

技術論文

革新的超硬系サーメット溶射技術の開発

— 溶射ロールによる調質圧延実験結果 —

Development of Innovative Thermal Spraying Technology of Tungsten Carbide Cermet
— Experimental Results of Thermal Sprayed Rolls Applied to Skin Pass Rolling —

溶接溶射技術開発室

加藤 治

Osamu Kato

溶接溶射技術開発室

尾崎 健一

Ken-ichi Ozaki

溶接溶射技術開発室

洲崎 真二

Shinji Suzaki

溶接溶射技術開発室長

吉村 武憲

Takenori Yoshimura

要 旨

製鉄プロセスロールなどに広く普及が進行している溶射皮膜は剥離しやすいという短所があるために、適用範囲が制限されることが多かった。中でも比較的密着性が高いといわれる超硬 (WC) 系サーメット皮膜ですらクロムメッキのように、圧延ロールにまで適用されることはなかった。

そこで筆者らは、既に冷延ロールに用いられている硬質クロムメッキ膜の密着性を目指して溶射技術開発を行い、今回実験室調質圧延ロールによる圧延実験を行った。その結果、1000パスを越える圧延を行っても皮膜剥離は全く発生せず、密着性がクロムメッキと同等であることが確認された。

今後は圧延ロールのみならず、従来の溶射が使用できなかった高面圧を受けるプロセスロールにも実機適用を図り、性能の確認と必要あらば改善を行っていく。

Synopsis:

Due to the defect that thermal sprayed coatings are easily peeled off which are now being used in the processing rolls of steelmaking, its applicability has been frequently restricted so far. Above all, even the coating of tungsten carbide cermet which is said to have a relatively high adherence has not yet been applied to rolling rolls like a chromium plating.

Then the authors, aiming at the adhesive property equivalent to that of hard chromium plated coatings which have already been used in the cold rolling, carried out the development of thermal spraying technology and, at this time, rolling experiments using a skin pass rolling roll in the laboratory. As the result, it was confirmed that no peeling-off of the coating occurred, even when repeating its rolling exceeding 1,000 passes, and its adherence is equal to that of chromium plating.

From now on, its commercial application will be planned not only for rolling rolls, but also for higher stress bearing processing rolls which cannot be applied a usual thermal spraying, furthermore, confirming and, if necessary, improving its performance will be carried out.

1 緒言

溶射はそのプロセスがメッキとは異なるドライコーティングであることだけでなく、材料としてメタルからセラミックスまで広範な選択自由度があるという長所を有するために、実用化が現在進展しつつある表面改質技術である。とりわけ、サーメットの一種である超硬 (WC-Co) 系の溶射皮膜は、優れた耐摩耗性と近年開発された高速フレーム溶射法によれば比較的高い密着性が確保されることがわ

かり、製鉄プロセスロールなどのコーティングとして広く普及しつつある。しかしながら、接触面圧が高い場合には皮膜の剥離が発生することがあり、ましてや圧延ロールは適用の対象外とされていた。

圧延ロールは製鉄プロセスロールの中では最も高い負荷を受け、摩耗、肌荒れなどの表面損傷のために交換頻度が高いので、これまでに溶射を含めて種々の表面改質技術の適用が検討された。その結果、成功したのは硬質クロムメ

ツキのみである。すなわち、現在の表面改質皮膜の密着性はメッキのそれを越えられなかったのである。当然のことながら、密着性は皮膜の最も重要な性質であり、耐摩耗性など他の特性がいかに優れていてもこれが不十分では何の用も足さない。そしてその密着性は用途に応じて必要度が異なる。

本報告では、上述の超硬系の溶射について、既報¹⁾の評価法を活用して、溶射皮膜としてはおそらく極限まで密着性を高められる技術を開発したので、その圧延ロールへの適応性を調べた結果について述べる。調査の方法は、鋼板の実験室圧延機用ロールを、比較用のクロムメッキ法とともに試作して圧延により直接評価し、一方、耐摩耗性を同じく両材質についてころがりすべり方式の摩耗試験により比較した²⁾。

なお、ここでは圧延の種類を冷延鋼板の最終工程で行われる調質圧延（スキンパス圧延）^{3) 4)}に設定した。その理由は、この圧延が圧下率1ないし3%と比較的軽負荷であるので、最初の対象として最適と考えたからである。しかしそれでも、ロールが受ける最大接触応力は100kg/mm²以上、最大200kg/mm²程度にも達する。

調質圧延のワークロールは、交換頻度が数時間ないし数日と高く、種類も多いので、各製鉄所では多くの本数が保有されており、コスト的にもまた管理面からもかなりの負担になっている。ロールの種類としては表面仕上げ毎に、ブライト、スクラッチ、ダルの3種類があり、特にダルロールは表面粗さ低下（摩耗）の軽減のために、現在は大半がクロムメッキ処理されている。

2 実験方法

圧延ロールが受ける平均的かつ定常的な接触応力による皮膜の耐剥離性は既報のころがり疲れ試験による評価で十分であると考えるが、板のかみ込み、尻抜けあるいはコイル継ぎ目部通過時などの衝撃応力、および板端部の集中応力などの、いわば非定常的な応力の影響はやはり圧延によらないと評価が難しい。そこで、圧延ロール表面にこの新しい溶射を行い、Table 1に示す実験室圧延機を用いて圧延実験を実施した。この装置は切り板圧延方式であるので、あらかじめ数10枚の切り板を準備し、一定の圧下率で繰

り返しそれらを圧延して溶射皮膜の剥離などの異常有無を観察することにした。実験した1日間の総計パス数は1,188および1,010であるので、コイル本数でも同数に相当すると考えられる。

実験は2回行い、それぞれの実験条件はTable 2、3の通りである。第1回の圧下率はすべて1%であるが、2回目は3%、5%、そして最後は調質圧延ではほとんどあり得ない8%まで上げた。なお、圧下率の設定はここでは板厚でなく、板長さによった。すなわち、1%の圧下とは板長さ500mmが505mmに延びることである。

Table 2 Detail of tested rolls (Top and bottom work roll)

Items	First experiment	Second experiment
Coating material	WC-12Co and chromium plating	WC-12Co and WC-NiCr
Thickness of coating (μm)	150 and 10	Both 150
Surface roughness ($\mu\text{m Ra}$)	3 and 1.5	Both 2

Table 3 Rolling conditions

Items	First experiment	Second experiment
Material of rolled sheets	Cold rolled and annealed carbon steel	(Same to first experm.)
Size and number of sheets(mm)	1. 0.67×180×500 35 2. 0.73×180×500 23	0.80×180×500 80
Pass number and reduction of thickness (%)	1. → 30pass, 1% 2. → 6Pass, 1%	50sheets→14pass, 3% 30sheets→10pass, 5% 10sheets after 14pass, 3% reduction→1pass, 8%
Rolling speed (rpm)	10.5	10.5
Lubrication	10% Emulsion of mineral oil	(Same to first experm.)
Rolling length (m)	713	623
Revolution number of roll	2160	1890

ロールの種類は、第1回目が上ロールをメッキ、下ロールをWC-12Co、第2回目は上ロールをWC-12Co、下ロールをWC-NiCrとし、すべて表面仕上げは平均粗さで2~3 μm のダルとした。膜厚はメッキが10 μm 、溶射は150 μm である。

次に、圧延実験ではロールが摩耗するほど圧延距離が長くとれないので、別に、Fig.1に示すころがりすべり方式

Table 1 Detail of experimental rolling mill

Type	4 Hi skin pass mill
Power	Total 60kw
Dimension of work roll	ϕ 105×300 ϕ
Dimension of back-up roll	ϕ 310×300 ϕ
Maximum rolling force (ton)	120
Rolling method	Sheet rolling Max. size 3×200×500

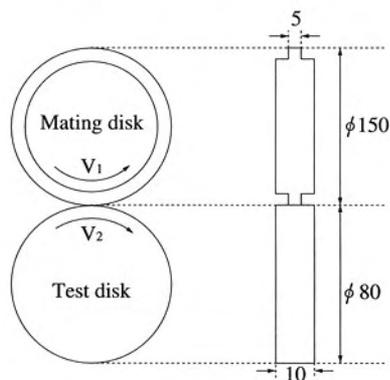


Fig.1 Method of wear test

の摩耗実験を行った。圧延ロールが受ける摩擦条件はこ
がりすべりであるので⁵⁾、相手片を炭素鋼で入手しやすい
S45Cとし、接触面圧294MPa、すべり率5%で、転動数6万
回までの表面粗さの変化を測定した。実験条件はTable 4
の通りである。

Table 4 Experimental condition of wear test

Test temperature	Room temperature
Material of mating disk	S45C
Max. contact stress (MPa)	294
Revolution speed (rpm)	500
Slip ratio (%)	5
Total revolution number	60,000
Lubrication	Water

3 実験結果および考察

3.1 圧延実験結果

圧延実験はFig.2のように、手作業で板を繰り返し圧延
機に通すのみで、目視によりロール表面の観察を続けた。

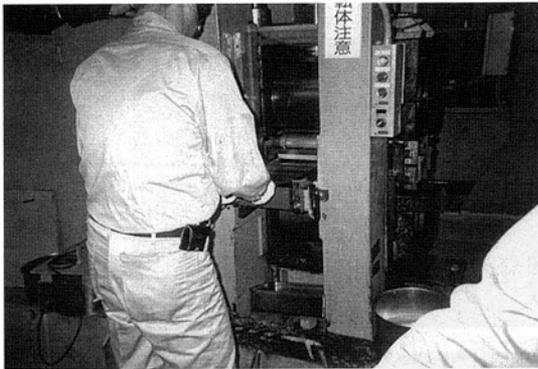


Fig.2 Circumstances of rolling experiment

実験状況は例えば、第1回の実験では最大で35枚の板
を各30回圧延したので、このときのパス数は1,050、板長
さは当初の500mmから最後に675mmまで伸び、第2回で
は最初に50枚の板を圧下率3%で各14回圧延して700パス、
同じく500mmが816mmとなった如しである。

圧延荷重は、圧下率1%のときには初期には15ton程度、
その後続く30パスまでの末期には加工硬化により最大
20tonまで上昇した。圧下率3%では18tonから27tonまで、
また、圧下率8%では40tonに達した。圧延荷重が40tonの
場合、ワークロールとバックアップロールの間の、次式で
与えられるヘルツ接触最大応力Pmaxは146kg/mm²となる。

$$P_{\max} = 60.56 \sqrt{(p/\ell)(R_1 + R_2)/R_1 R_2}$$

ただし、ロールと板のヤング率はともに21,000kg/mm²
とし、pは圧延荷重、ℓは接触巾(ロール胴長)、R₁はワ
ークロール半径、R₂はバックアップロール半径である。

第1回実験後のロール外観はFig.3のように、いずれも
剥離などの異常はまったく認められなかった。第2回も同
様である。このことから、この溶射膜の密着性はクロムメ
ッキと同様に、圧延時の非定常応力にも十分耐え得るこ
とが明らかになった。

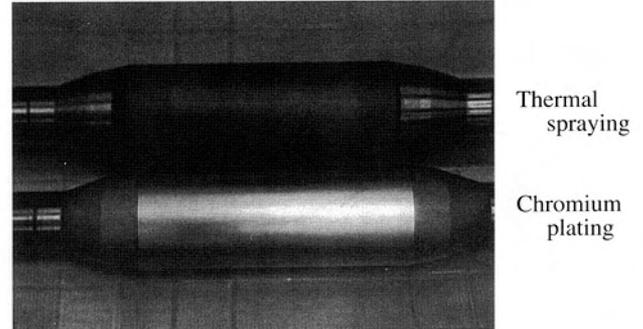
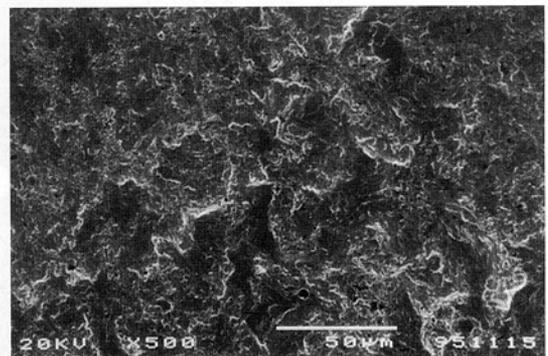
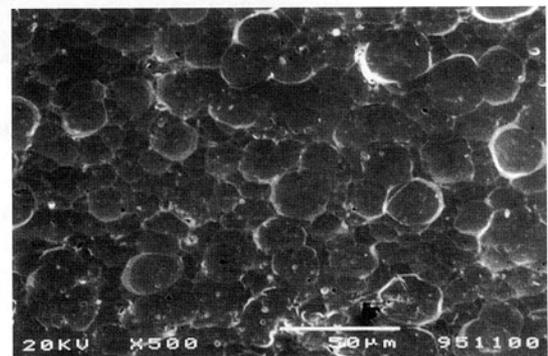


Fig.3 Appearance of test rolls after the first experiment

Fig.3で、溶射ロールの色がメッキに比べて黒ずんで見え
る。圧延された板も同様であったので、その表面をSEM
観察すると、Fig.4のように、表面構造、つまり凹凸の微
細な状況が両者で異なっていることがわかった。このよ
うな表面が板の2次加工性、すなわち、リン酸塩処理性⁶⁾、
プレス加工性、および塗装性⁷⁾に及ぼす影響については
今後の調査を待たねばならない。



(a) Rolled by thermal spraying roll



(b) Rolled by chromium plating roll

50 μm

Fig.4 SEI of rolled sheet surface

3.2 摩耗実験結果

摩耗試験結果をFig.5に示す。試験片の転動数とともに表面粗さが低下する速度はメッキに比して、溶射は数分の1と小さい、すなわち、耐摩耗性がかなり優れていることがわかる。

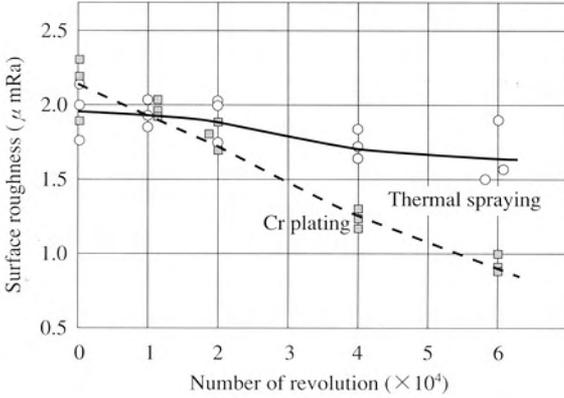


Fig.5 Decrease of surface roughness

硬質クロムメッキを冷延ロールに適用すると、表面粗さの低下速度がメッキなしの通常の鍛鋼に比べて7分の1以下になるといわれているが⁸⁾、これを溶射にすればさらにその数分の1以下になることがこの結果から予測される。

この溶射皮膜の粗さ保持性は、その形成が粉末の集積によるからではないか、つまり、粉末粒子が欠け落ちることによるのではないかとこの憶測を確かめるために、試験片の摩耗表面を観察した。すると、Fig.6のように欠け落ちの跡はなく、メッキと同様に接触面凸部から順次平滑になり、かつ、すべり方向にひっかき痕が見られることから、溶射皮膜の摩耗もメッキと同じアブレーションであると推測される。

3.3 皮膜形成過程の考察

上述のような優れた特性を有する皮膜はどのように形成されるのかを考察するために、個々の溶射粒子の基材表面への衝突状態を観察した。基材をSS400として1パスのみ溶射後の表面をFig.7に、また断面をFig.8に示す。これらから、この粒子は従来の溶射のようなスプラット形成⁹⁾はほとんど見られないこと、すなわち粒子の融解はなく、固体

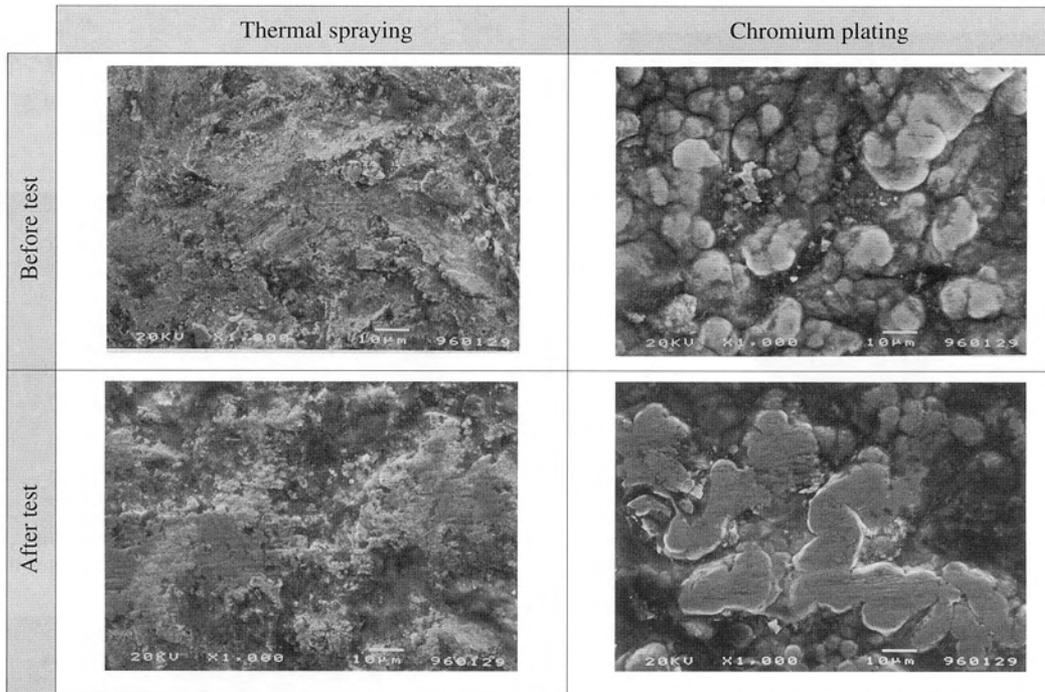


Fig.6 Surface of test disk before and after wear test

10 μm

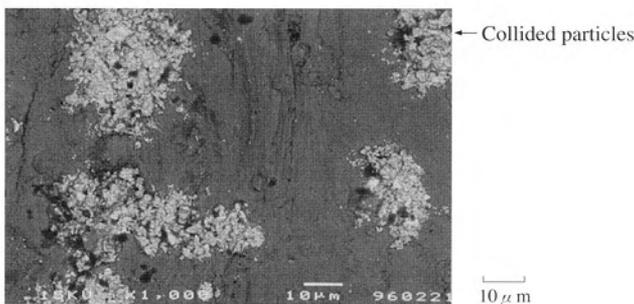


Fig.7 Thermal spraying particles after colliding with substrate (Top view)

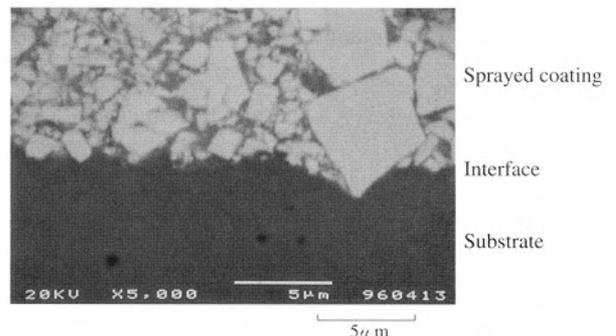


Fig.8 Cross section of collided particles

5 μm

のままで基材に打ち込まれていて、断面からは特に、1ないし5 μ mの大きさの白く角張って見えるWC粒子が基材に最大数 μ m程度食い込んでいることがわかる。このような界面構造は従来の溶射膜には見られないことから、これが高い密着性の原因の一つになっているものと推測される。

また、膜の組織は従来溶射膜の層状ではなく、焼結超硬に類似の緻密な構造をしている。これらは粒子の温度と速度を最適に制御することによって得られるものである。

4 結言

溶射皮膜の密着性の新しい評価法¹⁾を活用して革新的な超硬(WC)系溶射を開発した。これを初めて圧延ロールに適用し、調質圧延実験と摩耗実験を行って次の結果を得た。

(1) 実験室圧延において皮膜剥離は発生しないことから、皮膜の密着性は硬質クロムメッキとほぼ同等であり、調質圧延ロールにも適用が可能であると推測される。

(2) この耐摩耗性をころがりすべり摩擦における表面粗さの低下速度で評価すると、クロムメッキの数倍程度優れている。

(3) このような革新的皮膜は、溶射粉末の温度と速度の最適制御により得られる。

今後は、この実験室で得られた結果を実機で確認するとともに、実用上の問題点把握と改善を図る。かつ、対象を圧延ロールのみならず、これまで皮膜剥離のために溶射が適用できなかった製鉄プロセスロールまで拡げて、ロールの耐久性向上に伴う省力化とコスト節減に貢献していく。

参考文献

- 1) 加藤 治, 尾崎健一, 洲崎真二, 吉村武憲: フジコー技報, No.3(1995), p.5
- 2) 加藤 治, 尾崎健一: 材料とプロセス, 9(1996), No.2, p.362
- 3) 鉄鋼製造法, 日本鉄鋼協会編, 丸善, (1972), p.703
- 4) 山下道雄: 塑性と加工, 36(1995)-417, p.1116
- 5) 加藤 治: フジコー技報, No.2(1994), p.51
- 6) 例えば, 梅原誠一郎, 盛谷喜夫, 松島安信: 鉄と鋼, 68(1982), p.720
- 7) 例えば, 角山浩三, 今中 誠, 古川九州男, 岸田 朗, 山田恭裕: *ibid.*, 75(1989), p.2090
- 8) 出石智也: 塑性と加工, 32(1991)-363, p.458
- 9) 谷 和美, 原田良夫, 李 長久: 日本金属学会誌, 59(1995), p.1130

