

鉄鋼の摩耗に関する研究 (第2報)

(18Crステンレス鋼の表面処理層の耐摩耗性について)

中 野 行 夫

Wear of Various Steels (2nd Report) Anti-Wear Characteristics of Surface Treated Layer on 18Cr Stainless Steel

Yukio NAKANO

The effect of chromium plating and nitriding was examined on anti-wear characteristics of 18Cr-2Mo stainless steel. The steels of ring-shape were set as upper test specimens, lower ones being always of S45C. A constant compressing load of 50kgf was applied to the specimens, which corresponds approximately to an applied stress of 30kgf/mm².

The results obtained are summarized as follows : although the chromium plated layer is found to be fairly effective on anti-wear characteristics of the steel, so called nitriding is not so effective because of its short time treatment. As the chromium plating and nitriding may sometimes form micro cracks on the specimen surfaces, spalling of the specimens tends to occur during the wear test. These cracks are thought to be due to rapid heating and cooling during the nitriding process.

Accordingly it is concluded that the most important is to examine thoroughly the best condition for the chromium plating and nitriding, especially for improving proper adhesion of the plated layer to the steel substrate.

1. ま え が き

さきに著者は、SI5CK, S45C および Fe-18Cr-2Mo 鋼の硬貨 Cr めっきを施した場合のアプレシブ摩耗形態についての予備的研究に関する報告を行った^{*)}。その結果によれば、S45C や Fe-18Cr-2Mo 鋼に対しては、Cr めっき層の効果は幾分認められるが、めっき層が1~10 μ 程度では、めっき層が剥離するために測定値がばらつき、摩耗量が大きくなり、あまり良い結果が得られなかった。

*)本報は前報 (鉄鋼のアプレシブ摩耗に対する Cr めっき層の効果) と題目が若干異っているが、実質的には同様であるから、前報に続く第2報とする。

この原因としては(1)硬いめっき層の厚さが1~10 μ 程度では硬いフラタリーシリカサンド粒子(主成分SiO₂)による激しいアブレイブ摩耗と,(2)Crめっき層/鋼素地界面の剝離による摩耗量の増大が挙げられる。つまり鋼の摩耗抵抗を向上させるためには、その表面のめっき層の性状ばかりではなくて、めっき層/素地界面の密着度を良くすることも重要な因子と考えられる。

一般にステンレス鋼の耐摩耗性に関する研究は比較的少ないが、今後ステンレス鋼がその用途を広げるに従って、油田、海水中で使用される場合、耐摩耗性が問題になり得ることを考慮して、本研究においては、材料としては前報¹⁾と同じFe-18Cr-2Mo鋼を選んだ。この試料表面にCrめっき(厚さの目標値10~20 μ)を施し、さらにめっき層の性質を改善する1つの試みとしてこれをN₂-H₂雰囲気中で短時間、窒素拡散処理(以後窒素処理という)をして、形成されると思われる窒化クロムの硬化層によっ摩耗抵抗が増大するかどうかを検討した^{*)}。

2. 実験方法と試料

2. 1 摩耗試験機

本研究では前報¹⁾において使用したアムスラー型摩耗試験機を用いた。これは幾分古くて、試料の回転が円滑でない場合もあったので、今回は歯車装置を修理、改善して、摩耗条件が一定になるようにした。

この試験機は電源200V, 60Hzの場合には下部試験片は208rpm, 上部試験片は189rpmで回転するので、同一直径の試験片の場合には、常に約10%のすべりを含んだ、ころがり摩耗を行うことになる。そこで上部、下部試験片相互の直径を変化させることによって、種々の割合のすべり摩耗を含んだ、ころがり摩耗の条件を作ることができる。

2. 2 試料

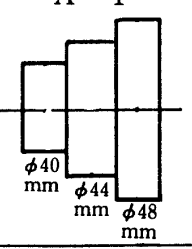
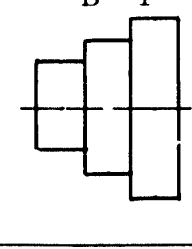
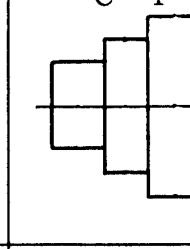
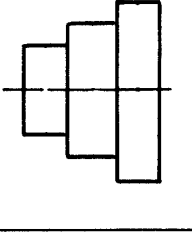
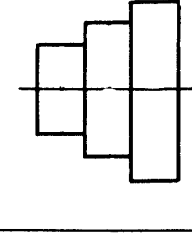
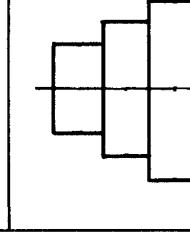
本研究に用いた試料(上部、下部試験片)の化学成分は表-1に掲げたとおりで、下部試験片は常にS45Cで直径40mm一定とした。また上部試験片の試料番号と、それに対応する表面処理条件を表-2に示した。すなわち、例えば18Crステンレス鋼をCrめっきの有無と厚さによってA, B, C系統に分け、これを窒素処理の有無でさらにA-1, A-2などに区分した。これらの系統はすべて3種の直径の異なる試験片($\phi=40, 44, 48$ mm)2個を作製して、摩耗試験に供したが、摩耗量は2個の平均値を採った。

表-1 試験片の化学成分 (wt%)

試料 \ 成分	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Fe-18Cr-2Mo	≤0.120	≤1.000	≤1.000	≤0.040	≤0.030	16.00~ 18.00	1.750~ 2.500
S45C	0.420~ 0.480	0.150~ 0.350	0.600~ 0.900	≤0.030	≤0.035	—	—

^{*)}処理後の試料表面の検討によって、このN₂-H₂雰囲気ではNが活性化せず、十分な窒化が起っていないことが判ったので、正確な意味では窒化処理とは言えないと思われるので、一応「窒素処理」としておく。

表-2 18Cr 鋼試験片の表面処理条件

記号 表面処理	A (Crめっきなし)	B (Crめっき 目標値10 μ)	C (Crめっき 目標値20 μ)
1) 窒素処理 (1100 $^{\circ}$ C \times 10min)	A-1 	B-1 	C-1 
2) 窒素処理 なし	A-2 	B-2 	C-2 

上下試験片ともに、あらかじめ表面を6S程度まで研削加工して、上部試験片だけにCrめっき、つづいて窒素処理を行った。その形状と寸法を図-1に示したが、詳細については前報¹⁾を参照されたい。

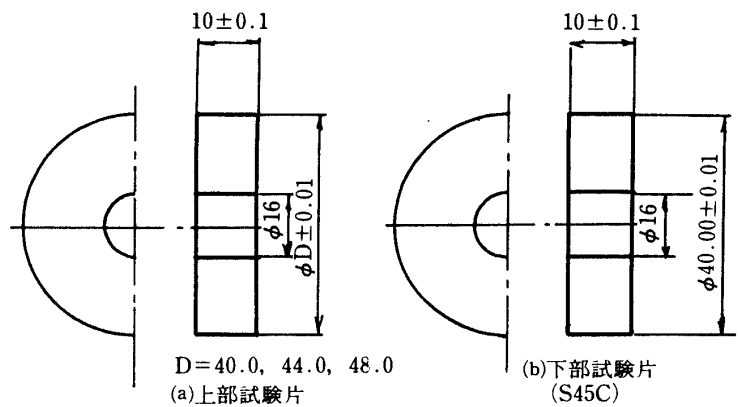


図-1 試験片の形状と寸法（単位 mm）

2. 3 実験方法

摩耗試験における試験片の組み合わせは、例えばA-1系統については図-2に示すとおりである。

18Cr ステンレス鋼のCrめっきは表面の酸化皮膜を除去するために、まずカソード還元処理を行った後、水洗、乾燥して行った。そのめっき条件を表-3に示した。

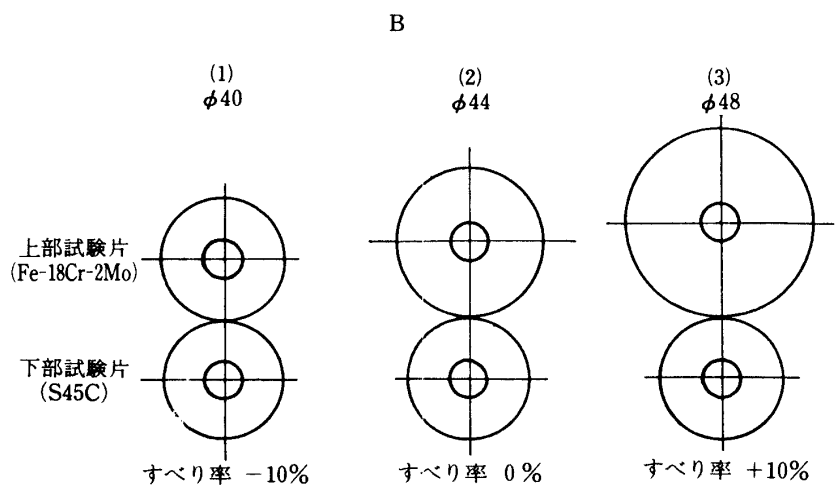


図-2 A-1系統の試験片の組み合わせ（単位 mm）

表一3 硬質Crめっき条件

めっき液組成 (g/l)	液温 (°C)	電流密度 (A/dm ²)	電流効率 (%)	有孔数
CrO ₃ : 250, H ₂ SO ₄ : 25	20~30	6.3	約30	少

Crめっきした表面に対する窒素処理はN₂+H₂雰囲気中で行った。その処理条件は1100°C×10minとした。通常の窒化時間は数時間乃至数十時間と処理時間が長い²⁾のに比較して、本研究の処理時間は10minと極めて短い。これは万一窒化が十分に行われずに、高温加熱による焼鈍、軟化のみが起こって、耐摩耗性が却って劣化することも考えられるので、少しでもこの悪影響を除くために、Cr, Nの拡散速度が大きい1100°Cと高温にして、窒化物の形成を容易にする一方で、加熱によるめっき層の軟化を防ぐように処理時間を10minと短くした。

さて、さきに述べたとおり、上下試験片の回転数をそれぞれ189rpm, 208rpmとするので、上部試験片は直径が大きくなると、その周速も増大する。直径40mmの試験片では、すべり率は-10%, φ44mmでは0%, すなわち、ころがり摩耗だけになる。またφ48mmでは+10%となる。ここで+, -の符号については上部試験片が下部試験片に対して、相対的に回転方向にすべっている場合を+, その逆を-とする。接触荷重は50kgf一定とした点以外は試験片の取付け方法などは前報と同様である。接触荷重によって試験片に生ずる応力σの概算値はつぎのヘルツの式(1)から算出すると、上部試験片の直径φ=40mm, 44mm, 48mm, 下部試験片の直径φ=40mmに対して、それぞれσ≒30.28, 29.52, 28.85kgf/mm²を得る。

$$\sigma = 0.418 \sqrt{\frac{P \cdot E}{\ell} \cdot \frac{r_1 + r_2}{r_1 r_2}} \quad (1)$$

ここでP: 荷重 (kgf)

E: ヤング率 (kgf/mm²)

ℓ: 試験片の巾 (mm)

r₁, r₂: 接触試験片の直径 (mm)

すなわち、本実験条件ではσ=29~30kgf/mm²程度であって、この応力値はS45C, 18Crステンレス鋼(引張強さ約50~70kgf/mm²³⁾に対しては、それぞれの降伏強さに近い値で、かなり苛酷な摩耗条件である。しかし前報と異なり、本実験ではシリカサンドを加えていない点を考慮して、前報の荷重20kgfから50kgfに改めた。

3. 実験結果とその考察

3.1 摩耗量とすべり率、回転距離との関係

さきに述べたように本実験方法では、直径40mm以外の試験片には、ころがり接触とすべり接触が同時に行われる。一般に摩耗の進行過程は図一3で示されることが多く^{4,5)}、ころがり接触による摩耗は接触圧力がある限度以上で、繰り返し接触回数が約10⁶回程度に達すると表面に微小き裂が発生し、これが次第に成長してまだら状にえぐられて摩耗量が急増するので、まだら摩耗

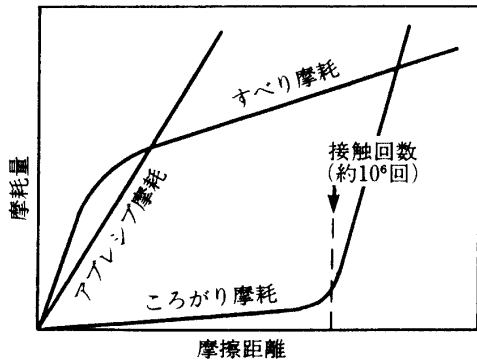


図-3 摩耗の進行過程

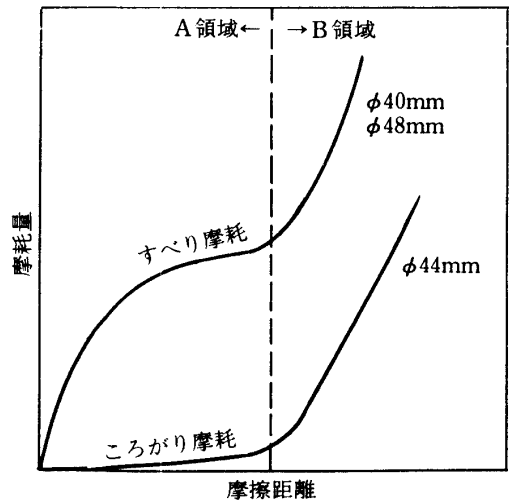


図-4 本試験による試験片の摩耗量と摩擦距離の関係(推定)

(pitting)といわれる。しかし潤滑油を用いないころがり接触では表面が摩耗して除去されるために疲労が起こりにくくて、この種のまだら摩耗は生じない。

本実験においては、試験片直径 $\phi = 44\text{mm}$ ではすべり率 0%, $\phi = 40\text{mm}$, 48mm ではすべり率がそれぞれ -10%, +10% であるから、図-3 の代表的な摩耗曲線から判断して、 $\phi = 44\text{mm}$, 40mm , 48mm の試験片の摩耗量は摩擦距離または摩擦時間に対して図-4 のようになるものと思われる。すなわち摩擦初期の A 領域では、すべり摩耗が主役であるが、B 領域では次第にころがり摩耗が主役となるはずである。

本実験結果の一例として A-1, A-2 系統試料の摩耗量 (試験時間, 7 hr) とすべり率との関係を図-5 に示した。摩耗量はすべり率 0% で最小で、すべり率が (+), (-) で増大するに従って著しく増大することは前報¹⁾と同じである。すべり率 0% ですべての試験片の摩耗量が極めて小さいことから、本実験の測定時間内での摩耗は図-4 の A 領域にあるものとして説明される。確かに摩耗量と摩耗距離との関係は極めて定性的には図-4 の傾向に一致している。

また 18Cr ステンレス鋼素地表面を直接窒素処理した場合 (A-1) と、しない場合 (A-2) との摩耗量は図-6(a), (b) に見るとおりである。摩耗量の急増は表面層の「剝離」に基づく場合があつて一定しないが、(a), (b) には大差が認められないことから、窒素処理の耐摩耗性に対する効果は小さい。

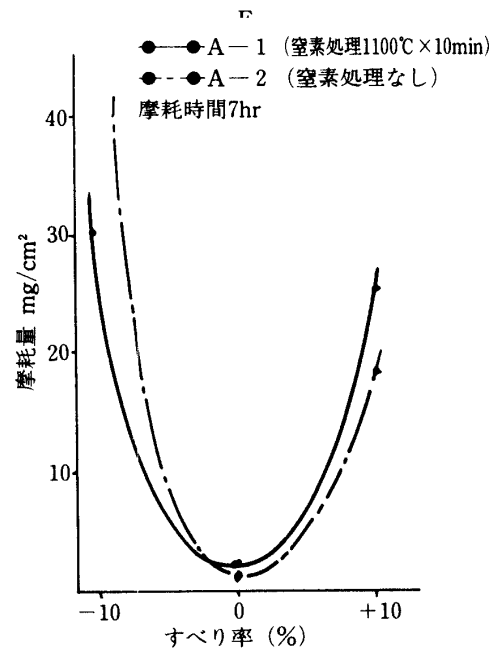


図-5 試料 A-1, A-2 の摩耗量とすべり率の関係

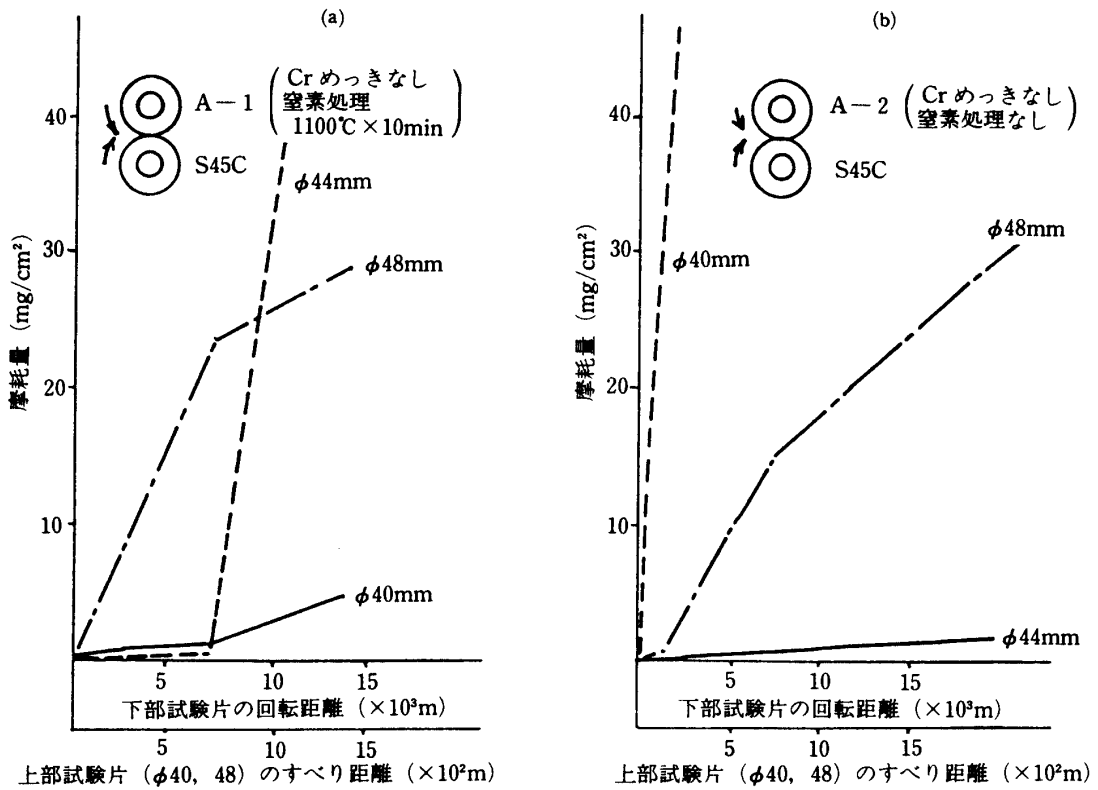


図-6 試料A-1, A-2の摩耗量と回転距離, すべり距離との関係

F

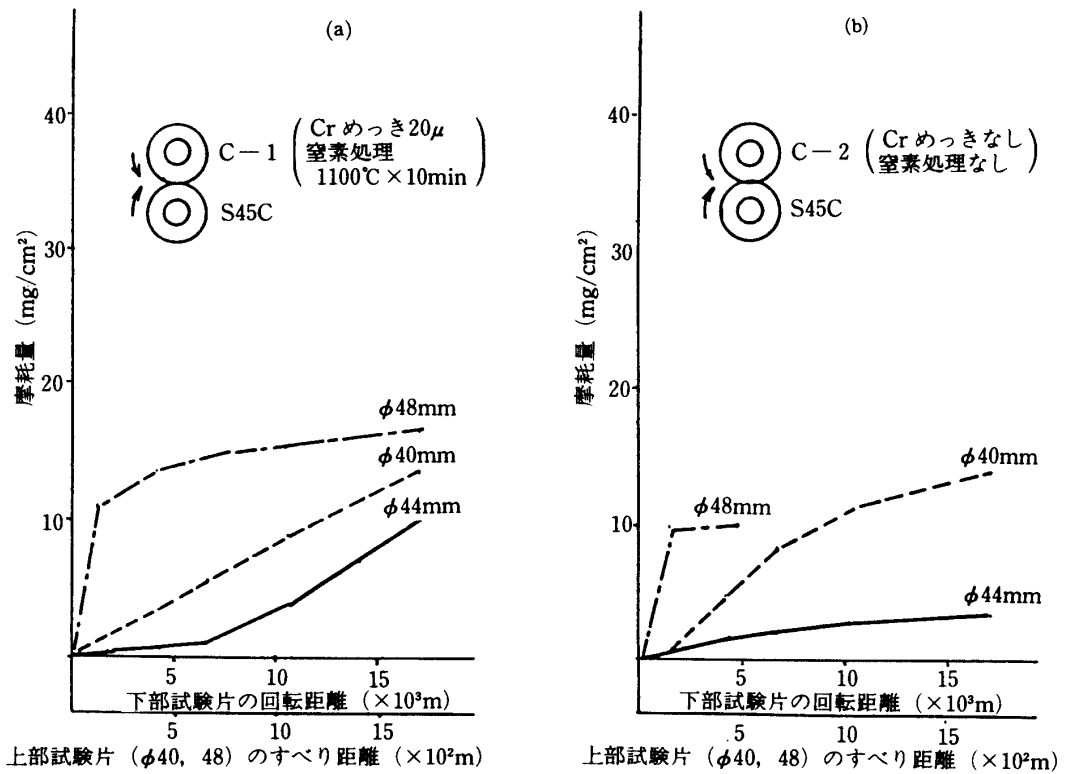


図-7 試料A-1, A-2の摩耗量と回転距離, すべり距離との関係

これに対してCrめっき層（厚さの目標値 20μ ）に窒素処理した場合（C-1）と、しない場合（C-2）の同様な関係を図-7(a), (b)に示した。

この結果によれば、両者の摩耗量には大差がない。すなわち窒素処理の耐摩耗性に対する改善効果はほとんど認められず、むしろ硬質Crめっき層による改善効果の方が大きい。

しかし、Crめっきをした試験片でも、摩耗量が極めて大きい場合があり、後述するように、これは多くの場合、試験途中での摩耗表面の「剝離」に基づくものであることが判る。

3. 2 Crめっき層の性状と耐摩耗性との関係

そこで試験片のCrめっき層の性状と耐摩耗性との関係について検討するために金属組織と硬さおよび成分の分布状態を検討した。たとえば写真-1にC-1試料のCrめっき層/素地境界付近の組織を示した。このCrめっき層は厚さが約 150μ に達しており、目標値 20μ より遙かに厚い*)。さらに図-8のA, B, C各部分の硬さを測定すると表-4に示すようになる。

すなわちCrめっき層は硬化しているが、窒素処理による硬化は認められず、むしろ軟化する傾向にある。これは写真-2に見るように、窒素処理によって浸透、拡散するものと思われる窒素

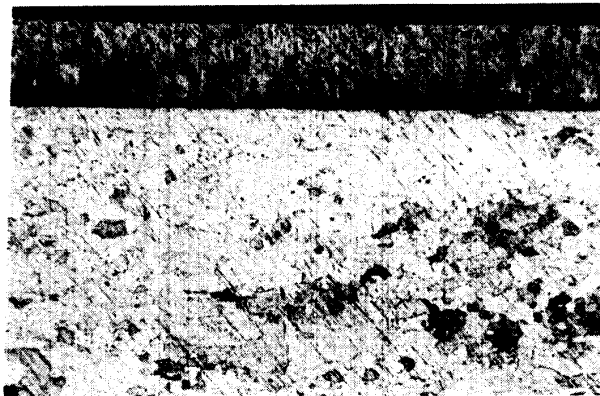


写真-1 試料C-1のめっき境界付近の組織 ($\times 100$)

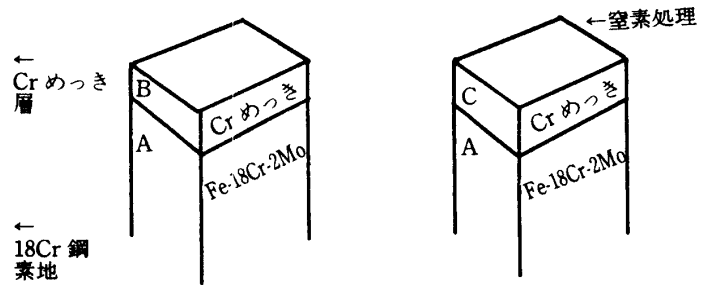


図-8 硬さ測定位置

表-4 試験片各部の硬さ

試験片番号	測定位置	硬さ (H_v)
A-2	A (素地)	181.8
C-2	B (Crめっき層)	825.1
C-1	C (窒素処理層)	520.7



写真-2 試料B-1のCrめっき表面のEPMAによる窒素の分布状態

*)めっきを行うに当たって対極を平板にしたため、極間距離が一定でなくなって対極に近い部分では厚く、遠い部分では狭くなる傾向を生じたものと思われる。



写真-3 試料B-1のCrめっき層の窒素処理後の割れ (×400)

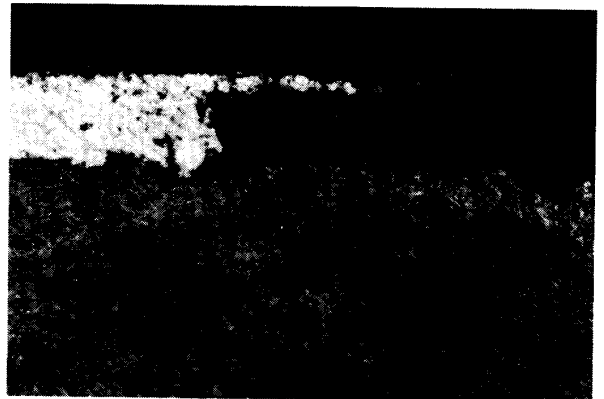


写真-4 試料C-2の摩耗試験後の表面

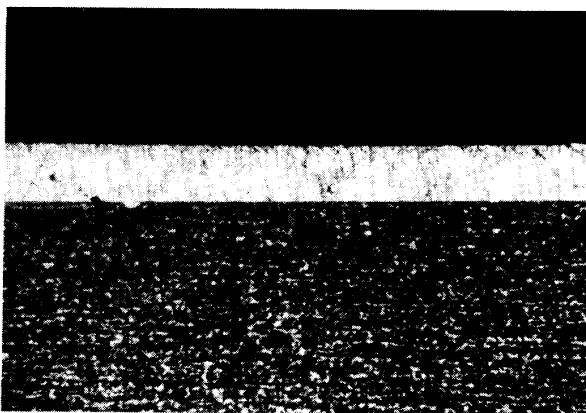


写真-5 試料C-1の摩耗試験後の健全な表面部分

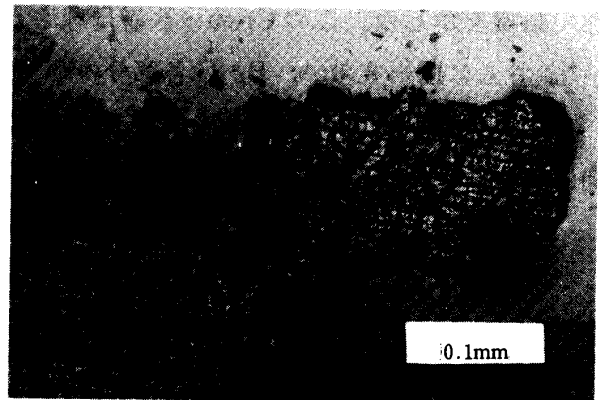


写真-6 はく離粉末

の分布量が極めて少ないことから、硬質の窒化物は形成されていないと判断されることからも理解できる。すなわち、さきに述べたとおり、窒素処理によって硬化するよりは、むしろ、1100℃に加熱することによって起こる焼鈍、軟化の効果が大きいことを物語っている。

硬質Crめっき層には、めっき直後にも表面に微小な割れが認められるが、さらに窒素処理を行うことによっても、表面に無数の割れを発生しやすいことは写真-3によって明らかである。この原因としては、高温加熱と、冷却によるCrめっき層/素地間の熱膨張係数の相違によることが考えられる。

このように窒素処理に基づく窒化物の生成による硬化の効果よりは、むしろ割れ発生のような耐摩耗性に対する悪い影響を生ずるために、前述のとおり、窒素処理した試験片の摩耗量が大きくなるものと判断される。

確かに試験中に「剝離」した試験片の表面には、写真-4に見るように広い範囲にわたって欠落が認められる。これは、ころがり摩耗に生じやすい微小亀裂からの pitting (まだら摩耗) としては、損傷の範囲が広すぎるように思われる。これを摩耗試験後の表面が比較的健全な状態を保っている試料C-1の場合(写真-5)と比較すると、両者の相違がよく判る。

この摩耗による表面の「剝離」後の摩耗粉を集めて上部から撮影した写真-6に見るとおり、

粉末は、粉末というよりは塊状で、割れによって剝離したことが明らかである。

以上の結果から18Crステンレス鋼の耐摩耗性に対するCrめっき層の効果はかなり顕著に認められるが、めっき層に「き裂」を発生して「剝離」しやすい欠点があるように思われる。また窒素処理の効果については、処理時間が短かすぎたために窒化物が形成されず、硬化すよりも、むしろ高温加熱と冷却によって軟化と割れを生じやすい。これが摩耗試験中に生じる表面剝離を助長する原因になるものと判断される。

したがって、Crめっき層が「剝離」しないように素地ステンレス鋼のめっき前処理、すなわち表面酸化被膜を完全に除去して、めっき層と素地との密着性を向上させることが最も重要である。

また窒化処理については処理温度、時間などに関する最適条件を選定する必要があると思われる。

4. 結 言

18Cr-2Moステンレス鋼表面にCrめっき（厚さ 20μ ）と窒化処理（ $1100^{\circ}\text{C}\times 10\text{min}$ ）を施した直径の異なる上部試験片をS45Cで作った下部試験片と組み合わせて回転させ、すべり摩耗とこがり摩耗を起こさせて、ステンレス鋼の耐摩耗性に対するCrめっきと窒素処理の効果を検討した。その結果つぎの結論を得た。

- (1) Crめっき層の効果はかなり顕著であるが、窒素処理の効果は短時間処理のため明白ではない。
- (2) Crめっきと窒素処理によって、試料表面に「き裂」を発生して、試験中に「剝離」しやすい欠点がある。これは、めっきによる微小割れ、窒素処理に伴う高温加熱、冷却による軟化と割れなどによるものと思われる。
- (3) したがって、今後の課題としては、Crめっきの前処理、特に表面皮膜の除去による密着性の向上と、窒化の最適条件を検討することが重要である。

終わりに本研究を行うに当って終始ご援助賜わった本学大谷南海男教授、菊川真教授、反射電子線像の撮影にご協力下さった本学北山誠二講師や、実験をご援助下さった本学学生藤井裕治、山内和也、山口昌之および湯浅光の諸君に対して厚くお礼申し上げる。また試料と種々の便宜を提供された日新製鋼株式会社周南研究所、研究室長吉井紹泰氏、大橋秀次氏、日本冶金工業株式会社中央技術研究所次長根本力男博士に対しても深く感謝の意を表したい。なお本研究は福井工業大学特別研究費の援助によって行われたことを付記して、心からお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 中野行夫：福井工業大学研究紀要15号（1985）p.85
- 2) 大谷南海男：金属表面工学（1962）日刊工業新聞社，p.252
- 3) 松永陽之助：ステンレス鋼耐熱合金（1963）誠文堂新光社，p.45
- 4) 日本学館振興会，鑄物第24委員会鑄鉄分科会：“鑄鉄の摩耗と材料特性”（1984）p.3
- 5) 沢本章ほか：九州大学工学集報，56巻 5号（1983）p.649