硬い表面と耐摩耗性について

Wear-resistant Surfaces of Machine Parts and Their Treatments

機械部品の耐摩耗性を向上させる観点から硬い表面または凝集を抑制する表面を作ることについて、それらの概略と表面層の性質について述べる。

竹内 栄一*

Eiichi Takeuchi

1. ま え が き

硬い表面といっても、例えば硬さ試験機で測定した値がいくら以上をいうのか判らない。しかし、それが使用される状況によって当然硬さ値をいくら以上にしなければならぬということとは広い意味での経験から理解されているようである。

例えば摩擦、摩耗を受ける状態のもとで使用される機械部品についてみた場合、組合せるいずれか一方が他のものよりもコストが高いとか、交換が難しいなどの理由からより優れた耐摩耗性を要求されることは当然である。このような場合われわれはまず硬くすることを考える。そこで、耐摩耗性向上の観点から硬い表面について考えてみることにした。

しかし、耐摩耗性を改善するためには唯単に硬くすればよいということだけでないこと

は軸受用銅・鉛合金からも理解される。すなわち、正常な摩耗現象が凝着に起因するとすれば、これを抑制する表面を作ることまた耐摩耗性を向上させる一つの手法となる。

そこでこれらの問題も含めて述べることにした。

2. 硬さと摩耗の関係（一般論）

図1はアブレッシブ摩耗のもとにおける金属、合金の硬さと相対耐摩耗度（各金属、合金の摩耗率の逆数を鉛のそれとの比をもって表わした数値で、この値が大きいものほど耐摩耗性に優れている）の関係を模形的に表わしたものである¹⁾。これによると、純金属ならびに焼入、焼もどし処理した鋼の相対耐摩耗度は硬さが高くなるにともなって直線的に増加する。しかし加工硬化あるいは時効硬化したものは硬さの増加に対して相対耐摩耗度はむしろ減少の傾向にあるといわれている。

* 東京都立工業技術センター、副参事研究員、工博
〒115 東京都北区西ヶ丘3-13-10
☎ 03 (909) 2151 (代)

* The Tokyo Metropolitan Industrial
Technology Center
13-10, Nishigaoka 3-chome, Kita-ku, Tokyo 115

図1 Abrasive wearにおける金属の硬さと相対耐摩耗度の関係

図2 研摩紙に対する各種金属、合金の相対耐摩耗度

図3 材料の硬さと潤滑下における比摩耗量の関係

る。図2はこれらの現象を具体的に示したものである²⁾。

つぎに図3および図4は(社)日本潤滑学会摩耗研究会が協同研究として全国の摩耗研

図4 小試験片材料(金属合金)の硬さと比摩耗量の関係

究者から提出して頂いた摩耗データを集計した報告³⁾からの抜粋で、硬さと比摩耗量 Ws ($\text{mm}^3/\text{kgf} \cdot \text{mm}$ または $\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{mm}$) は摩耗した容積 M (mm^3), 荷重 P

(kgf またはN), 摩擦距離 L (mm) とした場合, $W_s = M/P \cdot L$ によって表わされる⁷⁾ の関係を表わしたものである。すなわち, 図 3 は潤滑下におけるもの, また図 4 は非潤滑下の摩擦結果で, とともに硬さが高くなるほど比摩擦量は減少する傾向がみられる。

3. 表面硬化と摩擦

3-1 浸炭, 浸炭浸窒処理と摩擦

鉄鋼材料の表面硬化法のうち最も普及しているものは浸炭硬化法であるといっても過言ではない。この方法にはかつて木炭を主成分とする固体浸炭, NaCN と塩類の混合塩浴による液体浸炭法が採用されてきたが, 戦後米国よりガス浸炭法が導入されるに及んで, そのほとんどがこれに代った。また, 最近では米国において真空浸炭法 (減圧下におけるガス浸炭) が開発され, わが国でも漸次普及の段階にある。この他, 無公害液体浸炭法として

無シアン塩浴中で電解により処理を行なう電解浸炭法⁸⁾, イオン衝撃熱処理によるイオン浸炭法などがある⁹⁾。

これらの異なった方法により浸炭処理した鋼はいずれも表面付近に炭素濃度の高い層が得られ, これが焼入れによって硬化することから耐摩擦性の向上が得られることになる。図 5 は種々の条件で浸炭浸窒処理した鋼の表面硬さと摩擦の関係を示したもので, 両者の関係はほぼ直線となる。この原因は焼入れによって生ずる残留オーステナイトとみることができる⁶⁾。そこで焼入れ後の摩擦面に生成された残留オーステナイトを X 線回折により測

浸炭浸窒条件: 750~900°C 処理油焼入れ, 100°C 焼もどし
 摩擦条件: $p15\text{kgf/cm}^2$ (147N/cm^2), $v\ 3.40\text{m/sec}$
 潤滑油: パラフィン系60spin, 油温20°C

図5 浸炭浸窒処理した鋼の硬さと摩擦の関係

浸炭浸窒処理: 750~900°C 処理, 100°C 焼もどし
 摩擦条件: $p15\text{kgf/cm}^2$ (147N/cm^2), $v\ 3.40\text{m/sec}$
 潤滑油: パラフィン系60spin, 油温20°C

図6 浸炭浸窒処理した鋼の摩擦面における残留オーステナイト量と摩擦の関係

定し、これと比摩耗量の関係を求めると図6に示すごとくなる。

要するに浸炭あるいは浸炭浸室処理した鋼の硬化層に過冷オーステナイトを残留させることは摩耗損失を大きくする原因となるため、焼入れ後 Sub-zero 処理等によってマルテンサイト変態を促進させる必要がある。

3-2 高周波焼入れと摩耗

高周波焼入れした鋼は通常その表面に 80 kgf/mm² 前後の圧縮応力が残留することか

ら、疲れ強さを要求される機械部品の処理として活用されてきた。しかし、この方法によると比較的低碳素系の鋼でも十分な表面硬さが得られることから、しばしば、耐摩耗部品の表面硬化処理としても利用されてきた。

図7は高周波焼入れした機械構造用鋼の焼もどし温度と摩耗の関係を示したもので、各鋼種とも 150～200°C で焼もどしすることにより耐摩耗性は改善される⁷⁾。これは表面付近に存在する残留応力が摩耗にたいして negative に作用するためと考えられる^{8),9)}。高周波焼入れの場合、通常の方法で焼入れした鋼に比べて焼もどし抵抗が小さい反面、残留応力が急激に除去される傾向があり、これが摩耗抵抗の改善に効果をもたらしているものと考えられる。

3-3 ほう化処理と摩耗

ほう化処理した鋼の表面層に生成される FeB(硬さ Hv2000) および Fe₂B(Hv1600) はともに高い硬さ値を示すことが特徴である。

図8はガスほう化処理した S45C の速度-摩耗特性曲線を示したものである^{11), 12)}。これによると、摩擦面が FeB 相によって構成されるときよりも、硬さの低い Fe₂B 相のときの方が耐摩耗性に優れている。この原因は低速側の mild wear のもとにおいて Fe₂B が FeB に比較して酸化摩耗となりやすく、また

試料：固定、回転試験片とも高周波焼入れ後各温度で1時間焼もどし
 摩耗条件：p15kgf/cm²(147N/cm²), v 3.40m/sec
 潤滑油：パラフィン系60spin, 油温20°C

図7 高周波焼入れした鋼の焼もどし温度と摩耗の関係

試験片：固定S45C, ほう化処理, 回転：S45C 900°C油焼入れ, 580°C焼もどし

図8 ほう化処理した鋼の非潤滑下における速度-摩耗特性曲線 (固定試験片)

図9 ほう化処理した鋼の非潤滑下におけるすべり摩耗推移曲線 (Müller and Schaabber)

試験機: Faville, 荷重: 5kp, 但し相手機はそれぞれ同一処理のもの

図10 ほう化処理した鋼の耐摩耗性 (Chatterjee-Fischer and Schaabber)

摩耗率が極大となる severe wear の領域では FeB 相と Fe₂B 相との境界付近にしばしば観察される micro crack が破壊、脱落を促進させるためと考えられる。

図9および図10は固体法でほう化処理した鋼のすべり摩耗試験の結果を示したものである^{(12),(13)}。これによると、ほう化処理鋼は通常の熱処理を施したものに比べて優れた耐摩耗

鋼 種	JIS相当	B ₄ C添加量 (%)			
		2.5	5	7.5	10
C15	S15C	□	□	■	■
C45	S45C	□	□	■	■
42CrMo4		□	■	■	■
61CrSiV5		□	■	■	■
C100	SK3	□	■	■	■
100Cr6	SUJ2	□	■	■	■
145Cr6		■	■	■	■
X40Cr13	SUS420	■	■	■	■
18-8	SUS304	■	■	■	■

□ FeBなし ■ 隅角部にのみFeBが存在
 ■ 一方の面にのみFeBが存在
 ■ ほぼ全面にFeBが存在するが、一部にFeBのないところが認められる
 ■ 全面にFeBが存在

処理条件: 900°C・5h

図11 被処理鋼の種類、ほう化剤中のB₄C添加量がほう化層の生成状態に及ぼす影響 (Chatterjee-Fischer and Schaabber)

表1 炭化物の種類と硬さ (佐藤)

炭化物の種類	硬さ (換算HV)	炭化物の種類	硬さ (換算HV)
M ₃ C	1150-1760	Fe ₃ C	1150-1340
M ₂₃ C ₆	1000-1800	(Cr・Fe) ₂₃ C ₆	1000-1520
M ₇ C ₃	1800-2800	(Cr・Fe) ₇ C ₃	1820
M ₂ C	1800-3000	Mo ₂ C	1800-2200
M ₆ C	1600-2300	W ₂ C	3000
MC	2250-3200	Fe ₄ Mo ₂ C	1670
		MoC	2250
		WC	2400-2740
		VC	2500-2800
		TiC	3200
		ZrC	2600
		NbC	2400
		TaC	1800

性を表わすことは勿論であるが、この場合も Fe₂B 相の方が FeB 相よりも摩耗損失が少なく、バナジウム炭化物の拡散浸透処理鋼に匹敵する摩耗抵抗が認められる。

以上の結果から、ほう化処理において表面

図12 鋼の表面被覆層の硬さの比較 (新井)

層を Fe_2B 単相とすることが耐摩耗性向上の観点から望ましい。図11は固体ほう化剤中に浸ぼう剤として添加される B_4C が鋼の表面層のほう化物生成に及ぼす影響を検討したもので、 900°C 、5時間一定条件で処理する場合、 B_4C 添加量が多くなるほど、あるいは被処理鋼中の合金元素の種類および含有量が多くなるほど FeB 相は生成しやすくなる¹⁸⁾。

3-4 炭化物被覆処理と摩耗

炭化物被覆法は最近の表面硬化技術のうちで最も注目されているものの一つである。この方法には溶射法 (プラズマ溶射法、爆発溶射法等)、拡散浸透法 (固体または粉末法、熔融塩浴法)、化学蒸着法 (chemical vapor deposition, CVD法)、物理的蒸着法 (physi-

試験機：大越式じん速摩耗試験機，相手材：SCM21球状焼なまし材，最終荷重：3.3kgf，無潤滑

図13 炭化物被覆材における耐摩耗性の比較 (新井)

切削条件：チップP20，チップ形状SNP-432，ホルダーN11R，被削材SNCM8($\text{H}_\text{R}230$)，切削速度170m/min，送り速度0.45mm/rev，切込み深さ1.5mm

図14 摩耗の進行状況に及ぼすTiC層厚さの影響 (菊池)

cal vapor deposition, PVD法、反応蒸着法、スパッタリング、イオンプレーティング等) などがあり、以下これらのうちから主なものについて耐摩耗性を中心に述べる。

通常、金属の炭化物は表1に示すごとく極めて硬い性質をもっている¹⁴⁾。これを鋼の表面に被覆することは従来の表面硬化処理した

試料；被加工材 SAE4340 ($H_R C33$) 工具, M42 高速度鋼 (No. 114; 500°C でステンレス鋼を 1~2 μ m の厚さに予備蒸着, No. 117, #600 エメリーペーパーで表面きず生成)

切削速度 40.5m/min, 送り速度 8.9mm/min, 切込深さ 1mm
 " 28.7m/min, " 7.8mm/min, " 1mm

図15 ARE (activated reactive evaporation) 法により TiC coating した高速度工具鋼の切削性 (Bunshah Shabaik, Nimmagadda and Covy)

ものに比べて遙かに硬い硬化層が得られることは容易に推察される。例えば図12は熔融塩浴法によって生成された炭化物層の硬さを示したもので、TiC, VC のときは Hv 3000 以上に達している¹⁵⁾。

図13は熔融塩浴法を用い、Cr, Nb, Ti および V の炭化物被覆処理を施した鋼の非潤滑すべり摩耗のもとにおける摩耗抵抗を比較検討した結果の一例で、硬さの高いものほど耐摩耗性に優れていることが認められ、ことに Ti および V 炭化物被覆鋼は広範囲に亘る摩擦速度のもとで比摩耗量が低い値を示している¹⁶⁾。また、この種の表面硬化層は融点が高く、しかも金属との反応性が低いための凝着あるいは焼つきに対する抵抗に優れた特性を有することが特徴の一つに挙げられる¹⁵⁾。

図14は CVD 法により超硬合金チップの表面に TiC 被覆を生成させたものについて一定条件のもとで切削試験を行ったときの切削性

能に及ぼす TiC coating の効果を示したものである。図中左はチップのフランク摩耗(逃げ面摩耗, 右はクレーター摩耗(すくい面摩耗)と切削時間の関係を表わしたもので、1.5 μ m 程度の薄い被覆でも明らかにその効果が認められる。また被覆の厚さの影響については切削の初期段階ではほとんど差異が認められないが、切削時間が長くなると TiC 被覆の厚いものほど摩耗損失の少なくなることが認められた¹⁷⁾。

また図15は PVD 法の一つである ARE 法 (activated reactive

evaporation) によって M42 高速度鋼チップの表面に TiC coating を施したものについてフランク摩耗からその切削性能に及ぼす影響を検討したものである。これによると、下地となる高速度鋼の表面状態あるいは切削条件によって多少の相違はみられるが、そのほとんどは TiC coating により切削性能が向上することを示している¹⁸⁾。

以上の結果からも理解されるように、炭化物被覆処理はきわめて高い硬さ値をもった表面層が得られることから、金型や切削工具などの耐久性を向上させる目的で行なわれる場合が多い。

3-5 窒化処理と摩耗

窒化による鋼の表面硬化法が Fry によって発表されてから 50 余年が経過し、最近ではタフトライド法(塩浴窒化)、吸熱形変成ガスまたは CH_4 と NH_3 の混合ガスによる窒化(ガス軟窒化)、イオン窒化などが汎用されるように

なった。これらの処理において被処理鋼中に Cr, Mo, Al, Ti, V などの合金元素が含まれているときは窒化層の硬さが Hv 1000~1200 となって、いわゆる硬化による耐摩耗性の向上がみられ、炭素鋼や低合金鋼の場合は硬さよりも表面付近に生成される化合物層の凝着抑制作用が耐摩耗性の向上に寄与するものとみることができる。

図16は種々の方法で窒化した SACM1 と焼入、焼もどし処理した SUJ-2 を組合せたときの一定条件下での摩耗推移曲線を示したもので¹⁹⁾、イオン窒化はガス窒化鋼よりも優れた耐摩耗性を表わし、ことに N_2-H_2 混合ガス中の N_2 量が多いものほど化合物層が生成されやすく、これがとくに軽負荷条件下での耐摩耗性向上に有効である。

また、図17はイオン窒化処理した SCM4 相当材の転がり-すべり摩耗推移曲線を示したもので、同一化合物層および、全硬化層厚さの場合、処理温度が低いものほど優れた摩耗抵抗を表わす。この原因の一つとして処理温

図16 各種窒化処理鋼の摩耗推移曲線 (山中)

試料: 固定 SACM1, 回転 SUJ-2 (HRC60)
試験機: 大越式じん速摩耗試験機, 非潤滑
摩耗条件: 速度 0.94m/sec

度が高くなるほど表面硬さが低下することが挙げられる²⁰⁾。

以上、硬い表面と耐摩耗性の関係について述べた。しかし、まがきでもふれたように凝着を抑制する表面を作ることとまた、耐摩耗性を向上させる重要な手法といえる。そこでつぎにこのことについてその概略を述べる。

4. 凝着などの抑制を目的とした表面熱処理と摩耗

4-1 浸硫, 浸硫窒化処理と摩耗

現在、工業的に汎用されている浸硫ならばに浸硫窒化処理はそのほとんどが塩浴またはこ

図17 摩耗に及ぼすイオン窒化処理条件の影響 (Edenhofer and Bewley)

試料: 42CrMo4 (SCM4相当),
摩耗条件: アムスラー摩耗試験機使用, 荷重 196.2N (20kgf)
相対すべり速度 1.43m/sec, 非潤滑, 転がり-すべり摩耗

図18 電解浸硫処理した鋼の Relax 試験結果 (Grieve)

表2 各種表面熱処理を施した鋼 (0.40%C) の摩擦, 摩耗特性 (Gregory)

表面熱処理条件	潤滑摩擦			非潤滑摩擦		
	最大荷重 da.N	平均 摩擦係数	摩擦面の観察結果	最大荷重 da.N	平均 摩擦係数	摩擦面の観察結果
イオン窒化; 560°C	2500	0.032	一部に激しい引掻きずが認められた。計画的に実験を中止する。	400	0.16	焼つきをともなった表面損傷が観察された。
特殊ガス窒化 570°C-5h	1200	0.038	焼きつきを起こした。	200	0.40	試験開始直後から激しい焼つきを起こす。
CN-CNO系塩浴窒化 570°C-1.5h	2000	0.035	部分的に溶着による損傷がみられる	470	0.28	試験の過程で細かい摩耗粉が発生し、焼つきによって摩擦係数は増加する。
Sを添加したCN-C NO系塩浴窒化; 570°C-2h	2500	0.032	わずかに引掻きずが生成された。計画的に実験を中止する。	780	0.73	摩擦面は塑性流れを起すが、摩耗粉はみられない。一部に引掻きずが観察された。
浸硫窒化処理 (Sur- sulf法); 570°C-1.5h	2500	0.030	表面損傷はほとんど受けていない。計画的に実験を中止する。	1150	0.11	摩耗面は塑性流れを起すが、摩耗粉はみられない。ごくわずかに淡い引掻きずが観察された。

試験片; 固定, 球状黒鉛鑄鉄 ($\sigma_B 70 \text{ kgf/mm}^2$), 非処理; 550°C 焼なし, 浸硫窒化処理; 570°C-2h 回転, S45C, 900°C 油焼入れ, 580°C 焼もどし
 摩耗条件; $p 5 \text{ kgf/cm}^2$ (49 N/cm^2), 非潤滑, すべり摩擦

図19 浸硫窒化処理した球状黒鉛鑄鉄の摩耗推移曲線

れに類する液体法である。

浸硫法は硫黄化合物を含む電解液中200°C

付近で処理を行なう方法で (浸炭, 高周波焼
 入材等の焼もどし温度), 表面に数 μm の

図20 低圧表面熱処理プロセスの一例（混合ガス中に酸素を添加すると酸化浸炭処理となる）（Dawes Tranter and Reynoldson）

試料：En32(S15CK相当)各種表面熱処理
試験機：アムスラー摩耗試験機，潤滑油：SAE#30モータ油

図21 各種表面熱処理を施した鋼の摩擦推移曲線（Dawes Tranter and Reynoldson）

試料：18-0-1型高速度鋼，処理条件：520°C-1h

図23 NH₃ふん囲気中の水分が酸化層の反応生成物および厚さに及ぼす影響（Rogalski, Wyszowski Panasiuk and Lampe）

表面熱処理	ピンのせん断荷重(kgf)	試験後の表面状態*
非処理	308	Scuffed
ガス軟室化(Nitemper)	1,070	Polished
塩浴室化(Tuffride)	925	"
酸室化浸炭	1,261	"

* ピンの摩擦面およびV-ブロックの接触面

図22 各種表面熱処理を施した En 8 (S 45C 相当) の Faville-Levally の試験結果

図24 通常の条件下における酸窒化処理した高速度鋼の非処理鋼に対する耐久性向上（Rogalski, Wyszowski, Panasiuk, and Lampe）

FeS 層が形式され、これが優れた耐凝着、耐焼つき性を有する。

図18はその一例で、非処理鋼は 27分、600 kgf 付近で焼つきを起すが、電解浸硫処理したものは試験時間60分以上の実験で最終荷重 1300kgf でも焼つきがみられず、耐焼つき性に優れている²¹⁾。

浸硫窒化処理 (570°C 付近で処理、構造用鋼の焼もどし温度に相当) した鋼にも上述と類似の性質がみられる。表 2 は潤滑および非潤滑下における摩擦、摩耗特性を窒化などの表面熱処理と比較したものである。まず潤滑下の場合、CN-CNO 系塩浴に硫黄化合物を加えたもの、あるいは Sursulf 法と称する Hydromécanique et Frottement 研究所が特許をもつ方法で処理した鋼はともにイオン窒化鋼と同程度の最大荷重および摩擦係数を有するが、摩擦面の状態にはかなりの相違がみられ、浸硫窒化処理したものはほとんど表面損傷が認められない。また、非潤滑下の結果は上述の現象が一層顕著に表われる²²⁾。

つぎに図19は球状黒鉛鋳鉄に浸硫窒化処理したときの摩耗推移曲線の一例で、速度 0.30 m/sec の主として酸化摩耗が表われる mild wear ではその効果がほとんど認められないが、0.60m/sec (凝着摩耗) または 4.00m/sec (熱的摩耗) の Severe wear では浸硫窒化処理の効果が顕著に表われ、非処理鋳鉄に比べて著しく摩耗損失が軽減されることを認めた²³⁾。

4-2 酸窒化浸炭処理と摩耗

酸窒化浸炭処理 (Oxynitrocaburizing) は次項で述べる酸窒化処理と同様、比較的新しい表面熱処理技術の一つである。この方法は CH_4 あるいは吸熱形変成ガスと NH_3 の混合ガスに 2% 以下の酸素を添加したふん囲気中で行なう耐摩耗性の向上を目的とした処理の一種である。図20は英国の Dawes らが提唱した代表的な熱処理プロセスで、真空浸炭と同

様、一種の減圧熱処理法である。

上述の方法によって 570°C、2 時間処理を行なった S 15C K 相当材について耐摩耗性を検討した。実験にはアムスラー摩耗試験機を用い、SAE#30 モータ油の潤滑下で荷重 20kgf すべり率 10% の転がりすべり摩耗を行なった。図21はその結果を示したもので、酸窒化浸炭処理した鋼はタフトライドやガス軟窒化処理 (この場合 Nitemper) したものに匹敵する耐摩耗性を有することが認められた²⁴⁾。また、図22は Faville-Levally 摩耗試験機により上述と同様 SAE#30 モータ油による潤滑下での焼つき試験を行ったときの結果を示したもので、これからは酸窒化浸炭処理鋼は非処理のものに比べて約 4 倍の負荷に耐え、しかもタフトライドやナイテンパよりも優れた性質を有することが確認された²⁴⁾。

4-3 酸窒化処理と摩耗

酸窒化処理 (oxynitriding) は従来機械部品や金型、切削工具などの性能および耐久性向上を主たる目的として行なわれてきた窒化処理と酸化処理 (例えば過熱水蒸気処理またはホモ処理) を組合せて同時に行なう方法で、 NH_3 と過熱水蒸気あるいは空気との混合ふん囲気を用い、主として高炭素系の鋼の表面熱処理法として Rogalski らによって開発された。Rogalski らの最近の研究によると、この方法を高速度工具鋼に応用した結果、鋼中の合金元素の節減を計るとともに、切削性能の向上が可能であることを報告している²⁵⁾。

すなわち、その報文によると 18・0・1、7・5・2 および 9・0・2 型高速度鋼を試作し、焼入後焼もどし処理の段階で NH_3 の中に過熱水蒸気を 0~100% 添加したふん囲気を用い、520°C で 1 時間酸窒化処理を行った。図23はその一例として 18・0・1 型高速度鋼を処理したときの表面層の状態を示したもので、表面から酸化物層、酸素と窒素が共存する酸窒化層および窒素の固溶層からなっている。このうち最表面

の酸化は多孔質の薄いウスタイトと、合金元素として添加したW, Cr, Mo, Vなどを含む高密度のウスタイトの2相から成ることを認めた²⁵⁾。

つぎに、上述の処理を切削工具に応用した場合、その表面反応層の状態からみて、被加工材との間に起る凝着や溶着に起因する金属移着現象 (metal transfer) を抑制する効果があり、したがって切削性能の向上が期待される。図24は酸窒化処理した高速度鋼工具について通常の条件のもとで切削加工を行なったときの非処理鋼工具 (焼入、焼もどし処理のみ) に対する性能の比較結果を示したもので、約半数が30~70%向上していることが認められている²⁵⁾。このように切削性能の向上を目的とする切削工具の表面熱処理法としての酸窒化処理はきわめて有効な方法の一つに挙げられる。

なお、上述と類似な処理法を機械構造用炭素鋼および合金鋼に応用し、その耐摩耗性、耐焼つき性について検討したが、その結果はきわめて優れた性質を有することになることが明らかとなった²⁶⁾。

引用文献

- 1) M. M. Khrushchov and M. A. Babichev; ASME 19 (1964) 1.
- 2) M. M. Khrushchov; Proc. Conf. Lud. and Wear. London. Inst. of Mech. Eng., (1957) 655.
- 3) (社)日本潤滑学会第19期摩耗研究会摩耗試験データ収集報告, 昭50. 3
- 4) 高橋; 金属表面技術 25 (1974) 100.
- 5) B. Edenhofer; Heat Treatment of Metals 1 (1974) 23.
- 6) 竹内; 金属材料 15 (1975・3) 20.
- 7) 小川, 竹内; 東京都立工業奨励館報告 3 (1954) 61.
- 8) 遠藤, 福田, 井上, 高宮; 精密機械 37 (1971) 496.
- 9) 竹内, 浅見, 磯尾; 精密機械 41 (1975) 990. 竹内; 熱処理 16 (1976) 146.
- 10) 藤井, 片桐, 竹内, 千葉, 嵯峨; 日本金属学会誌 40 (1976) 360.
- 11) E. Takeuchi, K. Fujii and T. Katagiri; Wear 55 (1979) 121.
- 12) H. Müller and O. Schaaber; Heat Treatment '73 (1973) 129.
- 13) R. Chatterjee Fischer and O. Schaaber; Heat Treatment '76 (1976) 27.
- 14) 佐藤; 熱処理 13 (1973) 2.
- 15) 新井, 藤田; 熱処理 15 (1975) 8.
- 16) 新井; 熱処理 13 (1973) 176.
- 17) 菊地; 金属材料 16 (1976. 12) 32.
- 18) R. F. Bunshah, A. H. Shabaik, R. Nimmagadda and J. Covy; Thin Solid Films 45 (1977) 453.
- 19) 山中; 金属材料 15 (1975. 7) 26.
- 20) B. Edenhofer and T. J. Bewley; Heat Treatment '76 (1976) 7.
- 21) D. J. Grieve; Heat Treatment '73 (1973) 163.
- 22) J. C. Gregory; Heat Treatment of Metals 2 (1975) 55.
- 23) 竹内; 日本金属学会誌 35 (1971) 671.
- 24) C. Dawes, D. F. Tranter and R. W. Reynoldson; Heat Treatment '73 (1973) 109.
- 25) Z. Rogalski, J. Wyszknwski, W. Pansiuk and J. Lampe; Heat Treatment '76 (1976) 21.
- 26) 竹内, 高橋; 未発表