

窒化された鋼のダイヤモンド切削においてマイクロ組織が工具摩耗抑制に及ぼす影響

関西大学 ○古城直道, 山口智実, 廣岡大祐

1. 緒言

超精密切削には単結晶ダイヤモンド工具が用いられる。現在、焼入れ鋼を金型としてダイヤモンド切削する要求が高まっている¹⁾。しかし、鋼を切削するとダイヤモンド工具は著しく摩耗する²⁾。この摩耗は鉄とダイヤモンドとの熱化学的反応が要因とされる³⁾。そのため、鋼をダイヤモンド切削する際には超音波振動が付与される⁴⁾。しかし、切削速度と工具軌跡に制限がある。一方、鋼の窒化は摩耗を抑制するという報告がある⁵⁾。しかし、摩耗が抑制される機構については十分に明らかでない。

我々は過去の研究で浸炭した鋼において、析出した炭化物の面積と形状が工具摩耗に影響を及ぼすことを示した⁶⁾。また、窒化前の熱処理が窒化された鋼のマイクロ組織に影響を及ぼすことを示した⁷⁾。本研究は窒化された鋼をダイヤモンド切削した際の工具摩耗抑制にマイクロ組織が及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

2. 実験試料

窒化は鋼の表面に窒化層を形成し、表面は硬くなる。しかし、硬さ、窒化層の深さは組成によって異なる。鋼の組成が窒化後のマイクロ組織に及ぼす影響を調査するため、組成の異なる9種の鋼(5種のステンレス鋼, 耐熱鋼, 熱間ダイス鋼, 炭素工具鋼, 窒化専用鋼)と純鉄を調質後に窒化し、マイクロ組織を分析した。表1に鋼種と調質条件を示す。ガス窒化は温度500~570°C, 40~70時間行った。

窒化層の断面に対し、深さ方向に硬さ試験を行った結果を図1に示す。Crの多い鋼には、薄く硬い窒化層が形成された。一方、Crの少ない鋼は、厚く硬さの低い窒化層が形成された。例外として、熱間ダイス鋼SKD61がある。SKD61では、Cr窒化物だけではなくV窒化物が生成することでマトリクスが高い硬度となる。

調質鋼, 窒化鋼をX線回折し、構成相を同定した。表2に各鋼の構成相を示す。参考として、Cr含有量を表に示す。ただし、窒化鋼は最表層の化合物層を除去した拡散層での構成相を示す。表から調質鋼は α , $\alpha+\gamma$, γ 相であり、数種に炭化物が析出し、窒化層は α , γ 相であり、全鋼種に鉄窒化物が析出した。Crの多い鋼では、窒化層にCrNが析出した。

3. 工具摩耗の抑制効果

3.1 切削条件

上述の調質鋼, 窒化鋼を超精密旋削し、コーナ摩耗幅と工具刃先形状の運動転写性を調査した。刃先角130°, すくい角0°, 逃げ角7°, すくい面(100)の単結晶ダイヤモンド工具を用いた。切込3.5 μm , 送り3.1 $\mu\text{m}/\text{rev}$, 切削速度3.3m/sとし、10 \times 5 \times 15mmの試料に対し切削距離16mの乾式正面旋削を行った。化合物層は硬く脆弱であるため、金型材としては適していない。そのため、窒化鋼は化合物層を深さ100 μm まで正面旋削によって除去した拡散層を切削した。

3.2 工具摩耗

調質鋼と窒化鋼を切削した際に工具先端に生じるコーナ摩耗幅VB_cを計測した。調質鋼の切削では、激しい摩耗が観察され、VB_cは16mの切削で5 μm 以上にまで増加した。一方、窒化鋼の切削では、はるかに少ない摩耗が観察された。図2に調質鋼と窒化鋼のコーナ摩耗幅の比較を示す。全種の工具摩耗が窒

Table 1 Quenching and tempering conditions.

Type of steel	JIS	Quenching	Tempering
Stainless steel	SUS310S	1080 °C, W.C.	650 °C \times 5h, O.C.
	SUS430	790 °C, F.C.	650 °C \times 5h, O.C.
	SUS630	1050 °C, W.C.	650 °C \times 5h, O.C.
	SUS316L	1080 °C, W.C.	650 °C \times 5h, O.C.
	SUS420J2	950 °C, W.C.	650 °C \times 5h, O.C.
Heat resisting steel	SUH3	1000 °C \times 1.5h, N ₂ C.	600 °C \times 5h, O.C.
Alloy tool steel for hot working mould	SKD61	1035 °C \times 1h, N ₂ C.	560 °C \times 4h, N ₂ C.
Carbon tool steel	SK105	780 °C \times 1h, W.C.	550 °C \times 4h, O.C.
Steel for nitriding	SACM645	905 °C \times 1h, O.C.	680 °C \times 3h, O.C.
C. P. Fe	-	780 °C \times 1h, O.C.	550 °C \times 4h, O.C.

N₂ C.: Nitrogen cooling, O.C.: Oil cooling, W.C.: Water cooling, F.C.: Furnace cooling

Table 2 Constituent phases of quenched and tempered steels and nitrided steels.

Type of steel	JIS	Chromium content [at%]	Quenched and tempered steel	Nitrided steel
Stainless steel	SUS310S	25.5	γ -Fe	γ' -Fe ₄ N, CrN, γ -Fe
	SUS430	18.9	α -Fe, Fe ₃ C	γ' -Fe ₄ N, CrN, α -Fe
	SUS630	18.3	α -Fe, γ -Fe	γ' -Fe ₄ N, CrN, α -Fe
	SUS316L	16.8	γ -Fe	γ' -Fe ₄ N, CrN, α -Fe
	SUS420J2	12.8	α -Fe, Cr ₂₃ C ₆	ϵ , γ' -Fe ₄ N, CrN, α -Fe
Heat resisting steel	SUH3	11.3	α -Fe, Cr ₂₃ C ₆	ϵ , γ' -Fe ₄ N, CrN, α -Fe
Alloy tool steel for hot working mould	SKD61	5.4	α -Fe	ϵ , γ' -Fe ₄ N, CrN, α -Fe
Carbon tool steel	SK105	0.42	α -Fe, Fe ₃ C	ϵ , γ' -Fe ₄ N, Fe ₃ C, α -Fe
Steel for nitriding	SACM645	1.63	α -Fe	ϵ , γ' -Fe ₄ N, α -Fe
C. P. Fe	-	-	α -Fe	ϵ , γ' -Fe ₄ N, α -Fe

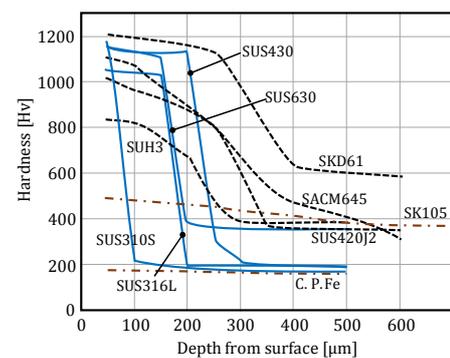


Fig. 1 Cross-sectional hardness of nitrided steels.

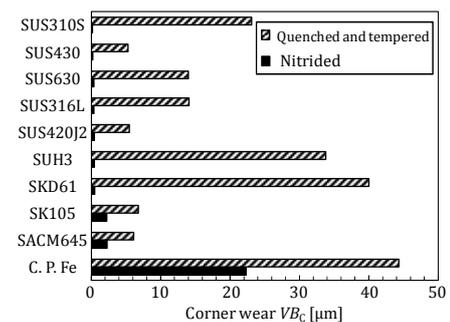


Fig. 2 Comparison of wear mitigating effect of nitriding for different type of steels.

化で抑制された。摩耗が特に少ないのはステンレス鋼である。

次に、純鉄を除く9種の鋼の組成と摩耗の関係を調べた。その結果、Crの増加に伴って工具摩耗が抑制された。CrとCの指数近似曲線の R^2 値はそれぞれ0.84、0.65と高く(図3)、前報⁹⁾で述べた窒化前のCr炭化物の影響を示唆している。

3.3 表面性状

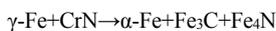
工具刃先形状の運動転写性を定量的に比較するため、理論粗さと表面粗さ R_z の比である粗さ係数を用いた。一般に、理論粗さは当初の工具形状から算出する。本研究では、切削後の摩耗した工具形状をRバイトに近似し、理論粗さ R'_{th} を、刃先後退量 δ 、近似コーナ半径 r 、一刃送り f から算出した。

図4にコーナ摩耗幅と粗さ係数の関係を示す。粗さ係数は1に近いほど転写性が良い。図から工具コーナ摩耗が抑制されるほど粗さ係数が小さい。窒化鋼は粗さ係数が1に近いため工具刃先形状の転写性が大きく改善された。

4. 工具摩耗抑制にマイクロ組織が及ぼす影響

最後に最も工具摩耗が抑制された3種のステンレス鋼においてマイクロ組織が及ぼす影響を考察する。図5に各鋼のFe、Cr、Nの定量分析結果を示す。図からCrが増えると鉄が減少する。また、いずれもCrよりNの量が多い。Crが多くなると、窒化したときの拡散層の窒素濃度が上がる⁹⁾。ここで、CrNはFe窒化物より先に析出する¹⁰⁾。よってCrは全てCrNとして析出すると考えられる。CrNは切削温度域で熱化学的に安定であるため、ダイヤモンドと直接反応しない¹¹⁾。

次に、鉄は γ -Fe₄Nを生成する。Crが増えると鉄が減るため、鉄に対する γ -Fe₄Nの生成割合はCrが多い方が高くなる。図6にCr量が最も多く、工具摩耗が最も抑制されたSUS310SのCr、Nの分布を示す。Cr、Nは全体に分布している。ここで、Fe-Cr-C-N 4元系合金では565~760°Cにおいて



の反応が進む¹²⁾。これは窒化の温度域である。したがってSUS310Sの γ -Feと析出したCrNの一部が α -Fe、Fe₃C、Fe₄Nに変化すると考えられる。このことはX線回折で γ -Fe₄Nが強く検出されていたことと一致する。Nは粒内のFeとも結びついため、粒界のみでなく粒内にも分布する。Fe₄Nは、 α -Feに比べてダイヤモンド表面の炭素原子が解離しづらい¹³⁾。

以上から、鋼中のCr量が増えることでダイヤモンド工具の摩耗が抑制されたと考えられる。

5. 結言

- (1) 種々の鋼材に窒化することで、工具摩耗が抑制されるとともに工具刃先形状の転写性が改善される。
- (2) Cr濃度が上がると、窒化したときの拡散層の窒素濃度が上がり、鉄濃度が減少するため、鉄に対して鉄窒化物が生成される割合が増える。
- (3) 拡散層の鉄窒化物とダイヤモンドは反応するが、純鉄に比べて大幅に相互作用が小さい。
- (4) CrNは切削温度域で熱化学的に安定であるため、ダイヤモンドと直接反応しない。
- (5) 鋼材に含まれるCr含有量が増加するほど、窒化した鋼の工具摩耗が抑制される。

謝辞

本研究の一部はJSPS科研費18K03887、三豊科学技術振興協会、金型技術振興財団の助成を受けて行われた。また、試料の熱処理は大阪冶金興業株式会社にご協力を頂いた。ここに記して謝意を示す。

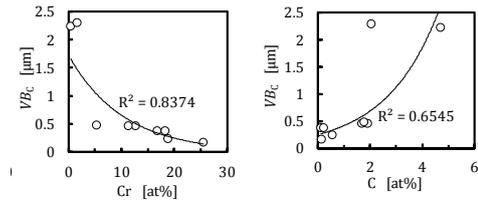


Fig. 3 Relationship between corner wear and element content.

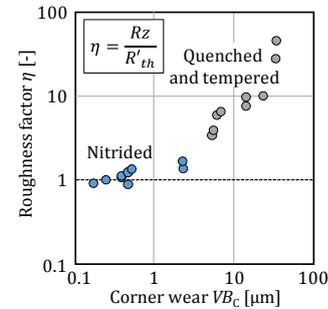


Fig. 4 Relationship between corner wear and roughness factor.

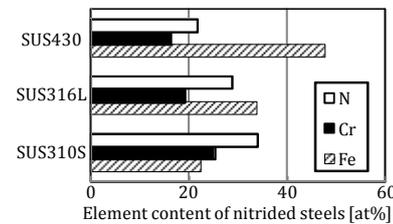


Fig. 5 Comparison of element content of nitrided stainless steels.

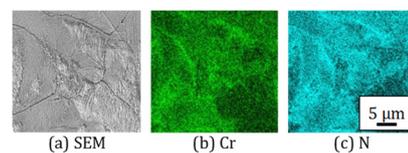


Fig. 6 Element concentration of nitrided JIS SUS310S steel.

参考文献

- 1) H. Saito et al., Precision Engineering, 49 (2017) 200.
- 2) N. Ikawa and T. Tanaka, CIRP Annals, 19, 1 (1971) 153.
- 3) S. Shimada et al., CIRP Annals, 53, 1 (2004) 57.
- 4) E. Shamoto and T. Moriwaki, CIRP Annals, 48, 1 (1998) 441.
- 5) E. Brinksmeier et al., CIRP Annals, 55, 1 (2006) 551.
- 6) 辻野元大 他, 日本機械学会論文集, 83, 856 (2017) 17-00161.
- 7) 白川将也 他, 2018年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2018) 359.
- 8) 白川将也 他, 2017年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2017) 77.
- 9) D. Liedtke et al., 鉄の窒化と軟窒化, アグネ技術センター (2011) 13, 251.
- 10) 沢村宏, 鉄鋼化学熱力学, 誠文堂新光社 (1972) 181.
- 11) N. Furushiro et al., Precision Engineering, 54 (2018) 388.
- 12) 増本健, 今井勇之進, 日本金属学会誌, 33, 8 (1969) 927.
- 13) 土居立典 他, 2011年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2011) 53.