

インコネル 600 切削加工時における構成凝着層が工具摩耗に及ぼす影響

中央大学 ○古牧久登, 石川広希, 伊津井裕人, 高橋幸男, 宋 小奇, ◎井原 透

要 旨

切削加工中に生じる凝着物は工具摩耗や仕上げ面に影響を及ぼすことが知られている。本研究では、焼き入れ鋼やインコネル 718 において、工具面上に薄く安定的に生じた構成凝着層は工具摩耗の抑制と仕上げ面品位に対して有用性のあることを報告してきた。そこで本研究では、インコネル 718 とは引張強度や凝着性の異なるインコネル 600 を被削材とし、構成凝着層が生じる条件について検証し、工具摩耗との関連について評価した。

1 緒 言

近年、航空宇宙産業や発電所、化学プラントなどにおいては、高温強度の高い耐熱合金の需要が高まっている。しかしながら、切削加工時においては、低熱伝達率、高温下での化学安定性といった特性から工具の損傷や摩耗が生じやすいことが知られている。耐熱合金であるインコネルは、被削性の悪さに加え、工具との親和性が高く凝着物が生じやすい。工具面上に生じた凝着物は、厚く成長すると構成刃先(Build-up Edge, BUE)となり、BUE の脱落時に工具材を持ち去るため、工具寿命と仕上げ面品位に影響を及ぼすことが知られている。先行研究では焼き入れ鋼¹⁾やインコネル 718²⁾の切削において、構成凝着層(Build-up Layer, BUL)と呼ばれる安定的に薄く生じる凝着物は、脱落時に工具材を持ち去ることが少ないため工具摩耗の抑制と仕上げ面品位に対して有用性があることが報告されている。

そこで本研究では、インコネル 718 と比較して引張強度が約半分³⁾、凝着性が異なる⁴⁾インコネル 600 においても、構成凝着層が生じることで工具摩耗の抑制効果が認められるのか検証することを目的とした。

2 材料及び実験方法

被削材は直径 50mm を有するインコネル 600 の丸棒で、化学成分を表 1 に示す。切削実験は複合旋盤(オークマ製, MULTUS B200)にてドライにて切削した。工具は P20 種の超硬工具(SNMN120408)を用いた。

切削条件を表 2 に示す。なお、切削速度は幅広く用いられている速度近傍とした。切削力は切削動力計(Kistler 製, 9129AA)で測定した。仕上げ面粗さは表面粗さ測定機(Mitsutoyo 製, SJ-201)により計測した。また、凝着物の形成過程と工具摩耗を評価するため、切削後の工具表面を SEM (FEI 製, Quanta250), 3D 測定レーザー顕微鏡(Olympus 製, OLS-4100SAT), を用いて凝着物の高さ、すくい面摩耗深さ KT , 逃げ面摩耗幅 VB を測定した。

3 実験結果

3.1 構成凝着層が生じる条件

3.1.1 工具すくい面に生じた凝着物と摩耗

図 1 に典型的な工具表面の様相を示す。凝着物は工具すくい面上に薄く広く凝着している様子が認められる。なお、長時間の切削においては工具ノーズ部分で刃先の崩壊、主切れ刃部分でくさび形の亀裂、境界部分ですくい面摩耗が顕著に観察された。

切削速度に伴う凝着物の形成条件について確認するため、凝着物の高さですくい面摩耗深さ KT との関係調べた。図 2 にノーズ-主切れ刃間での工具すくい面の高さの変化と切削距離の関係を示す。ここで、正の値は凝着物の平均最大高さであり、負の値はすくい面摩耗深さ KT である。切削速度 $V20, 40, 60\text{m/min}$ においては、切削距離 $L60\text{m}$ まで凝着物が生じていたが、 $L60\text{m}$ 以降ではすくい面摩耗が認められた。それに対して、 $V80\text{m/min}$ では切削開始から $L10\text{m}$ までに限り凝着物が生じ、その後すくい面摩耗が認められた。また、 $V40, 60, 80\text{m/min}$ では、 $L150\text{m}$ を超えると急激にすくい面摩耗が生じていた。

次に切削距離に伴う境界付近のすくい面摩耗を図 3 に示す。 $L50\text{m}$ までにおいては、すべての切削速度で境界付近のすくい面摩耗は生じておらず、 $L50\text{m}$ 以降において、 $V20, 40, 60\text{m/min}$ では緩やかに進展しているが、 $V80\text{m/min}$ では急激に進展していた。

3.1.2 切削力の変化

凝着物が生じていた $L10\sim 50\text{m}$ での各切削力を図 4 に示す。全体的な傾向として切削速度に伴って切削力は減少していることがわ

かる。一般的に切削速度が高くなると切削温度が急に上昇することで被削材の強度が落ち、切削抵抗が減少すると言われているが、 $V40\text{m/min}$ の背分力は $V60\text{m/min}$ と同等な数値を示している。これはすくい面に凝着物が生じたことにより見かけの工具すくい角が増大し、その結果として $V40\text{m/min}$ の背分力が低下したと考えら

Table1 Chemical compositions of Inconel 600

Ni	Cr	Fe	Mn	C	Cu	Si	P	S	Other
76.15	15.24	7.53	0.28	0.02	0.02	0.11	0.005	0.002	Bal

Table2 Cutting conditions

Tool material	Cemented carbide P20
Tool dimension	SNMN120408
Rake angle α (°)	-8.5
Clearance angle β (°)	-6
Nose radius R (mm)	0.8
Cutting speed V (m/min)	20,40,60,80
Depth of cut ap (mm)	0.5
Cutting feed f (mm/rev)	0.05
Cutting time T (s)	1,10,30,60,100,150,200,285,300,450
Cutting fluid	Dry

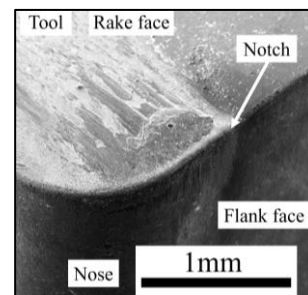


Fig.1 SEM image of tool surface at cutting speed $V40\text{m/min}$, feed $f0.05\text{mm/rev}$, depth of cut ap 0.5mm after cutting $L50\text{m}$

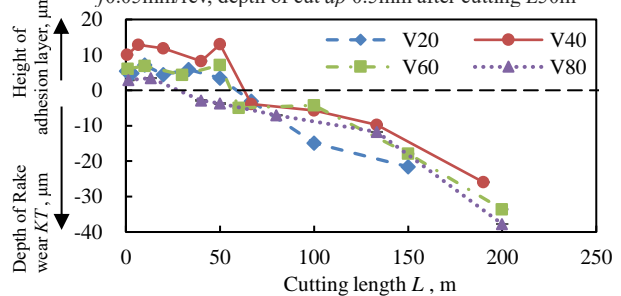


Fig.2 Variation of height of tool rake face with cutting length

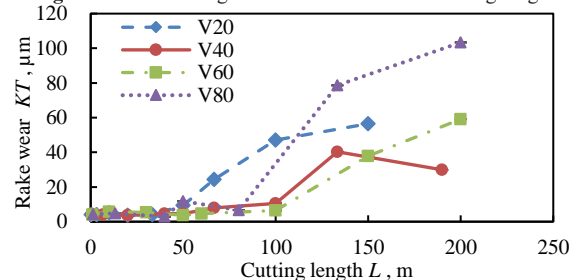


Fig.3 Variation of depth on the tool rake face near notch with cutting length

れる。また $V40$, 60m/min の動的成分が小さいことから、凝着物が切削抵抗の動的成分に与える影響が少ないことがわかる。

3.1.3 表面粗さの変化

BUEなどの凝着物は表面粗さを悪化させることが知られているため、表面粗さについて調べた。算術平均粗さ Ra と切削距離の関係を図5に示す。粗さにおいても $V20$, 40 , 60m/min においては $L50\text{m}$ 近傍まで粗さの変化は同等であった。その後、摩耗の進展傾向と同様に粗さが増加した。ただし、切削開始から凝着物が薄く、著しく摩耗が進んだ $V80\text{m/min}$ は粗かった。また、凝着物が高く生じていた $V40\text{m/min}$ はその他の切削速度と表面粗さについて差は見られないことから悪影響を及ぼすことはないと考えられる。したがって、生じた凝着物はBUEではないと考えられる。

以上の実験結果から、切削開始から $L50\text{m}$ までにおいて、工具すくい面に生じた凝着物は工具切れ刃近傍で大きく成長せず、工具表面に薄く広く安定的に存在し、切削抵抗の動的成分と仕上げ面粗さに悪影響を及ぼさないことから、インコネル 600 の切削において BUE は生じず、BUL が工具表面に安定的に生じていることが認められる。

3.2 構成凝着層が逃げ面摩耗に及ぼす影響

BUL が工具逃げ面摩耗に及ぼす影響を評価するため、逃げ面摩耗幅 VB を調べた。逃げ面摩耗幅 VB の変化と切削距離の関係を図6に示す。同図より、逃げ面摩耗幅は $L50\text{m}$ からほぼ一定の摩耗率で増大していることから、インコネル 600 において初期摩耗期間は $L50\text{m}$ 近傍までであると推測される。一方、 $V80\text{m/min}$ における逃げ面摩耗幅は、他の切削速度と比較すると、初期摩耗期間で急速に進展していることがわかる。

切削加工にて生産活動を行う現場において、定常摩耗期間は摩耗の進展量が推定しやすいため最も重要視される。そこで $L50\text{m}$ 以降を定常摩耗期間とし、そこでの逃げ面摩耗幅を図7に示す。近似直線の傾きはすべての切削速度でほぼ等しいことから摩耗機構は同一のものと示され、定常摩耗期間では凝着物による保護作用は確認できない。また、近似直線の切片を見ると $V40\text{m/min}$ の近似直線の切片が他の切削速度よりも小さいことから、初期摩耗期間において $V40\text{m/min}$ ではBULにより逃げ面摩耗が抑制されると考えられる。

以上のことと、3.1.1 節からBULにはノーズ-主切れ刃間と境界付近のすくい面と逃げ面において工具摩耗保護効果が認められた。

4 考察

4.1 切削距離に伴う凝着物の変化

一般的に被削材の再結晶温度を超えた切削では BUE などの凝着物が消滅すると知られている⁹⁾。なお、インコネル 600 の再結晶温度は $550\sim 600^\circ\text{C}$ とされている⁹⁾。よって切削中にBULが生じるかどうかは被削材の温度が関係しており、BULが初期摩耗期間でのみ生じ、それ以降で消滅したのは、定常摩耗期間に被削材が再結晶温度を超えたためと考えられる。

また、図2に示したように切削速度が遅いほど凝着物が安定的に凝着している時間は長くなる。 $V20$, 40 , 60m/min が $L60\text{m}$ 近傍まで、 $V80\text{m/min}$ は $L20\text{m}$ 近傍までで安定であると認められる。切削速度によりBULの安定な時間が異なるのは、切削速度の増大に伴って再結晶温度に達するまでの時間が短くなり、結果として、BULが工具に安定的に存在する時間も短くなるからである。さらに切削時間が長くなるとすくい面摩耗が顕著に認められるのは、高温下での疲労により工具内部で微小損傷が生じはじめ、不安定になった凝着物が脱落時に工具材を持ち去るためであると考えられる。

4.2 初期摩耗期間における凝着

切削初期においてインコネル600とインコネル718²⁾の切削距離に伴う構成凝着層の高さ成長傾向は同一のものであったが、インコネル600では $V40\text{m/min}$ で最大 $12\mu\text{m}$ 生じているのに対し、インコネル718では $V10\text{m/min}$ において最大 $30\mu\text{m}$ であった。最大高さが異なるのは、引張強度が比較的低いインコネル600では生じたBULの強度も低いためにBULの排出量が多くなるため、結果としてBUL高さが低くなっていると考えられる。また、逃げ面摩耗幅について切削速度が増加するとBULの保護効果が減少する傾向はインコネル600とインコネル718の両者で同一であった。

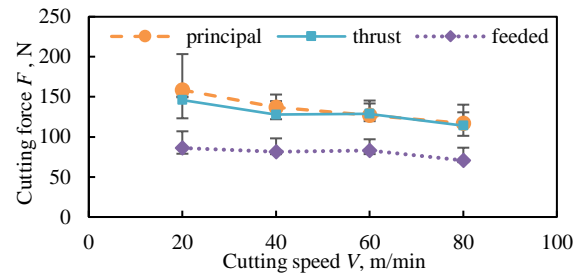


Fig.4 Variation of cutting forces F with cutting speed

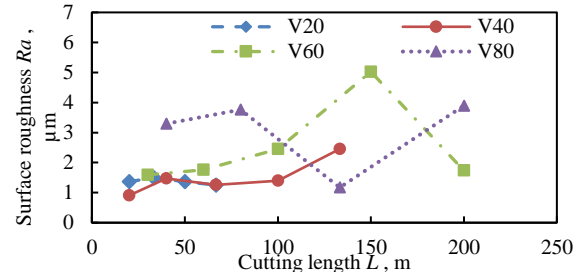


Fig.5 Variation of surface roughness Ra with cutting length

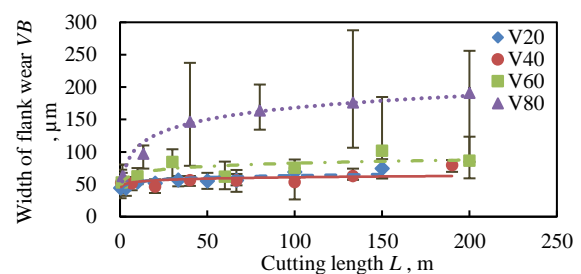


Fig.6 Variation of the width of flank wear VB with cutting length

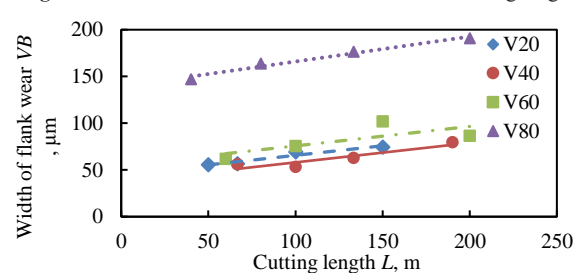


Fig.7 Variation of the width of flank wear VB with cutting length during steady state wear

5 結言

インコネル 600 を被削材とした 3 次元連続旋削加工の実験により次の結果を得た。

1. 凝着物の生じる期間は切削開始から切削速度が速くなるに伴って短くなり、最も高く生じる切削速度は $V40\text{m/min}$ である。また切削距離が長くなるにつれて凝着物の高さは低くなる。
2. 工具すくい面に生じた凝着物は構成凝着層である。
3. 構成凝着層が相対的に高く生じている切削速度の初期摩耗期間では摩耗の進展が抑制されるため、工具摩耗保護効果が認められる。

参考文献

- [1] 宋ら, 構成凝着層を利用した焼入れ鋼の切削加工技術に関する研究, 精密工学会誌, **82**, 9, (2016), 814. [2] SONG Xiaoqi et al., Influence of Built-up layer on the wear of uncoated cemented carbide tool during cutting of Inconel 718, LEM21, 2017. [3] 日立合金スーパーアロイカタログ, 日立金属株式会社. [4] 生田明彦ら, 難削材切削時の凝着機構に関する基礎的研究(第3報), 精密工学会誌, **68**, 6, (2002), 838. [5] 中山一雄ら, 構成刃先の研究, 精密機械, **22**, (1956), 3, 100. [6] K.H.Song, Effect of welding speed on microstructural and mechanical properties of friction stir welded Inconel 600, Materials & Design, **30**, 10, (2009), 3972.

「インコネル」はスペシャルメタルズ社の登録商標です。