

放電表面処理による圧延ロールへの TiC コーティングの成膜特性および耐摩耗性評価

Evaluation of Coating and Wear Characteristics of Roll Surface Coated with TiC by Electrical Discharge Coating

植野 雅康 UENO Masayasu JFE スチール スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部 主任研究員 (副部長)
藤田 昇輝 FUJITA Noriki JFE スチール スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部 主任研究員 (課長)
木村 幸雄 KIMURA Yukio JFE スチール スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部 主任研究員 (副部長)・博士 (工学)

要旨

薄鋼板の表面テクスチャーはプレス成形性や塗装後鮮映性等に大きな影響を与える。表面テクスチャーの制御は、調質圧延においてロール表面テクスチャーを鋼板に転写させることで行われるが、実生産ではロール摩耗による表面テクスチャーの変化が問題となる。これに対してロール摩耗を抑制する新たな技術として、放電表面処理法の適用を検討した。TiC 焼結体電極を用いた放電表面処理によって、圧延ロール表面に TiC 硬質皮膜を形成し、電気加工条件に対する皮膜特性および耐摩耗性を調査した結果、従来用いられている硬質クロムめっきより優れた特性を有することを明らかにした。

Abstract:

The surface texture of a steel sheet exerts a considerable effect on sheet press formability and image clarity after coating. Temper rolling is one of the key processes for determining the surface texture, because the final procedure is printing using an appropriate work-roll surface. To carry out stable control of the surface texture by temper rolling, it is important to maintain the topography of the roll surface and increase the roll service life for industrial use. In this study, electrical discharge coating is applied as a means of improving the wear resistance of the roll surface. First, characteristics of the film coating made by electrical discharge coating using a TiC sintered electrode are investigated experimentally. Then, the influence of the electrical machining conditions on the film thickness, hardness, and surface roughness is evaluated and discussed. Furthermore, a rolling experiment is conducted and the wear resistance was evaluated by comparison with a film fabricated by the conventional hard chromium plating method.

1. はじめに

薄鋼板の表面形態は製品品質に大きな影響を与えることが知られている。特にプレス成形に用いられる冷延鋼板や表面処理鋼板では、プレス成形時の金型との界面において潤滑油を保持するため、潤滑油の保持性に優れた表面テクスチャーを付与しておくことが要求される。また塗装後の鮮映性が要求される場合には、長波長の凹凸を除去しておくことが重要であるとされている^{1,2)}。

実際の鋼板表面テクスチャーの制御は最終工程となる調質圧延においてロール表面テクスチャーを鋼板に転写させることで行われる。しかし転写機構は必ずしも明らかにはされておらず、圧延ロール表面の被圧延材への転写挙動を含めたマイクロ変形解析に関する研究も盛んに行われており、圧延条件の影響などが調査されている^{3,4)}。

工具の観点からはロール表面の加工方法として従来のショットブラスト加工に加えて、放電ダル加工、レーザー加工、電子ビーム加工などが開発され、製品品質を向上できる規則的な表面テクスチャーの形成も可能になってきている。しかし、実生産においては摩耗による表面テクスチャーの変化が問題となる。

摩耗抑制手段としては、硬質クロムメッキ^{5,6)}や PVD による炭窒化物の表面コーティング⁷⁾といった表面改質技術の適用が検討されている。PVD は Hv2000 程度の非常に硬い皮膜を形成できるが、圧延ロールのような大型部材を処理するためには、装置の導入コストが極めて高価となるため、現状は Hv1000 程度の硬質クロムメッキロールが用いられることが多い。

近年、上記の従来表面改質法の課題を補う新たな技術として放電表面処理が注目されている。放電表面処理は、放電加工の技術をベースとし、液中で電極と工作物との間にパルス状の放電を連続的に発生させ、そのエネルギーによ

り電極材料を工作物表面に移行させる技術である。毛利らの研究⁸⁾を初めとして多くの研究が行われており、TiC圧粉体電極を用いた場合にはHv2000のTiC皮膜が形成されることが報告されている⁹⁾。しかしその研究の多くは放電加工時の電極材質や加工液中への粉末添加、電気加工条件を変更した場合の膜厚や皮膜硬さといった基礎データを調査したものが多く¹⁰⁻¹³⁾、圧延ロールへ適用し、実際の摩耗挙動を調査した報告はSimaoら¹⁴⁾のみと少なく、それも表面改質無しのロールと比較したものである。

そこで本論文では放電表面処理法を圧延用ロールに適用した場合の電気加工条件による成膜特性の評価を行い、さらに圧延実験により、ロール表面粗さの低下挙動(耐摩耗性)を従来から広く用いられている硬質クロムメッキロールと比較した結果について報告する。

2. 放電表面処理による硬質皮膜形成

放電表面処理による硬質皮膜形成では、当初は炭化物を形成しやすいTiなどのバルク金属、あるいは圧粉体を電極とし、油中で工作物との間に放電パルスを加えることで、油から熱分解したカーボンと電極材料の反応生成物である炭化物を工作物表面に堆積させることを狙っていた。しかし至近では、炭化物を放電熱による化学反応によって形成するのではなく、炭化物を焼結した電極を用いて、放電加工によって直接工作物表面に形成させる技術が、電極の取り扱いや電極摩耗の制御性などに優れるため開発されている¹⁵⁻¹⁷⁾。図1に放電表面処理の模式図を示す。

調質圧延用ロールへの適用にあたっては、放電加工機の電極材質を変更することで表面粗さの付与と硬質皮膜の形成を同一プロセスで行える可能性がある。しかし、放電表面処理の電気加工条件は、通常のダル加工と異なり、硬質皮膜材料の供給源となる電極側の極性を、消費が大きくなる負極性とする。また図2で示される放電電流 i_e 、パルス幅 t_e 、休止時間 t_o といった電気加工条件を変更することで、形成される皮膜の膜厚、硬さ、表面粗さが変化するため、ダル加工で目標の表面粗さを確保しつつ、圧延にも耐えうる硬質な皮膜を均一に形成できるかが問題となる。

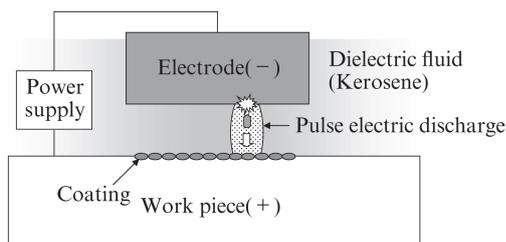


図1 放電表面処理の模式図

Fig. 1 Schematic diagram of electrical discharge coating

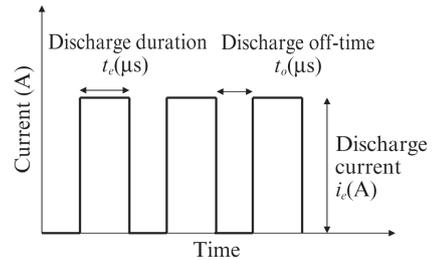


図2 放電加工時の電気加工条件の模式図

Fig. 2 Schematic diagram of electrical discharge condition

3. 電気加工条件による成膜特性変化

3.1 実験方法

調質圧延用ロールへの放電表面処理適用の可能性を評価するため、実際のロール材料に対して放電表面処理加工を実施した。ロールはSUJ-2 (2% Cr 鋼) 製の直径70 mmであり、鏡面研磨 (0.1 μmRa) したものをを用いた。電極は表1に示す熱物性値を有するTiC焼結体電極を使用した。放電加工機はEA12 (三菱電機製) を用い、加工液は灯油系を用いた。表2に電気加工条件を示す。極性は電極側を負極性とし、無負荷電圧を150 Vとし、放電電流 i_e を8~25 Aの範囲、パルス幅 t_e を8~100 μsの範囲で変更し、休止時間 t_o はアークスポットが発生しないようにデューティファクター (t_e/t_o) が0.05以下となるように設定した。またロールは20 rpmの一定速で回転させ、電極幅10 mmの領域 (加工面積で2190 mm²) を、時間10~60 minの範囲で加工した。

形成した皮膜の評価は、表面粗さ、膜厚、硬さの測定を行った。表面粗さは触針式表面粗度計を用いて、ロールバレル方向に測定長4 mm、カットオフ値0.8 mmで測定し、算術平均粗さRa及びピークカウントPPI (カウントレベル±

表1 電極仕様

Table 1 Specification of electrode

Material	TiC (Sintered)
Size	10 mm × 15 mm × 50 mm
Density	2.57 g/cm ³
Specific heat	0.54 J/g · K
Thermal conductivity	0.98 W/m · K

表2 放電表面処理における電気加工条件

Table 2 Condition of electrical discharge coating

Polarity	Work: (+) Electrode: (-)
Discharge current i_e	8, 16, 25 A
Discharge duration t_e	8, 20, 50, 100 μs
Machining area	2190 mm ²
Machining time	10, 30, 60 min

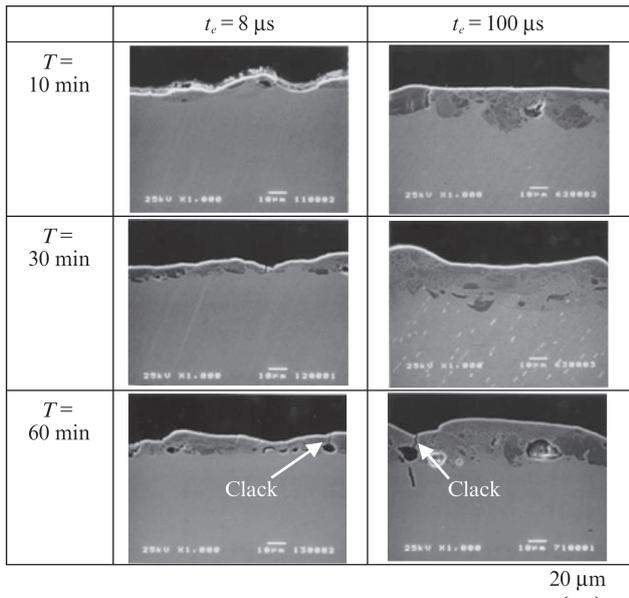


図3 断面SEM観察結果¹⁸⁾

Fig. 3 Cross sections of machined surface

0.625 μm) を算出した。膜厚は作成したロールから断面観察用のサンプルを切り出し、SEM観察画像から、幅方向位置20点の膜厚を求め、その平均値で評価した。また硬さは断面観察サンプルを用いて、マイクロビッカース硬さ計にて押込み荷重10gの条件で、表層からのビッカース硬さHvの分布を測定した。

3.2 実験結果

図3は放電電流*i_e*を25Aの一定とし、パルス幅*t_e*と加工時間*T*を変更したサンプルの断面SEM写真である。表面に電極材料が移行して形成された皮膜が確認できる。膜厚はパルス幅が長いほど大きくなっている。また加工時間に対する膜厚の変化は小さいが、加工時間の増加に伴い、皮膜へクラック等の欠陥が形成されている。

図4はサンプル表層からの硬さ分布の測定結果である。上段(a)は*i_e*及び*T*を一定としパルス幅の影響を見たもの、下段(b)は、*i_e*及び*t_e*を一定とし加工時間の影響を見たものである。表層から深さ5μm位置でのHvで1500以上の硬質皮膜を形成している。パルス幅が大きいほど硬さが高い領域が大きくなり膜厚が増加している。また同一の電気加工条件で加工時間のみを変更した場合には、膜厚、硬さともに変化しておらず、SEM観察結果とも整合性が取れている。

加工時間を増加しても皮膜厚や硬さが上昇しない理由は、以下が考えられる。放電加工では、放電アーク柱で陰極側の電位降下が陽極側に比べて大きく、陰極側表面では蒸発散逸が主体で生じ、陽極側では安定した放電溶融痕が形成される。放電表面処理では、これを利用して陰極側から散逸したTiCを陽極側で溶融したロール表面へ固溶させるこ

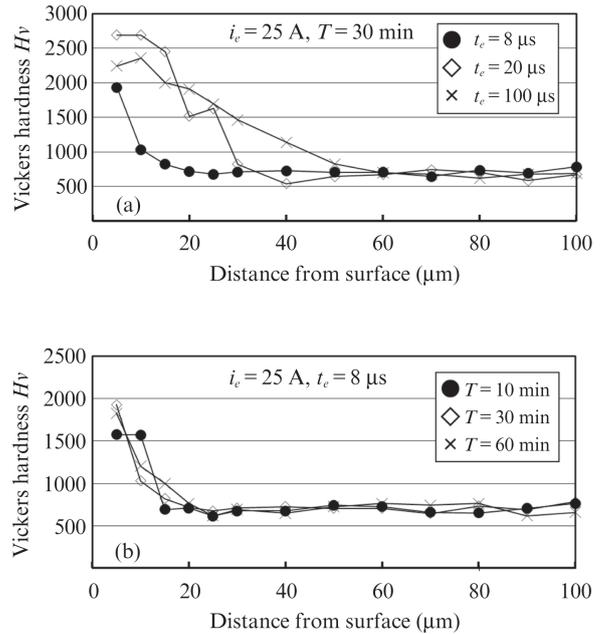


図4 表層からの硬度分布測定結果¹⁸⁾

Fig. 4 Variation of hardness in cross section

とで皮膜を形成する。このとき、陽極側のロール表面が溶融していることが皮膜を強固に堆積させるには必要となる。ところが、加工時間が長い場合は、ロール側の最表面には既にTiCが形成された箇所も存在し、その部分では陽極側材料の熱物性値が大きく変わる。毛呂らは⁹⁾は、TiCを工作物としTiC焼結体電極を用いた放電表面処理を実施した場合に、電極材料の移行が見られず除去加工となることを報告しており、加工時間が長い条件では表層に形成されたTiCによってロール表面の融点TiCの融点3137℃まで上昇するため、ロール側に放電溶融痕が形成できず、それ以降のTiCの堆積が困難になり、放電時の衝撃等により皮膜にクラックが形成されたと考えられる。

次に放電電流*i_e*とパルス幅*t_e*の影響を整理した。*i_e*、*t_e*が大きい高エネルギー条件では単発放電での電極消耗が増加し、ロール側へ移行するTiCの量が大きくなる。図5に*i_e*、*t_e*に対する膜厚の変化を示す。*i_e*および*t_e*の増加に伴い膜厚

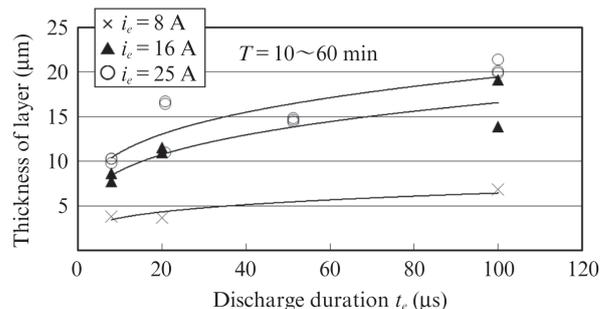


図5 電気加工条件による膜厚変化¹⁸⁾

Fig. 5 Relationship between thickness of coated layer and electrical discharge condition

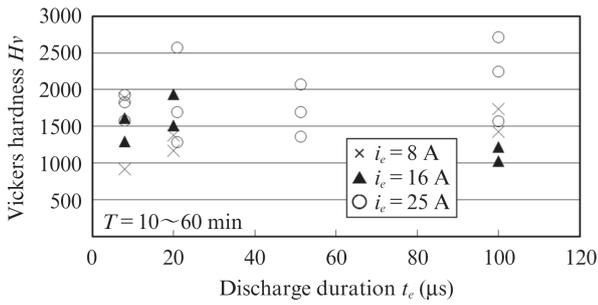


図6 電気加工条件による表層部硬度変化¹⁸⁾

Fig. 6 Relationship between hardness of coated layer and electrical discharge condition

が大きくなっている。同一の t_e で、 i_e に対する膜厚を比較するとばらつきはあるが、 i_e に比例した膜厚変化をしている。一方、 t_e に対する膜厚変化は i_e に比べて小さい。これは、放電アーク中の電流密度に対する影響が異なるためと考えられる。放電加工時の単発放電痕の直径 d に与える i_e 及び t_e の影響は小林等の報告¹⁹⁾によれば(1)式の関係をとる。電流密度は i_e を放電痕の面積(真円仮定)で除したものであるので、電流密度 ρ と i_e と t_e の関係は(2)式で示される。この式の形から分かるように、 t_e は電流密度を小さくする方向に作用するため、投入エネルギーを大きくした効果が i_e より小さくなる。但し、従来のクロムメッキが $10\mu\text{m}$ 程度の膜厚であることを考えると、電気加工条件を最適化することで十分な膜厚を確保可能と考えられる。

$$d \propto i_e^{0.4} \cdot t_e^{0.4} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\rho = i / (\pi d^2 / 4) \propto i_e^{0.2} \cdot t_e^{-0.8} \quad \dots\dots\dots (2)$$

図6は電気加工条件に対する表層から $5\mu\text{m}$ 深さ位置のビッカース硬さの変化である。硬さはばらつきが大きく、電気加工条件と明瞭な相関は見られない。これはTiC焼結体電極を用いた放電表面処理ではロール表面へのTiCの移行であるため、硬さに対しては初期電極材料の硬さの影響が支配的であるためと考えられ、従来クロムメッキより硬いHv1 500~2 000程度を確保できている。

図7は電気加工条件に対するロール表面粗さの変化である。 i_e および t_e の増加に伴い Ra が大きくなり、 PPI が小さくなっているが、これは放電エネルギーの増加に伴い、単発の放電でロール表面に移行するTiCの量が大きくなることを考えれば、その集合で形成されるロール表面の凹凸が大きくなることは理解できる。

図8は今回の放電表面処理と従来の放電ダル加工機(EDT)でのロール表面粗さの制御範囲²⁰⁾を比較したものである。放電表面処理でも電気加工条件の調整で従来のダル加工の表面テクスチャー制御の範囲内に制御可能である。

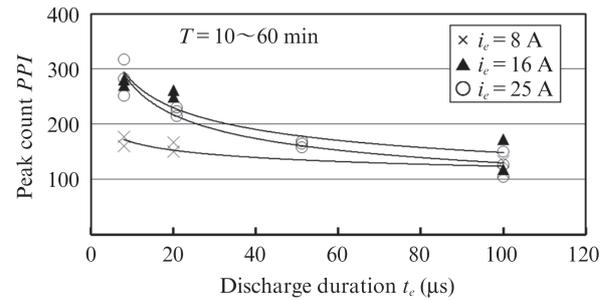
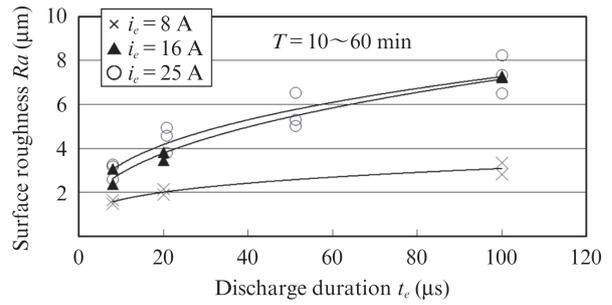


図7 電気加工条件に対する表面粗さ変化¹⁸⁾

Fig. 7 Relationship between surface roughness and electrical discharge condition (a) Ra, (b) PPI

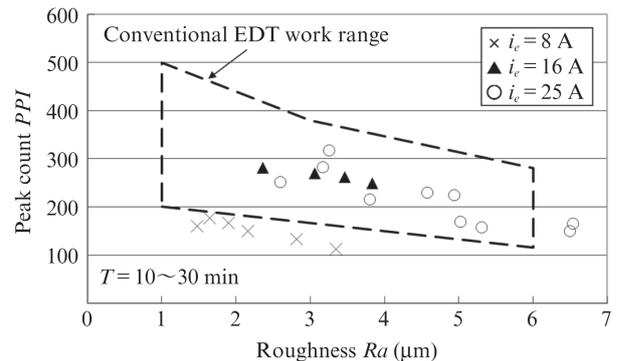


図8 放電ダルと放電表面処理での粗さ制御範囲比較¹⁸⁾

Fig. 8 Comparison of roll surface texture between electrical discharge coating and electrical discharge texturing

4. 放電表面処理 TiC 皮膜の摩耗特性

4.1 実験方法

放電表面処理 TiC コーティングロールの耐摩耗性を評価するため圧延実験を行った。圧延は直径 70 mm, バレル幅 40 mm のワークロールと直径 140 mm のバックアップロールで構成される 4 段式圧延機を用い、コイルでの張力圧延を実施した。被圧延材は板厚 1.0 mm, 板幅 25 mm, 降伏応力 230 MPa の軟鋼 (SPCC) を用い、ドライ潤滑で圧延荷重 19.6 kN を負荷した状態で圧延速度 20 m/min の条件で圧延を行った。圧延荷重の設定は、実機調質圧延とはロール径が異なるため、ワークロールとバックアップロールの接触面圧が実機同等の 1 100 MPa となるように設定している。

評価ロールの材質は SUJ-2 (2% Cr 鋼) であり、従来技術

表3 テストロール条件
Table 3 Test roll condition

	Thickness of coating/ μm	Hardness H_v	Roughness $R_a/\mu\text{m}$
SUJ-2 (No coating)	—	695	2.45
Cr-coating	8.0	1 096	2.80
TiC-1 (With crack)	10.0	1 811	2.29
TiC-2 (No crack)	10.0	1 623	2.92

との比較を行うためにクロムメッキロールも準備した。クロムメッキロールは、あらかじめ通常の放電ダル加工によって表面粗さを調整後に硬質クロムメッキ処理を行った。またTiCコーティングロールの電気加工条件は、放電電流 $i_e=25\text{ A}$ 、パルス幅 $t_e=8\mu\text{s}$ とし、加工時間を変更し皮膜欠陥があるものと無いものを準備し、コーティング無しのロールも含め4種類のロールで圧延実験を行った。

表3に各ロールの初期表面粗さ、皮膜厚み、表層から $5\mu\text{m}$ 深さ位置のピッカース硬度の測定結果を示す。表面粗さはいずれのロールも $2.0\sim 3.0\mu\text{mRa}$ であり、一般的に調質圧延のダルロールとして用いられている粗さの範囲に入っている。耐摩耗性の評価は、圧延長に対するロール表面の算術平均粗さ R_a の変化を触針式表面粗度計で測定し、 R_a の低下挙動を比較することで評価した。また圧延による皮膜の剥離有無を確認するため、圧延前後のロール表面を光学顕微鏡にて拡大観察した。

4.2 実験結果

図9に各ロールの圧延長に対するロール表面粗さの変化を測定した結果を示す。いずれのロールも最初の圧延で初期摩耗によって粗度が大きく低下したのち、緩やかに粗度が低下していくが、その低下量はロールによって大きく異なることが分かる。コーティングが無いSUJ-2は、1 km程度の圧延で粗度が $2.0\mu\text{mRa}$ 以下となるのに対し、クロムメッキを施したロールでは2.5 km圧延後でも $2.0\mu\text{mRa}$ 以上の粗度を維持することができおり、クロムメッキの有効性を確認することができる。

放電表面処理によってTiC皮膜をコーティングしたロールでは、当然ながら皮膜中の欠陥の有無で結果が大きく変わる。皮膜中にクラックが存在するロールでは、圧延初期から大きな粗度低下が生じ、1 km程度の圧延で初期粗度の半分程度まで低下し、2.5 km圧延後では $1.2\mu\text{mRa}$ 程度まで粗度が小さくなっている。一方、欠陥の無い健全な放電表面処理皮膜では粗度の低下量はクロムメッキロールと比較しても小さく、9.0 km圧延後でも $2.5\mu\text{mRa}$ 以上の粗度を維持しており、極めて優れた耐摩耗性（粗度維持性）を有することが分かる。

図10はクロムメッキロールおよびTiCコーティングロールの圧延前と2.5 km圧延後の表面状態を光学顕微鏡で観察

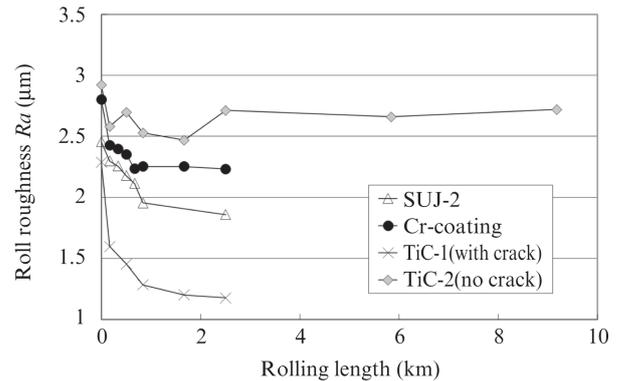


図9 圧延長に対するロール粗さ変化¹⁸⁾

Fig. 9 Relationship between roll roughness and rolling length

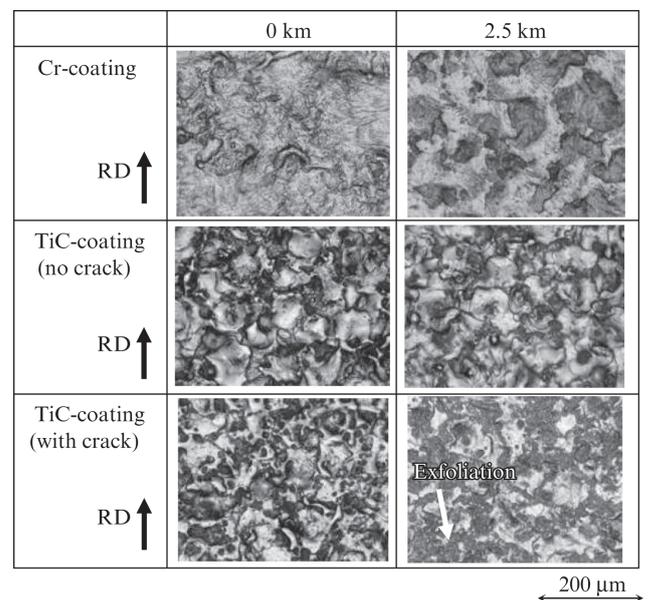


図10 圧延前後のロール表面拡大観察写真¹⁸⁾

Fig. 10 Optical micrographs of the roll surface in rolling experiment

した結果である。クロムメッキロールでは圧延後に凸部が平坦化している様子が観察されるが、健全なTiCコーティングロールでは圧延前からの表面形態の変化が小さいことが分かる。一方、クラックの存在するTiCコーティングロールでは圧延後に皮膜の剥離が観察される。これは圧延時に作用する応力によってクラックが進展し、クラックが連結することによって皮膜の剥離が生じ、早期に粗度が低下したものと考えられる。

以上の結果から、放電表面処理によってTiCコーティングを施したロールは電気加工条件を最適化し、健全な皮膜を形成すれば、従来のクロムメッキロールよりも優れた耐摩耗性を有し、調質圧延用ロールへ適用できる可能性があることが明らかとなった。また本技術は一般的に使用されている放電ダル加工機の電極材質と電気加工条件を変更するのみで実施する事が可能であり、PVD等の他の硬質皮膜コー

ティングプロセスと比較して、鉄鋼圧延用ロールへの適用に有利である。

5. おわりに

放電表面処理法の圧延用ロールへの適用の可能性を明らかにするため、TiC焼結体電極を用いた放電表面処理を冷延ロール素材(2% Cr鋼)に実施し、その成膜特性と耐摩耗性を実験的に評価し、以下の知見を得た。

- (1) TiC焼結体電極を用いた放電表面加工によって、2% Cr鋼素材の表面にHv=1500以上の硬質皮膜を形成できることが分かった。
- (2) 放電表面処理では加工時間が長すぎる場合、膜厚や硬さは増加せずに、皮膜にクラック等の欠陥が形成される。これは陽極側のロール表面にTiC皮膜が形成された箇所を再度放電するとき表面の融点上昇によって、ロール表面が溶融しにくくなるため、電極材料が固着しにくくなり、放電時の衝撃のみが作用するためと考えられる。
- (3) 放電表面処理での表面粗さは従来の放電ダル加工の範囲内で制御可能である。
- (4) 放電表面処理TiCコーティングロールの耐摩耗性(粗度維持性)はクロムメッキロールより優れる。

参考文献

- 1) Scheers, J.; Vermeulen, M.; DeMare, C.; Meseure, K. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1998, vol. 38, p. 647-656.
- 2) Pawelski, O.; Rasp, W.; Zwick, W.; Nettelbeck, H. J.; Steinhoff, K. Journal of Materials Processing Technology. 1994, vol. 45, p. 215-222.
- 3) Kijima, H.; Bay, N. Journal of Materials Processing Technology. 2013, vol. 213, p. 1764-1771.
- 4) 木村幸雄, 植野雅康, 三原豊. 鉄と鋼. 2009, vol. 95, p. 399-405.

- 5) 出石智也. 塑性と加工. 1991, vol. 32, p. 458-463.
- 6) Simao, J.; Aspinwall, D. K. Journal of Materials Processing Technology. 1999, vol. 92-93, p. 281-287.
- 7) Jimbo, Y.; Azushima, A. Wear. 2001, vol. 249, p. 415-421.
- 8) 毛利尚武, 齋藤長男, 恒川好樹, 粉山英教, 宮川昭彦. 精密工学会誌. 1993, vol. 59-4, p. 625-630.
- 9) 毛呂俊夫, 後藤昭弘, 毛利尚武, 齋藤長男, 松川公映, 福島泰弘. 日本機械学会論文集C編. 2003, vol. 69-683, p. 174-180.
- 10) Simao, J.; Lee, H. G.; Aspinwall, D. K.; Dewes, R. C.; Aspinwall, E. M. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2003, vol. 43, p. 121-128.
- 11) Hwang, Y.; Kuo, C.; Hwang, S. Journal of Materials Processing Technology. 2010, vol. 210, p. 642-652.
- 12) Wang, Z.; Fanga, Y.; Wua, P.; Zhao, W.; Cheng, K. Journal of Materials Processing Technology. 2002, vol. 129, p. 139-142.
- 13) Moro, T.; Mohri, N.; Otsubo, H.; Goto, A.; Sato, N. Journal of Materials Processing Technology. 2004, vol. 149, p. 65-70.
- 14) Simao, J.; Aspinwall, D. K.; Menshaw, F. E.; Meadows, K. Journal of Materials Processing Technology. 2002, vol. 127, p. 211-216.
- 15) 後藤昭弘, 毛呂俊夫, 松川公映. 電気加工学会誌. 2000, vol. 34, p. 38-43.
- 16) 後藤昭弘, 寺本浩行, 鷲見信行, 中野善和. 素形材. 2010, vol. 61, p. 46-51.
- 17) 落合宏行, 渡辺光敏, 荒井幹也, 吉澤廣喜, 齋藤吉之. 石川島播磨技報. 2005, vol. 45, p. 72-79.
- 18) 植野雅康, 藤田昇輝, 木村幸雄, 中田直樹. 塑性と加工. 2014, vol. 55, p. 1013-1017.
- 19) 小林和彦. 三菱電機技報. 1971, vol. 45, p. 1259-1272.
- 20) 飛山洋一, 阿保谷和洋. JFE技報. 2004, vol. 4, p. 48-52.



植野 雅康



藤田 昇輝



木村 幸雄