B07 二重らせん摩擦攪拌形バニシングによる表面改質 - バニシング工具先端形状が表面粗さ・硬さ・残留応力に及ぼす影響 -

Surface Enhancement by Frictional Stir Burnishing on Double Helical Path
- Effect of Tip Shape of Burnishing Tool on Surface Roughness, Hardness and Residual Stress -

○学 高田 義正(東京農工大) 正 笹原 弘之(東京農工大)

Yoshimasa TAKADA, Tokyo University of Agriculture and Technology, Nakacho2-24-16, Koganei, Tokyo Hiroyuki SASAHARA, Tokyo University of Agriculture and Technology

A Frictional Stir Burnishing (FSB) is applied to the shaft materials of 0.45%C steel by using a multi-tasking machine in this paper. FSB is a process where the burnishing tool rotates at high revolution speed. Then the thin surface layer is rubbed and stirred with a temperature elevation and reduction. By FSB process on double helical path, both high hardness and compressive residual stress are achieved. However, when the FSB process using sphere tip shape tool is applied surface roughness becomes large ($Ra20\mu m$). Therefore, FSB process using flat tip shape tool is applied. As a result, both high hardness (600 HV) and compressive residual stress (-350 MPa) are achieved and surface roughness becomes small ($Ra3\mu m$).

Key words: Frictional Stir Burnishing, Surface enhancement, Multi-tasking Machine, Residual stress, Strain

1. 結論

機械部品には高機能化, 長寿命化が求められる。特に動力伝達部材として多用されるシャフト材には, 高硬度化による耐摩耗性向上や圧縮残留応力付与による疲労強度の向上が要求される。これらの要求を満たす技術に表面改質技術がある。

図1のように, 高速回転するバニシング工具で金属表面を擦過・攪拌し, 表面層に極度に大きな塑性ひずみを与えると同時に, 塑性変形と摩擦による局所的な温度上昇・急冷を生じさせ, 金属表面に結晶微細化と変態による表面改質を行う摩擦攪拌形バニシングが提案されている¹⁾。摩擦攪拌形バニシングはマシニングセンタや複合加工機などの回転工具を使う工作機械を用いることができ, 切削加工後に直ちに必要部分の表面改質を行えることが大きな利点の一つである。摩擦攪拌形バニシングでは, 加工条件の設定によって高硬度あるいは圧縮残留応力となる表面を得る事ができる。さらに, 異なる加工条件で二重らせん経路の加工を行うことにより, 高硬度・圧縮残留応力を両立する表面を得ることが可能である²⁾。しかし, 従来の先端が球面状の工具(先端半径 $R=3mm$)による加工では表面粗さが大きくなる問題がある。

そこで, 本研究では先端が平坦な工具を用いて実験を行い, バニシング工具先端形状が加工面の表面粗さ・硬さ・残留応力に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

Fig.1 Schematic of frictional stir burnishing

2. 実験方法

本研究で使用した摩擦攪拌バニシング工具を図2に示す。この工具は, ばねを介してバニシングピンを保持し, シリンダ内のばねをねじで圧縮することで予圧を与えると同時に圧縮力を調整できる機構となっている。図3に示すように工具を複

Fig. 2 Burnishing tool

Fig. 3 Experimental setup

合加工機の工具主軸に取り付け, 工作物主軸に取り付けた円筒形状の試験片を低速で回転させながら工具を高速回転させ, らせん状の経路でバニシング加工を行う。二重らせん経路での加工では, 異なる加工条件で二度, 加工パスが二重らせんとなるよう加工する。試験片は炭素鋼S45Cである。

3. 工具先端形状が表面粗さ・硬さ・残留応力に及ぼす影響

先端が半径 $R3mm$ の球面工具, および平坦な平面工具を用いて実験を行い, 加工表面の粗さ, 硬さ, 残留応力を比較する。実験条件を表1に示す。どちらの条件も高硬度な表面となる加工条件で1パスの加工を行った。

加工後の工具先端の写真を図4に示す。摩耗の状態から, 球面工具を用いた条件A1では工具先端の一部分のみで加工が行われていることがわかる。しかし, 平面工具を用いた条件A2では工具先端の全面で加工が行われている。平面工具では球面工具に比べ, 工具と試験片との接触面積が大きくなり, 接触面の垂直応力が小となっていると考えられる。

加工表面の写真を図5に示す。どちらの条件も酸化色を呈している。また, 球面状工具を用いた条件A1ではむしろ円弧状の擦過痕が確認できる。しかし, 平面工具を用いた条件A2ではそれらは見られず比較的滑らかな表面となっている。加工表面の粗さの測定結果を図6に示す。条件A1では $Ra20\mu m$, 条件A2では $Ra2\mu m$ と平面状工具を用いた条件で粗さが小さくなっている。球面状工具では垂直応力工具押し込み圧力が大となり, 一部では付着摩擦状態となるため, むしれや擦過痕が生じ, 表面粗さが大きくなると考えられる。しかし, 平面状工具では垂直応力が小で付着摩擦とはならず, むしれや擦過痕は生じず, 滑らかな表面を得られると考えられる。

加工断面の顕微鏡写真を図7に, 加工断面の深さ方向の硬度分布を図8に示す。どちらの条件も表面に600HVの硬化層が創成されており, この硬化層の組織は母材とは明らかに異なる。ひずみを与えられながら摩擦熱によって高温となり, 工具通過後急激に温度が低下したことで表面層にマルテンサイトが生じていると考えられる。この硬化層の厚さは, 条件A1では $500\mu m$, 条件A2では $50\mu m$ となっており, 平面状工具を用いた場合に薄くなっている。平面状工具では工具押し込み圧力が低下し, 加工表面に大きな塑性ひずみを与えられず, 発熱も抑えられるため硬化層が薄くなると考えられる。

加工表面の残留応力を図8に示す。球面工具を用いた条件A1では-50MPa程度の圧縮であるが, 平面工具を用いた条件A2では200MPa程度の引張りになっている。摩擦攪拌形バニシングでは, 高温状態で塑性ひずみが付与された後, 温度低下に

より体積が収縮する。平面工具では垂直応力が小で付着摩擦状態にはならないことから、表面層に付与される塑性ひずみは小さいと考えられる。むしろ、温度低下時の体積収縮の影響が大きくなり、引張り残留応力となったと考えられる。

このように、平面工具を用いることで高硬度かつ粗さの小さい表面を得る事ができた。しかし、球面工具と比べ硬化層は薄くなり、残留応力は引張りとなった。

Table 1 Processing conditions

Condition		A1	A2
Thrust force	P	N	750
Tool spindle speed	S	min^{-1}	10000
Helical pitch	p	mm	2.5
Feed rate	F	mm/min	200
Tip shape of tool		Sphere	Flat
Tool radius	R	mm	3

Fig. 4 Over top view of used tool

Fig. 5 Processed surface

Fig. 6 Surface roughness

Fig. 7 Cross section of processed surface

Fig. 8 Hardness distribution

Fig. 9 Residual stress

4. 二重らせん経路における工具先端形状の影響

平面工具を用いた1パス加工により、高硬度かつ粗さの小さい表面が創成された。ここでは高硬度と圧縮残留応力を両立し、かつ粗さの小さい表面を得るために、平面工具を用いた二重らせん経路の加工を行い、球面工具 ($R=3\text{mm}$) を用いた場合との比較を行う。実験条件を表2に示す。

加工表面の写真を図10に、表面粗さの測定結果を図11に示す。どちらの条件も酸化皮膜を生じ変色している。また、球面工具を用いた条件B1では2パス目の加工痕で酸化皮膜がはがれ金属光沢のある表面となっている。表面粗さは条件B1で $Ra13\mu\text{m}$ 、条件B2で $Ra3\mu\text{m}$ となり、平面工具を用いた条件B2で粗さの小さい表面となった。

加工断面の写真を図12に、加工断面の深さ方向の硬度分布を図13に示す。どちらの条件も600HV程度の硬化層が創成されている。硬化層の厚さは条件B1では600μm、条件B2では

100μmと平面工具を用いた場合で硬化層が薄い。

加工表面の残留応力の測定結果を図14に示す。どちらの条件も-350MPa程度の圧縮残留応力となっている。このように、平面工具を用いた二重らせん経路の加工により、高硬度と圧縮残留応力を両立し、さらに粗さの小さい表面が得られた。

平面工具では球面工具と比べ工具面垂直応力が小さく、付与される塑性ひずみは小さいと考えられる。しかし、球面工具では付着摩擦状態に近く塑性ひずみに伴う発熱が増して温度上昇量が大きく、工具通過後の温度低下時の体積収縮の影響で圧縮残留応力が小さくなると考えられる。そのため、どちらの条件も同程度の圧縮残留応力となったと考えられる。

Table 2 Processing conditions

Condition		B1	B2
Thrust force	P	N	750
First tool spindle speed	S_1	min^{-1}	10000
Second tool spindle speed	S_2		1000
Helical pitch	p	mm	2.5
Feed rate	F	mm/min	200
Tip shape of tool		Sphere	Flat
Tool radius	R	mm	3

Fig. 10 Processed surface

Fig. 11 Surface roughness

Fig. 12 Cross section of processed surface

Fig. 13 Hardness distribution

Fig. 14 Residual stress

5. 結論

- (1) 平面工具を用いて、高硬度な表面となる加工条件で1パスの加工を行うと、高硬度(600HV)かつ粗さの小さい表面 ($Ra2\mu\text{m}$) を得る事ができる。しかし、球面工具を用いた場合に比べ、硬化層は薄くなり、残留応力は引張りとなる。
- (2) 平面状工具を用い、二重らせん経路での加工を行うことで高硬度(600HV)・圧縮残留応力(-350MPa)を両立し、かつ粗さが小さい表面を創成する事ができる。

参考文献

- 1) S.Kiuchi, H.Sasahara, Temperature History and Metallographic Structure of 0.45%C Steel Processed by Friction Stir Burnishing, Proc 5th LEM21, (2009), pp.359-364
- 2) 高田義正, 笹原弘之:二重らせん経路での摩擦攪拌形パニシングによる高硬度・圧縮残留応力を両立する表面の創成, 2010 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2010), pp.269-270