できる、また比較的低温の合金を扱うため安全である、低融点合金は繰り返し使うことができるなどの特徴を有する。この加工方法を切削に適用した検討結果について報告する。

(a) Clamp method 1

(b) Clamp method 2

Fig.1 Deformation by clamping force

Fig.2 Deformation by machining force

2. 低融点合金

今回用いた低融点合金は(株)大阪アサヒメタル工場製Uアロイ¹⁾である。同社の低融点合金には融点 47°C から 183°C まで多種類の合金があるが、今回は取り扱いの便を考え、熱湯で容易に融解する融点 70°C のUアロイ70を用いた。表1にその特性を示す。この合金はビスマス系の合金で一般の金属と異なり凝固時に膨張する性質がある。これは素材の周囲に合金を鋳込んだ時に素材を強固に固定することができるため都合がよい。ただしハンダのような接着性は期待できない。

Table 1 Characteristics of U alloy-70¹⁾

Yield temperature	70°C
Density (20°C)	9.2 g/cm^3
Tensile strength	4.2 kg/mm^2
Brinell hardness (H_B)	12
Dimension change after casting (depend on elapse time after casting)	$5\text{--}11.5 \times 10^{-5}$
Thermal expansion coefficient ($\times 10^{-6}$)	22

3. 加工方法

今回は本方法を切削加工に適用する場合について検討した。薄板を切削加工する場合、単にワークの下にバックアップを設けただけでは切削力によりワークが加工中に浮き上がり、破断してしまう。そこでここではバックアップ上にワークを接着剤で固定する方法と、真空吸引する方法を試みた。また鋳込み方法として、合金の上面にワークを置く方法と、ワーク上面から合金を流し込む方法を検討した。

3.1 上鋳込み法

この方法では図3のように予めホルダ内で溶解させた合金上にワークをのせ、合金が固化したのちにいったんワークを取り出し、合金面に接着剤を塗布して、再びワークを合金に

* 原稿受付 平成14年6月5日

** 正会員 富山大学工学部(富山市五福3190)

*** 富山大学工学部

固定する。図のバッファはワークの取り出しを容易にするための油粘土である。予めワークに接着剤を塗布して溶融合金にのせればワークを取り出す操作の必要がなくなるが、ワークの位置決めのための基準面をホルダに設けており、基準面とワークが接着するとはがすことができないためこの手順を用いた。この方法は手間がかかるが、鑄込み面に気泡などの欠陥があるとき、これを接着剤で埋めることができるという利点がある。接着剤が固化したのちにホルダごと加工機にワークを取り付けて切削する。切削後にホルダを加熱してワークを取り出す。接着剤はむき出しとなるので、湯中で煮沸するか、溶剤を用いて除去することができる。

Fig.3 Upper implanting method

3.2 下鑄込み法

この方法では図4のように予め接着剤を塗布したワークを底面に置き、これにホルダをかぶせて溶融合金を流し込む。湯口は合金が固化したのちに衝撃を与えると容易に切断できる。この方法は上鑄込み法よりも簡便であり、また合金中の気泡や酸化物は上方に移動するから、比較的良好な鑄込み面が得やすい。固化後の切削方法と接着剤の除去方法は上鑄込み法と同じである。

Fig.4 Lower implanting method

3.3 真空吸引法

真空吸引法では図5に示すようにホルダを貫通して多数のパイプをワーク表面に接触させ、この状態で合金を流し込む。

Fig.5 Suction method

合金が固化したのち、ホルダを反転してベースに取り付け、ベースからワークを真空吸引する。吸引力は接着力に比べて小さいが、接着剤を除去する必要がないため、複数の少量部品を加工する場合に有効と考えられる。

3.4 薄肉壁の加工法

薄い側壁を加工する場合には図6のように、最初側壁の片面を加工し、加工したポケット部を低融点合金で埋めたのち残りを加工する。加工後低融点合金を加熱し除去する。壁が極めて薄い場合にはやはり接着剤を併用する。図7はハニカム加工方法であり、とびとびにポケットの加工を行う

Fig.6 Procedure to machine thin walls

Fig.7 Procedure to machine honeycomb parts

4. 試加工

3.1~3.3 項の3方法を用いて、3φスクエアエンドミルで95×65×2mmの黄銅板の両面に20×15mmのポケットを等高線加工で加工し、どの程度の板厚まで加工可能か調べた。切削条件例を表2に示す。加工機は1μm指令で最大回転数8000rpmのオークマ(株)製VR-40 II OSP700Mを用いた。深さ方向の切込み量は残り板厚の20%以下となるように設定した。加工液は水溶性切削液を用いたが、真空吸引ではエアブロー方式とした。接着剤にはコニシボンドのアロンαゼリー状瞬間接着剤430B、ニチバン製アララダイトラピッドAR-R30を試みたがいずれも使用可能であった。

上鑄込み法、下鑄込み法、真空吸引法とも0.1mm板厚まで容易に加工することができた。また下鑄込み法では0.05mmまで加工することができた。下鑄込み法で得られた0.05mm板厚の加工例を図8に示す。

Table 2 Cutting conditions

Workpiece	Brass t2mm
Machined pocket size	20×15 mm
End mill	3 φ square end mill (Nachi, Pt coated or DLC coated)
Rotating velocity	4330 rpm
Feed rate	50mm/min
Depth of cut	0.2/0.1/0.05/0.02mm

Fig.8 The cross section of t 0.05mm plate
[Brass t6mm, machined pocket 40×40mm]

5. 鑄込み法の検討

上記3方法の鑄込み面を調べた。図9に接着剤無しで鑄込んだ各場合の鑄込み面の例を示す。上鑄込み法では大きな気泡が観察された。このほかしわや、ひけ、酸化物が見られた。しわが発生するのは湯流れの途中で合金が凝固するためと思われる。湯温を高くするとしわは発生しない。逆に湯温が高すぎる場合には表面に針状結晶が現れた。下鑄込み法では気泡や不純物が上方に移動するため気泡は小さく比較的良好な面が得られた。真空吸引法では気泡はほとんど観察されなかったが、これはパイプから気泡が逃げるためであると思われる。

Fig.9 Cast surface

0.1mm よりもさらに薄い板を加工するには鑄込み面の改善が必要である。真空吸引法ではワークの固定力が十分でない。また下鑄込み法の鑄込み面は上鑄込み法よりも優れていたもので、下鑄込み法について鑄込み方法を検討した。

下鑄込み法の気泡の発生原因は合金内に存在する気泡が表面に現れたためか、湯流れの途中で空気を巻き込んだためと思われる。そこで真空中で合金を溶解し脱泡して、そのまま真空中で鑄込むために、図10の鑄造装置を製作した。図の装置ははじめ弁Aを閉じ、弁B、Cを開いて真空吸引し、合金を溶解して脱泡する。そののち弁B、Cを閉じ弁Aを開くと大気

圧により合金がホルダ内に流れ込み、予め接着剤を塗布したワークを覆う。大気圧がかかるため、ワークと合金は密着し、残っていた気泡は縮小する。ホルダは40℃、合金は110℃に加熱して鑄込んだ。図11にこの時の鑄込み面を示す。図から本方法により極めて良好な鑄込み面が得られることが分かる。

Fig.10 Set up of vacuum implanting method

Fig.11 Cast surface by vacuum implanting method
(70×100mm pocket)

6. 接着剤の検討

ワークと合金間の接着力が不十分であると切削中にワークが破損する。通常の接着と異なり下鑄込み法では鑄込んだ合金の表面を清浄にできない。圧縮剪断荷重を与えて黄銅-黄銅間の接着力と、大気中で鑄込んだ合金-黄銅間の接着力を調べた。接着面は10×10mmとした。接着剤は東亜合成(株)のホットメルト系接着剤ビーベット ST-900 (公称接着剪断強度約 2MPa)、シアノアクリレート系接着剤アロンα 101 (同 19MPa)、同ゲル状接着剤アロンα GEL-10 (同 19MPa)、ニチバン(株)のエポキシ系接着剤アララルダイトスタンダード (同 25MPa) を用いた。試験結果を図12に示す。黄銅-黄銅の

Fig.12 Adhesion force

接着ではほぼメーカー公称値に近い値が得られたが、低融点合金との接着強度はホットメルト系、エポキシ系、シアノアクリレート系ともほぼ1/2~1/4に低下した。ただしシアノアクリレート系は固化に水分が必要であるため真空中では使用できない。最終的にエポキシ系接着剤を用いることとした。

7. 切削条件の検討

接着力に比べ切削力が充分小さい必要がある。3φスクエアエンドミルで加工したときの切削力を計測した。計測には宮口、嶺岡等の方法²⁾を採用し、1軸圧電型ロードセル(PCB製、208C03)を用いて計測した。実験方法を図13に示す。ロードセルの向きと切削方向を変えて切削3分力を測定した。ロードセルは圧電型であるが、ドレーブ率は1%/25secのオーダーであり、短時間の力計測には十分である。

切込み量を変えたときの計測例を図14に示す。刃当たり時に負の力が発生する場合もあるので上下の値で切削力を示している。図では切込み量が小さいほど切削力が小さい。また図15は主軸回転速度を変えた場合であり、回転速度が大きいほど切削力は小さい。切込み1μmの場合の計測は行わなかったが、最大回転速度で送り速度200mm/min、切込み量を1μmとしたときの切削力は2N以下であると推定される。これを接着面で支えることになるが、第1近似的にエンドミルの断面に相当する面積で切削力を支えるとすれば、その接着強度は図12のエポキシ系接着剤の場合35Nとなるから、2N程度の切削力には充分耐えうると思われる。

Fig.13 Set up for measurement of cutting force

Fig.14 Influence of depth of cut on cutting force

Fig.15 Influence of rotational speed of tool on cutting force

8. 加工精度の検討

本方法では加工精度上のいくつかの問題が現れたため、それらについて若干の検討を行った結果を述べる。

8.1 1μmステップ加工

切削では工具がワーク表面を上滑りして切込み量だけ加工できない場合や、切込み量以上に切り込むことがある。最終加工で1μm単位の加工を行うので黄銅ブロックにz軸方向に1μm単位の段差加工を行い、加工ができるか否か検討した。計測例を図16に示す。電気マイクロメーターを用いて段差形状を計測した。所望の段差加工ができることが確かめられた。ただし送り速度が大きいと1μm単位の加工は困難になった。

Fig.16 Machined surface by 1μm z axis step cut
(Brass block, Rotational speed 3200rpm, Feed rate 100mm/min)

8.2 鋳込みによるワークの変形

低融点合金は凝固時に収縮するためワークが締め付けにより変形する可能性がある。図17は60×60×3mmの黄銅板

Fig.17 Deformation of plate by implanting force

の片面に 30×30mm 深さ 1.5mm のポケットを加工し鑄込んだ時の板の反りを示す。20μm 程度不均等に反っている。これは黄銅板の側面に油粘土の緩衝材を配置し、対角4隅のみで合金が接触するように改良して 1/3 程度の変形に押さえた。

8.2 残留応力によるワークの変形

30×30mmの両面ポケット加工を行い0.1mmの板を製作したときの板の反りの例を図18に示す。この反りは切削終了時点では見られず、低融点合金を溶かした時点で発生した。0.3mm程度の反りが見られる。この反りは切削の残留応力により板が延ばされたために発生したと考えられる。これを防ぐにはより細いエンドミルを用い、回転速度を増すなどの対策が必要と考えられるが、今回は固定法の検討が主であり切削条件等の検討は今後の課題である。

Fig.18 Deformation of plate after cutting

9. 最小切削厚さ

以上の検討結果を基に、どの程度の板厚まで加工できるか実験した。真空鑄造法を用い、アラルダイトで接着した。切削条件を表3に示す。また切削した板の断面を図19に示す。約20μmの板厚まで加工することができた。これよりも薄い板厚においては破断した。接着強度が十分であれば破断しないはずであるが、図12で見られたように、鑄込み面の接着強度は本来の接着強度に比べて低下している。これは低融点合

Table 3 Cutting conditions

Workpiece	Brass 60×60×3mm
Machined pocket size	15×15 mm
End mill	3 φ square end mill (Nachi, DLC coated)
Rotational speed	8000 rpm
Feed rate	100mm/min
Depth of cut	0.1~0.001mm

Fig.19 Cross section of machined plate

金上の酸化膜や不純物により局部的に接着が不十分な箇所があり、その部分で破断するためではないかと考えられる。

10. 加工例

最後に本方式を用いた3次元加工例を図20から図22に示す。図21と図22の加工には下鑄込み法を用いた。

Fig.20 Honeycomb (Al: t 0.1mm, φ 3mm square end mill)

Fig.21 Propeller (Bs: t 0.3mm, φ 3, φ 6 mm ball end mill)

Fig.22 Cross bellows (Al: t 0.1 mm, φ 3, φ 6 mm ball end mill)

11. 結 論

- 1) 低融点合金をバックアップとし、接着または真空吸引を用いて3次元の薄板部品を加工する3方法を提案し、いずれも有効であることを示した。
 - 2) 鑄込み法としては真空鑄造法が有効である。
 - 3) 接着力、切削力について検討し、真空鑄造法と接着を用いて0.02mm板厚まで加工できることを確かめた。
- 本方法は薄板部品の試作や少量部品の製作に有効であると考えられる。

参 考 文 献

1) Uアロイシリーズカタログ：(株)大阪アサヒメタル工場
2) 宮口幸司, 獄岡悦雄, 栢田正美, 岩部洋育：小径ボールエンドミルを用いた高回転ミーリングにおける動的切削力, 精密工学会誌, 67, 3(2001), 450