

微細表面構造による切削工具の高機能化 -アルミニウム合金のドライ加工のための構造最適化-

大阪大学 ○プリヤ シン ©杉原達哉, 榎本俊之

要 旨

融点が低く活性な金属であるアルミニウム合金は、ドライ加工では工具表面へ著しい切りくず凝着が生じることが問題となる。この問題に対して、本研究では工具表面にディンプル状の微細構造を導入することで、優れた耐凝着性を発現する切削工具を提案・開発した。さらに、表面構造の方向依存性や寸法が工具の耐凝着性に及ぼす影響を明らかにすることで、最適な工具表面構造の指針を明確化した。

1. 緒 言

近年、生産現場では環境負荷の低減が強く求められており、切削加工においても、切削油剤を用いないドライ切削加工への要求が強まっている^[1]。そして、ドライ切削加工の実現が困難な材料のひとつがアルミニウム合金である。アルミニウム合金は、融点が低く活性な金属であるため、切削加工時に被削材であるアルミニウム合金が工具表面に凝着することが問題となる。そして、この凝着を防ぐためには、切削油剤の使用が不可欠となっている。そこで、アルミニウム合金のドライ加工を実現するために、これまでに DLC コーティングや MQL 加工など様々な研究が行われているが、完全な解決に至っていないのが現状である。

こういった状況を打破するために、本研究では、工具表面への微細な三次元周期構造の導入によって、アルミニウム合金のドライ加工の実現を試みた。先行研究では、工具表面に微細な溝構造を形成することによって、アルミニウム合金のドライ加工において、工具への凝着を著しく抑制することに成功している^[2]。その一方で、溝構造の耐凝着性には方向依存性があり、切りくず流出方向と溝方向が一致した場合、工具の耐凝着性が著しく低下することが明らかとなっていることから^[2]、複雑形状の加工など、切りくず流出方向が一定でない加工の場合は性能が著しく低下する。

そこで本研究では、アルミニウム合金のドライ加工において、より優れた耐凝着性を発現する工具の開発を目的に、表面にディンプル構造を有する切削工具を新たに提案・開発した。そして、開発工具の耐凝着性や方向依存性、ディンプル寸法の影響の評価を行うとともに、ディンプル構造の凝着抑制メカニズムを明らかにすることで、最適な工具表面構造の指針の明確化を試みた。

2. 微細ディンプル構造を有する切削工具の開発

本研究では、フェムト秒レーザーを使用して、超硬合金製工具のすくい面に微細なディンプル構造の形成を行った。そして、ディンプルの寸法・配列の影響を明らかにするため、異なる 10 種類の工具を開発した。表 1 に開発工具の詳細を示す。D_{dia}、L_{bd} は、それぞれディンプル直径とディンプル間距離を示している。また、ディンプル深さ D_{dep}、切れ刃先端からディンプルまでの距離 E_w は、それぞれ 5 μm と 25 μm で統一している。面積比 A_r は、工具すくい面においてディンプルの凹部構造が占める割合である。また、ディンプル構造工具の方向依存性の有無を確認するため、それぞれの寸法のディンプル構造について、切りくず流出方向とディンプル配列が一致する直線配列 (Linear) と、切りくず流出方向に対し交互にディンプルが配置されているジグザグ配列 (Zigzag) の 2 種類を用意した。図 1 に DT05 と DT06 の SEM 観察像を示す。

実験は表 1 の各工具と平滑なすくい面を有する通常の工具を用い、アルミニウム A5052 合金の正面フライス切削をドライ加工環境下にて行った (加工速度 380 m/min, 送り速度 0.12 mm/tooth, 軸方向加工深さ 3 mm)。加工実験には立型マシニングセンタを使用した。加工後の工具すくい面はレーザー顕微鏡で観察し、すくい面の切れ刃近傍 750 μm 角の面積中において、高さが 0.5 μm 以上の凝着物が生成している面積の割合 (凝着面積率) を計算することで、各工具の耐凝着性を評価した。

Table 1 Textured tools and their description

Tool	D _{dia} μm	L _{bd} μm	A _r %	Arrangement
DT01 / DT02	50	75	35	Linear / Zigzag
DT03 / DT04	30	75	13	Linear / Zigzag
DT05 / DT06	70	75	68	Linear / Zigzag
DT07 / DT08	50	95	22	Linear / Zigzag
DT09 / DT10	50	55	65	Linear / Zigzag

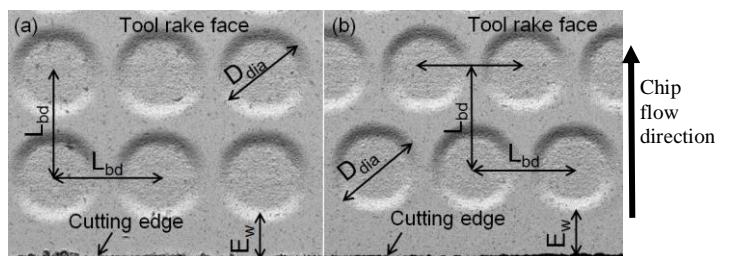


Fig. 1 Rake face of dimple textured tool, (a) DT05, (b) DT06

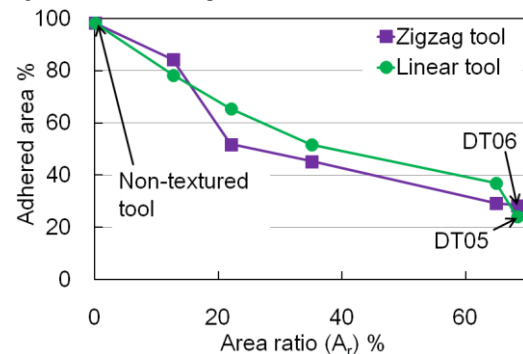


Fig. 2 Change in adhered area with respect to area ratio after 1800 m of cutting

3. 微細ディンプル構造を有する切削工具の耐凝着性

図 2 は、切削距離 1800 m 時点における各工具の凝着面積率と、各工具のディンプルの面積比 A_r の関係を示している。なお、表面構造のない通常の工具 (Non-textured) の面積比は 0 として示している。同図から分かるように、ディンプル構造を有する全ての工具が、通常の工具より凝着の生成を抑制できている。また、各工具の耐凝着性はディンプル構造の面積比に大きな影響を受けており、面積比が大きくなるにつれて凝着量が少なくなり、面積比が最も大きい DT05 および DT06 が最も優れた耐凝着性を示している。

さらに、直線配列とジグザグ配列の凝着量を比較してわかるように、ディンプル構造の耐凝着性はディンプル配列の影響を受けておらず、切りくず流出方向とディンプル配列が一致する直線配列においても、優れた耐凝着性が得られていることがわかる。ここで、溝構造では、切りくず流出方向と溝方向が一致すると、切りくずが溝に沿って変形することで溝内部に侵入してしまうため、微細構造の効果が得られなくなる^[2]。それに対し、ディンプル構造は凹部が凸部に囲われている構造であるため、どの方向から切りくずが流れてきてもディンプル内部への切りくずの侵入を抑制することができ、

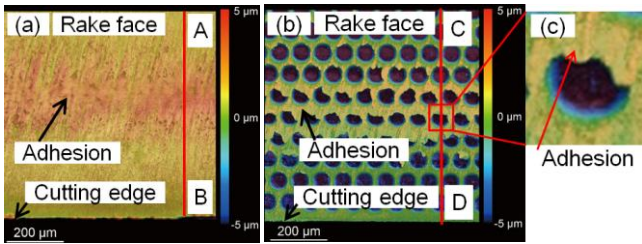


Fig. 3 Tool rake face after cutting 1800 m, (a) non-textured tool, (b) DT06 and (c) magnified dimple of DT06

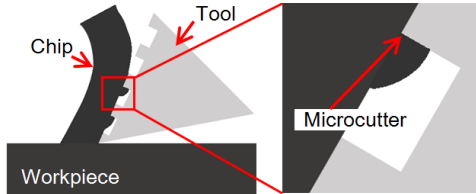


Fig. 4 Microcutter effect of textured tool

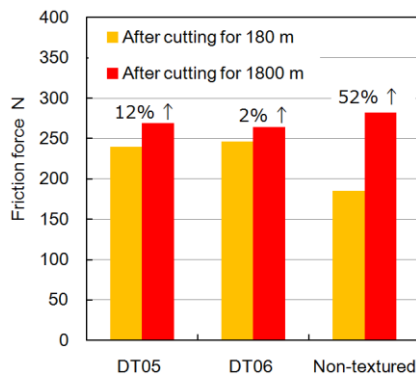


Fig. 5 Increase in friction force for textured and non-textured tool

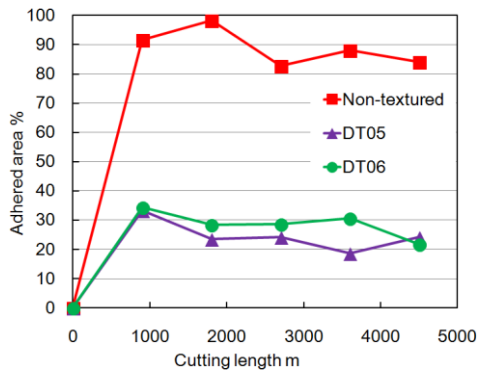


Fig. 6 Effect of dimple texture over long distance cutting

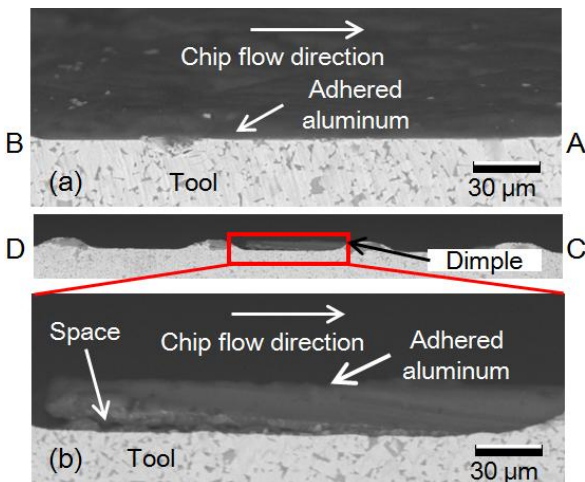


Fig. 7 Sectional view (a) non-textured tool (b) DT06

テクスチャの効果を得ることが可能となっている。つまり、ディンプル構造は切りくず流出方向に対する方向依存性が小さい構造であると言え、アルミニウム合金のドライ加工において、より汎用性に優れた構造であることが明らかとなった。

4. ディンプル構造の凝着抑制メカニズム

図 3 (a), (b) は、切削距離 1800 m の時点において、通常工具、DT06 のすくい面をレーザー顕微鏡で観察した結果である。同図の中で黄色～赤色で示された部分は、凝着物が堆積していることを示している。同図から、通常工具と比較して、DT06 への凝着量が極めて少ないことが確認できる。さらに、図 3 (c) は DT06 のディンプル部分の拡大図であるが、開発工具に生成した凝着物は、ディンプルのエッジ部に集中していることがわかる。ここで、テクスチャ工具のネガティブな作用のひとつとして、テクスチャ構造の Microcutter 効果というものが報告されている^[3]。これは、図 4 に示すように、切りくず流出方向と垂直方向のテクスチャエッジ部が、流出する切りくずを二次切削してしまう現象であり、本開発工具に生成した凝着物は、この Microcutter 効果によって生じたものであることが予想される。

さらに、図 5 は、切削距離 180 m、ならびに 1800 m の時点における工具すくい面と平行方向成分の切削抵抗（摩擦力）を示している。同図から、通常工具では切削距離の増加にともない凝着量が増加することで、切削抵抗が大幅に増加しているのに対し、凝着を抑制できている開発工具では、切削初期から摩擦力がほぼ変化していないことがわかる。その一方で、凝着の影響が少ない切削初期（切削距離 180 m）においては、開発工具の摩擦力は通常工具使用時より大きな値を示しており、この結果からもディンプル構造が Microcutter としての効果を発現していることが確認できる。

ここで、図 6 は、通常工具、DT05 ならびに DT06 について、切削距離 4500 m までの凝着量の推移を示したものである。同図から、開発工具は通常の工具と比較して凝着を著しく抑制できていることが確認できると同時に、いずれの工具も凝着量は増減しながら推移しており、工具表面上の凝着物は生成と脱落を繰り返していることがわかる。さらに、図 7 は、通常工具、DT06 を図 3 (a) の AB 面、図 3 (b) の CD 面でそれぞれ切断し、工具母材と凝着物間の状態を断面側から SEM により観察した結果である。同図に示すように、通常工具（図 7 (a)）では凝着物と工具母材が密着しているのに対し、ディンプル内部に生成した凝着物とディンプル底部間には空間が存在している（図 7 (b)）。つまり、Microcutter 効果によって生成した凝着物は極めて脱落しやすい状態となっており、この凝着物が頻繁に脱落する際に、ディンプル周辺の凝着物が同時に脱落することで、少ない凝着量を維持しながら加工することが可能になると考えられる。また、ディンプル面積比が大きいくほど脱落しやすい凝着物の比率が大きくなるため、図 2 のように面積比の増加にともない工具の耐凝着性が向上したと言える。

5. 結 言

アルミニウム合金のドライ加工において優れた耐凝着性を発現する切削工具の開発を目的に、ディンプル構造を有する切削工具を開発した。そして、開発工具が優れた凝着抑制効果を有することを示すと同時に、ディンプル構造の方向依存性の低さ、ディンプル寸法の耐凝着性への影響を明らかにした。さらに、ディンプル構造は凝着物の脱落を促進することによって、凝着量を一定量に維持する効果があることを示した。

本研究の遂行にあたりご協力を賜りました、株式会社リプス・ワークスに深く感謝いたします。

文 献

- [1] P.S. Sreejith, B.K.A. Ngoi, *Prec. Eng.*, Vol. 101, (2000) pp. 287-291
- [2] T. Sugihara, T. Enomoto, *Prec. Eng.*, Vol. 36, (2012) pp. 229-237
- [3] J. Ma, N. H. Duong, S. Lei, *Proc. Inst. Mech. Eng. J J. Eng. Tribol.*, Vol. 229, No. 4 (2014) pp. 449-4