

技 術 論 文

熱延巻取り用ロールの材質特性について

Materials Characteristics of Coiler Roll for Hot Strip Mill



技術開発センター
商品・生産技術開発室
室長 博士(工学) 園田 晃大
Akio Sonoda

技術開発センター
商品・生産技術開発室
係長 花田 喜嗣
Yoshitsugu Hanada

技術開発センター
商品・生産技術開発室
主任 博士(工学) 肖 陽
Yang Xiao

技術開発センター
センター長
博士(工学) 永吉 英昭
Hideaki Nagayoshi

要 旨

熱間圧延用巻取りロールの特性を改善するため、当社ではこれまで肉盛り法やCPC製造法による開発を行ってきた。本稿では、その取組み内容と最近の熱延巻取りロールの開発状況および使用実績について紹介する。また、今後の更なる材質開発のための評価法についても言及する。CPC法は肉盛り法と比べて、1層盛りであり厚肉盛りに有利であるため、熱間圧延用巻取りロールの表面改質に有効である。CPC法にて開発した新しい材質であるFKS-KC5材は従来材と比べて優れた耐腐食性や耐摩耗性を示した。FKS-KC5材によるロールが熱間圧延設備でのロールとして広く適用されてきている。

Synopsis:

To improve the coiler roll for hot strip mill, we has carried out the material development by hardfacing and CPC production technique. In this paper, the development content and the recent using results of coiler roll were introduced. And the evaluation method for the material development was reported. The layer of CPC was composed of one-layer, and effective for manufacturing of the thick layer in comparison with hardfacing. Therefore, CPC production technique was effective for the improvement of the coiler roll surface. The new material FKS-KC5 developed by CPC production technique improved the corrosion resistant and the wear resistance. The rolls improved by FKS-KC5 has widely been applied for the rolls in hot strip mill.

1. 緒言

製鉄所における熱間圧延設備に用いられる熱延プロセス用ロールは、高温での腐食環境下で使用される。その中でも、鋼板巻取り設備用の巻取りロールは、巻取られる鋼板の鋼種や厚みなど様々であり、一般的に、耐腐食性、耐焼付き性、耐摩耗性、耐熱衝撃特性及び耐打ち疵性など多くの耐久性能が要求される¹⁾。さらに、製鉄所では設備のメンテナンスに費やす時間の短縮や製造コスト削減のため、熱間圧延設備で使用されるロールに対しても更なる耐久性が求められている。

当社では、硬化肉盛り法や連続注入クラッド法であるCPC (Continuous Pouring process for Cladding) 法によって、これまで多くのロール材質改善の取組みを行ってきた。本稿では、このような熱延巻取りロールへの当社の取組み事例を紹介し、最新の材質開発によって、適用されている実機ロールへの使用状況を報告する。また、材質改善に関わる評価方法についても言及する。

2. 熱延巻取りロールの使用条件

熱延巻取り設備の代表的な構成を Fig.1 に示す。熱延巻取りロールは、鋼板の先端をマンドレルの周囲に沿って確実に搬送する役目を果たし、適切な圧力で、鋼板をマンドレルに押し付ける。このため、鋼板には曲げ加工が生じ、巻取り易い形状となる^{2) 3)}。

熱延巻取りロールは、鋼板との接触や衝突によりロール表面に損傷を受けるばかりでなく、繰り返しの加熱冷却を受ける過酷な使用環境となる。熱延巻取りロールに要求される特性として次のことがあげられる。

- (1) 耐焼付き性
- (2) 耐摩耗性
- (3) 耐打ち疵性
- (4) 耐熱衝撃性
- (5) 耐腐食性

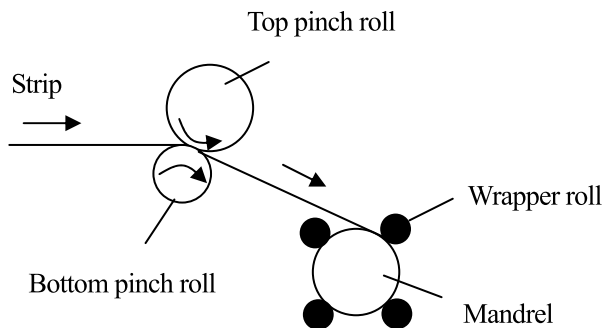


Fig.1 Construction of coiler in hot strip mill

3. 実機ロールの変遷とロール損傷現象

本章では、当社がこれまで取り組んできた熱延巻取りロールの材質改善において、硬化肉盛り法や CPC 法によるロールの特徴や損生事例、さらに改善方法について報告する。

3.1 肉盛りロールのビードマーク発生

ロール表面改質手法の一つとして、硬化肉盛り法があり、当社でも熱延巻取りロールへの適用を実施した経緯がある。

当社の特殊溶接材料で、ステンレス基地に晶出 MC 炭化物が分散した金属組織を有する材質があり、熱延巻取りロールに適用した。

Fig.2 は上述した熱延巻取りロールの外観であるが、溶接による熱影響部と原質部との境界層がロール円周上で、筋状に観察されている⁴⁾。

肉盛り溶接は溶接ビードを重ねて硬化層を形成する製造プロセスであるため、溶接ビードが重なった部位には溶接入熱による熱影響部が発生する。そのため、熱影響部へ新たに Cr 炭化物が析出し、基地中の Cr 濃度が減少する⁵⁾。このため、熱影響部は原質部と比較し

て耐食性が劣化し、腐食が促進されるため筋状模様が生じたと推察される。

このように溶接ビードの熱影響部に発生した腐食による筋状模様（ビードマークと称す）は、ロール表面に凹凸形状が生ずる要因となり、鋼板に転写を起す場合がある。その一例として、Fig.3 にビードマークが転写した鋼板を示す⁴⁾。



Fig.2 Bead-mark observed in wrapper roll



Fig.3 Print of bead-mark to strip

硬化肉盛り法のように製造プロセス上溶接を用いる場合は、溶接入熱時の熱影響は避けられない現象であり、いかにして熱影響部の材質変化を抑制するかが大きな課題となっている。熱処理による均質化という手法も考えられるが、焼き戻し温度（400℃～600℃）ほどの温度域では十分な材質の均質化は図れず、また焼ならし・焼き入れ温度域（900℃～）でも完全には熱影響部を均質化することは難しい。そればかりでなく、熱処理にかかる製造工程の増加や、製造コスト増大の懸念もある。

これに対し当社では、熱影響部の材質劣化による腐食を防止する試みとして、硬化肉盛り法によって、熱影響部でも十分な耐食性を有する非鉄系の高耐食材料を熱延巻取りロールに適用した。これによってビードマーク発生を抑制することに成功したが、硬化層の硬度や厚みの不十分さから耐打ち疵性の問題が発生した⁵⁾。

硬化肉盛り法は、部材の表面改質に幅広く用いられている手法ではあるが、ビードマークの発生や、耐打ち疵性に対する硬化層の厚みの確保が困難である（厚みを増そうとすると、製造工程の長期化に伴うコスト増などの現実的な制約がある）ことなどから、熱延巻取りロールのような非常に過酷な使用環境では、必ずしも適切な製造プロセスであるとは言えない。

そこで当社では、熱延巻取りロール材質改善の取組みとして、ビードマークの転写の心配がなく、硬化層の厚み確保に有効である CPC 法の特徴を生かしたロール材の開発を行ってきた。ここで、CPC 法の特徴を整理すると以下ようになる⁶⁾。

- ①指向性凝固の1層盛りであり、肉盛溶接ビード模様の出現がない。
- ②1層盛りであることから、層中に脆化層の出現がない。
- ③肉盛速度は肉盛溶接の比ではなく、厚肉盛には極めて有利である。
- ④母材との接合は肉盛溶接同様に拡散接合である接合強度は極めて高い。

3.2 CPCロールの肌荒れ現象

熱延巻取りロールでは、鋼板との接触摩耗や冷却水・加熱水蒸気による腐食摩耗、高温雰囲気での酸化摩耗のように、劣化要因としては腐食摩耗が支配的であると考えられる。当初のCPC法による熱延巻取りロールは、Fig.4のCr量と腐食量の関係に基づき、鋼板との焼付き現象が発生しないことも考慮したCr量を配合した。また、MoやV等の微細な炭化物を析出させ、耐摩耗性に有効に作用させる材質設計とした¹⁾。

当該ロールは、多くの製鉄所で使用され耐摩耗性などに優位性を発揮したものの、より過酷条件で使用さ

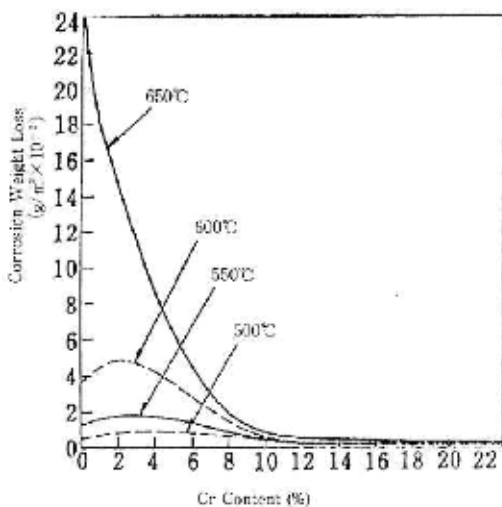


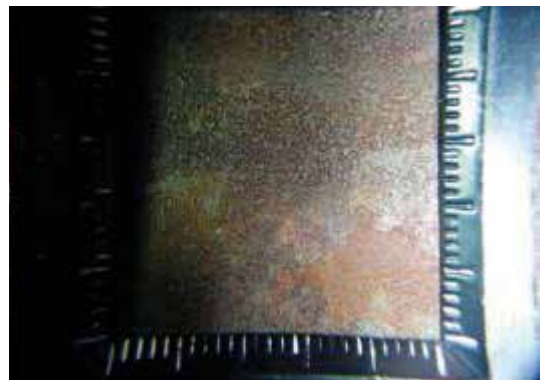
Fig.4 Relation between Cr content and corrosion weight loss in superheated steam¹⁾

れる一部の製鉄所にて、ロール表面の肌荒れが発生し、その肌荒れ模様が鋼板へ転写するという問題が起きた。

Fig.5とFig.6に肌荒れが発生した熱延巻取りロール表面の写真と、肌荒れが転写した鋼板の写真を示す。Fig.5-(a)において、ロール表面で中央付近は主に黒錆が発生し、その他の部位には赤錆が発生している傾向があった。このロール中央部を拡大したFig.5-(b)に示すように、ロール表面はピット状の凹凸面を呈しており、ロール表面の肌荒れを起こしている。このピット状の凹凸がFig.6に示す鋼板への転写を起こし、鋼板にはロール表面と同様のピット状の凹凸が発生している。



(a) Wrapper roll appearance



(b) Wrapper roll surface

Fig.5 Rough surface in wrapper roll

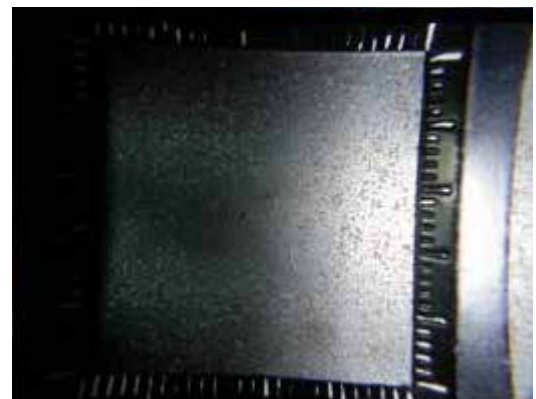


Fig.6 Print of rough surface to strip

この肌荒れは、耐腐食性の不十分さが要因と考えられ、肌荒れ発生機構は以下のように考えられる。

Fig.7に示すFe-O平衡状態図⁷⁾から黒錆(マグネタイト: Fe_3O_4)の発生する温度域は560°C以上であるのに対し、赤錆(ヘマタイト: Fe_2O_3)は低温域でも比較的容易に発生する。ロール中央部は鋼板と優先的に接触するため、ロール表面温度の上昇傾向が強く560°C以上の温度域に到達したものと考えられる。

Fig.5にてロール中央部以外で確認された赤錆(ヘマタイト)は脆く密着力の弱い酸化物のため、鋼板との接触にて容易に脱落する(なお、これが腐食摩耗現象となり、摩耗量を助長する要因となる)。一方、ロール中央部で確認された黒錆(マグネタイト)は強固で密着性の強い酸化物であるため、鋼板との接触では脱落せずに残存するものと、一部脱落するものとに分かれる。これがピット状の凹凸を形成する要因となる。

このロール表面の肌荒れを防止するためには、ロール材料の耐腐食性・耐酸化性を向上させ、根本的にマグネタイトやヘマタイトなどの酸化物発生を抑制する必要がある。

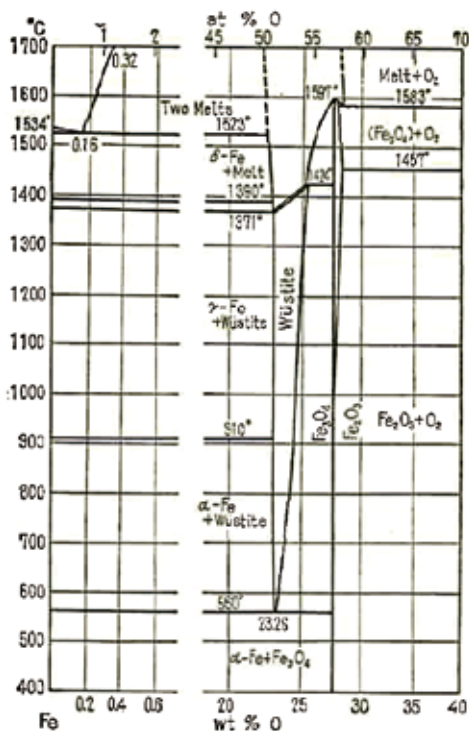


Fig.7 Phase diagram of Fe-O system⁷⁾

3.3 CPCロールの熱衝撃による割れ発生現象

優れた耐腐食性・耐酸化性を有する材質設計として、非鉄系の高耐食性材料による熱延巻取りロールに適用した結果について報告する。その使用状況を Fig.8 に示す。ロール表面は金属光沢を呈し十分な耐腐食性や耐酸化性を示しており、3.2章の事例のようなロール表面の肌荒れ現象は発生しなかった。

ただし、当該ロールに使用した材質は靱性が低い材

料であったため、Fig.8のように熱衝撃による割れが発生する結果となった。

このように、高温での耐腐食性、耐酸化性の問題を優先的に解決したとしても、耐熱衝撃性が不十分であれば、熱延巻取りロールとしての優位性は発揮できず実用に耐えうるロールとはならない。あくまでも前述したような熱延巻取りロールに要求される特性をすべて満足する事が重要になってくる。

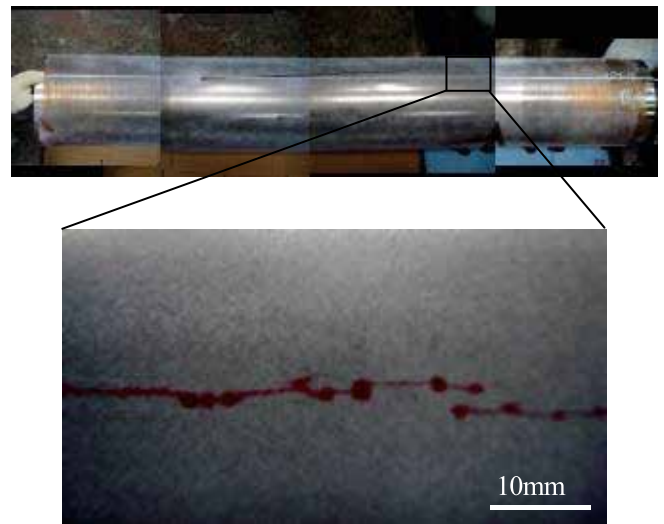


Fig.8 Crack initiation in wrapper roll by thermal shock

3.4 最近のCPCロールによる特性改善

これまでの熱延巻取りロールの適用事例からその問題点や解決方法について整理すると、以下ようになる。

- ①硬化肉盛り法の熱影響部の腐食に起因するビードマークの発生については、抑制方法としてCPCのような1層クラッドの肉盛り方法が有効である。
- ②耐打ち疵性には硬化層の厚肉化が有効であり、厚肉盛りに適したCPC法に優位性がある。
- ③ロール表面の酸化被膜(マグネタイト)発生に起因する肌荒れ現象を抑制するためには、ロール表面改質材の耐腐食、耐酸化性が重要である。
- ④熱衝撃によって発生するロール表面の割れに対しては、適切な靱性を持った材料を選定する必要がある(なお、この材料の適切な靱性に関しては3.5章にて後述する)。

これに加え、優れた耐摩耗性や耐焼付き性を有することがロールとしての性能に大きく関わってくる。

当社では、これまで得られた熱延巻取りロールに関する知見を考慮して、新たな材料開発に着手してきており、熱延巻取りロールへ適用を行ってきている^{6),8)}。ここでは、その新しい材質であるFKS-KC5材の特徴

と実機ロールへの適用状況について述べる。なお、本材質については、文献6)や文献8) (フジコー技報No.16 (2008) 25、フジコー技報 No.19 (2011) 71) に詳しく紹介しているので参照いただきたい。

FKS-KC5 材による熱延巻取りロールの使用中の写真を従来材のロールと比較して Fig.9 に示す⁶⁾。当該ロールの実装製鉄所では、巻取り温度が 700℃以上と高く、SUS 及び特殊鋼の通板頻度が多いため比較的ロールに掛かる負荷が高い。このような過酷な使用環境であるため、従来材のロールでは肌荒れ現象が発生していた。Fig.9 から、FKS-KC5 材によるロールは従来材のロールと比べても赤錆は観察されず納入時の光沢を維持しており、耐腐食性や耐酸化性に優位性があることが確認された。また、3.3 章で述べたような熱衝撃による割れの発生も起きていない。このように、FKS-KC5 材は、従来材のロールの問題点を改善した材質であり、後述する耐摩耗性も含めて優れたロール材であるといえる。FKS-KC5 材による熱延巻取りロールは製鉄所での熱延設備のロールに数多く採用されている。



Fig.9 Wrapper roll appearance: a) conventional alloy, b) FKS-KC5⁶⁾

3.5 実験室での特性評価

熱延巻取りロールでは、耐腐食性、耐焼付き性、耐摩耗性、耐熱衝撃特性及び耐打ち疵性など多くの耐久性が要求される。そのため、材質設計の段階では、それぞれの特性を適切に評価することが重要である。

材質評価に関しては文献 6) に詳しく紹介しているが、ここでは、それに加えて耐腐食性、耐酸化性および、耐熱衝撃性に関する評価方法を提案する。

3.5.1 耐腐食性、耐酸化性の評価

文献 6) では、耐腐食性、耐酸化性の評価として、複合サイクル試験による腐食減量の評価を行った。複合サイクル試験は、材料の耐食性を評価する加速試験としては有効であるが、試験を実施するためには、特

別な設備機器を有することが必要である。ここでは、複合サイクル試験を代用する評価方法として、鉄表面に黒錆 (マグネタイト: Fe_3O_4) を生成させる表面処理の一種である水蒸気処理 (ホモ処理) を採用した評価方法を紹介する。

試験方法は、あらかじめ表面を研磨 (耐水ペーパーにて #400 まで) した試験片を Fig.10 に示す条件で水蒸気処理し、その後、試験片表面の X 線回折を行って生成した酸化物の解析を行うものである。なお、試験片には 3.2 章で紹介した熱延巻取りロールにて肌荒れが発生した従来材と、3.4 章で紹介した FKS-KC5 材を用いた。

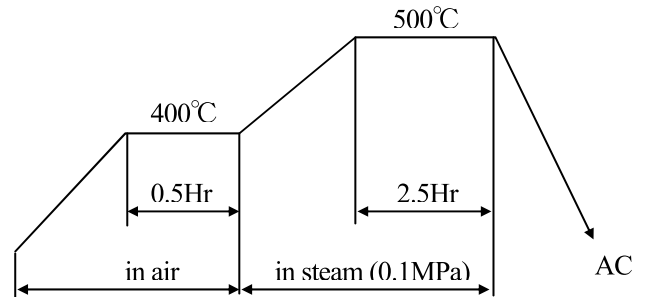


Fig.10 Condition of steam treatment

試験後の試験片表面の写真を Fig.11 に示す。従来材の表面には黒錆 (マグネタイト) が発生しているのに対し、FKS-KC5 材では金属光沢を保ったままである。

次に X 線回折の結果を Fig.12 に示す。従来材では Fe_2O_3 系や Fe_3O_4 系の酸化物のピークが検出されているが、FKS-KC5 材ではいずれの酸化物のピークも検出されなかった。

このように、本評価法によって実機ロールと同様に、材質による酸化物発生傾向の差を確認することができた。

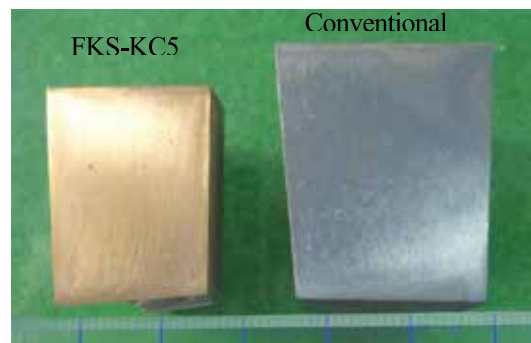
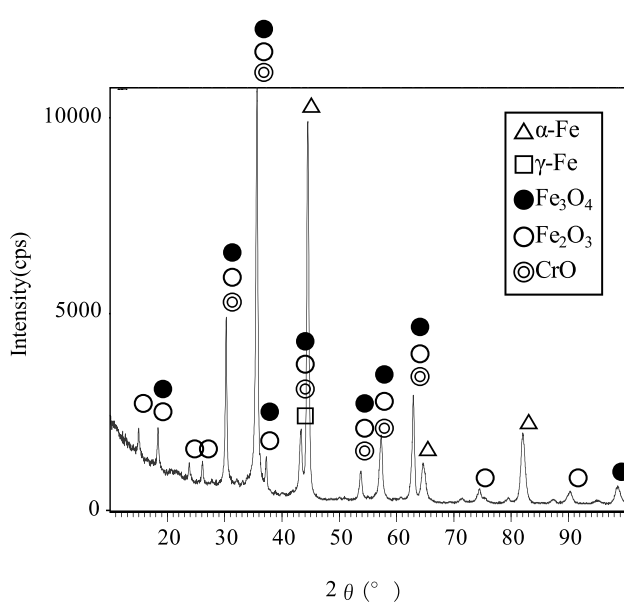
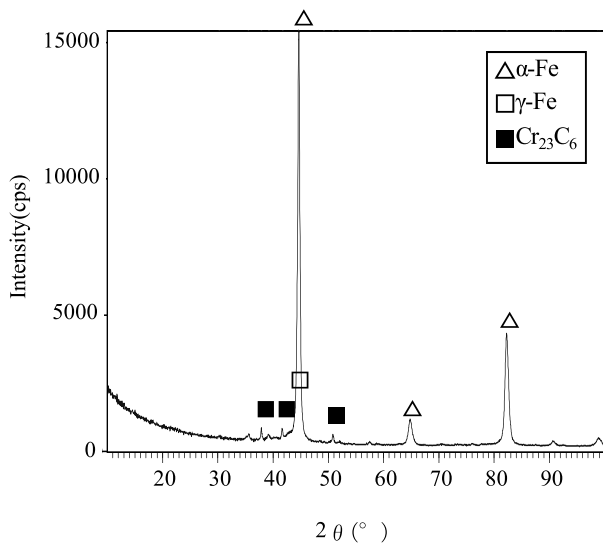


Fig.11 Result of steam treatment test



(a) Conventional alloy



(b) FKS-KC5

Fig.12 X-ray diffraction pattern

3.5.2 耐熱衝撃性の評価

文献 6) では、耐熱衝撃性の評価として、加熱した試験片を水中へ投入し、割れが発生する温度を材質ごとに比較した。ここでは、再現性やより定量的な評価を行うことを主眼に、破壊靱性値による耐熱衝撃性の評価方法を紹介する。

熱延巻取りロールは、最大 800°Cほどの鋼板との接触することから、ロール表面には繰り返し加熱冷却による熱衝撃や熱疲労を受けることになる。Fig.13 は、部材の表面から内部方向へ発生する熱応力を FEM によって計算した一例であるが、部材表面には最大の熱応力が発生し、内部方向へは熱応力は漸減していくことがわかる。熱延巻取りロールの使用条件によっては、

ロール表面近傍に大きな熱応力が作用し、ロール表面近傍のみにき裂が発生する場合がある。Fig.14 にロール表面にき裂が発生したロール断面の写真を示す。ロール表面に発生したき裂は深さ 200~300 μm ほどであるが、これ以上き裂が進展することがなければ、ロールの実使用においては問題となる事はない。それは、ロール表面の摩耗により、浅い 200~300 μm ほどのき裂はいずれ消失するからである。また、き裂の開口量も微量のため、鋼板への転写の問題も考えにくい。ただし、ロール表面のき裂がさらに進展して、硬化層内部まで到達してしまう場合には、硬化層の大規模な割損の懸念があり、実使用において重大な問題となる可能性がある。

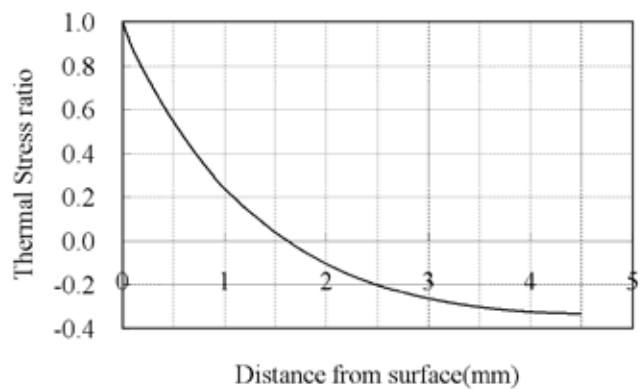


Fig.13 FEM analytical result of thermal stress

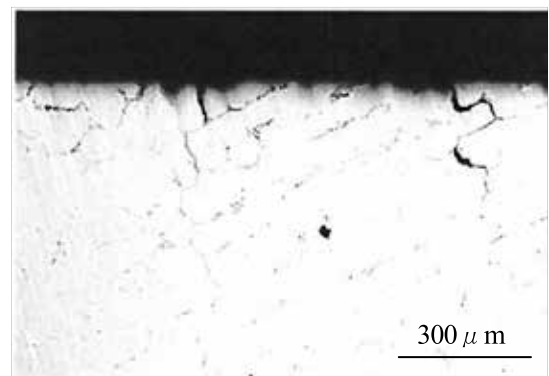


Fig.14 Crack of the roll surface

本評価法では、あらかじめロール表面き裂が発生している状態を想定し、このき裂がさらに進展するしきい値を評価することとする。評価方法は以下の手順となる。

Fig.15 に示すようなモデルを考えると、き裂先端の応力拡大係数 K_1 は以下のように式(1)で表せる⁹⁾。

$$K_1 = 1.12\sigma_1\sqrt{\pi a} + 0.4(\sigma_{\max} - \sigma_1)\sqrt{\pi a} \quad \dots (1)$$

ここで、 σ_{\max} と σ_1 はそれぞれロール表面の熱応力とき裂先端の熱応力であり、 a はき裂の長さとなる。 σ_{\max} については、部材に発生する熱応力の式 (2) により概算する¹⁰⁾。

$$\sigma_{\max} = \sigma^* E \alpha \Delta T / (1 - \nu) \quad \dots (2)$$

ここで、 σ^* は無次元化応力、 E はヤング率、 α は線膨張係数、 ΔT は温度差、 ν はポアソン比である。なお、無次元化応力 σ^* については、円筒部材の冷却条件では0.1~0.3程度と想定されるため¹⁰⁾、ここでは、大きめに見積もった0.3として評価を行う。概算した σ_{\max} からFig.13を用いてき裂長さから σ_1 を求める。例として温度差 ΔT を800℃とした場合に、き裂長さとき裂先端の応力拡大係数の関係をFig.16示す。あらかじめ

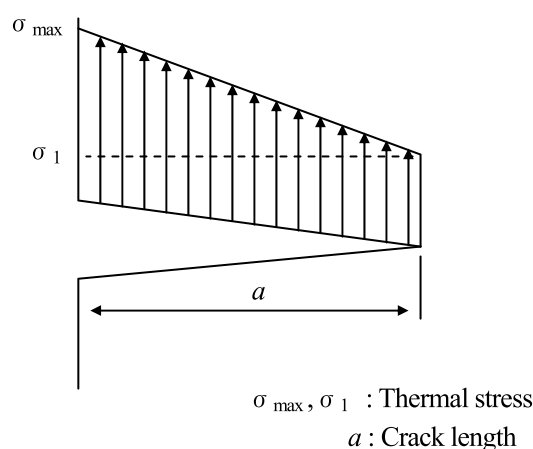


Fig.15 Stress field model of crack tip

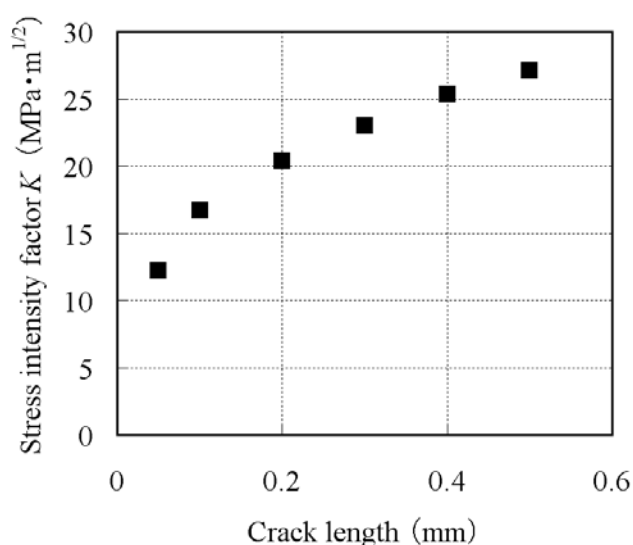


Fig.16 Relation between crack length and stress intensity factor

発生している想定のリール表面き裂300 μ mであるとすると、き裂先端の応力拡大係数 K_1 は約23MPa \cdot m^{1/2}となる。つまり、材料の破壊靱性値がこの23MPa \cdot m^{1/2}より大きければき裂の進展は起こらず、小さければさらにき裂は進展するという指標となる。なお、3.3章で紹介した熱衝撃によるき裂が発生した従来材の破壊靱性値は約18MPa \cdot m^{1/2}であり、き裂先端の応力拡大係数23MPa \cdot m^{1/2}に対して小さく、熱衝撃によるき裂の発生が起きた現象と対応する。一方、3.4章で紹介したFKS-KC5材の破壊靱性値は約29MPa \cdot m^{1/2}であり、き裂先端の応力拡大係数23MPa \cdot m^{1/2}に対して大きいため熱衝撃によるき裂発生懸念が少ないことがわかる。

本評価法を更に精度良く実施するためには、実機使用時のロール表面温度や各材料物性の把握、さらに残留応力の影響などを考慮する必要がある。また、本稿では、初期のロール表面の損傷として、熱応力によるロール表面に発生したき裂を考慮したが、実機ロール表面には鋼板接触による微小なスポーリングや接触疵などの損傷を受ける場合がある。損傷の程度が大きくなれば、熱応力によるき裂が発生しやすい状態となるため、実機のロール表面の損傷状態を十分に把握する事も重要である。なお、損傷の大きさの程度がわかれば、式(1)のき裂長さ a に代用して応力拡大係数 K_1 を求め、材料の破壊靱性値と比較評価することが可能となる。

4. CPCロールの実機適用結果

最後に、3.4章で紹介した新しい熱延巻取りロール材質であるFKS-KC5材の最近の使用実績について報告する。

Fig.17に、某製鉄所での従来材と新しい材質の使用期間と摩耗量について整理した。FKS-KC5材は、従来材と比較して7~9倍の耐摩耗性を示し、長期の使用を可能としている。この結果、製鉄所での設備交換の頻度減少やコスト低減に貢献し好評を博している。

Fig.18は、FKS-KC5材の各製鉄所への納入実績である。ここでは、熱延巻取りロールに加えて、熱延搬送ロールの実績も合わせて記載する。熱延搬送ロールも、熱延巻取りロール同様、高温の鋼板との接触による耐摩耗性、耐腐食性などの各種の特性が要求される。熱延巻取りロールについては、Fig.17に示す耐摩耗性の結果のように、近年優れた使用実績が出てきており、今後多くの製鉄所への導入拡大が期待できる。熱延搬送ロールについては、熱延巻取りロールと比べて設備的に数量が多いことや、実機評価の判断が早いことから、すでに多くの製鉄所でロールのプロパー化が進んでいる。

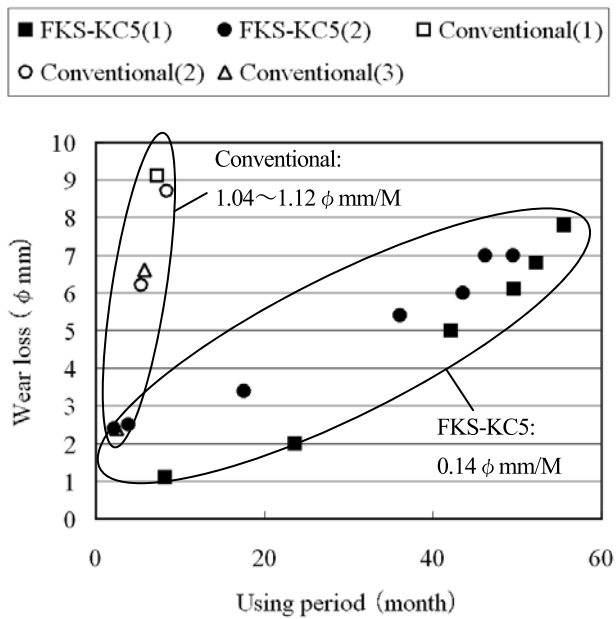


Fig.17 Wear loss of Conventional alloy and FKS-KC5 for wrapper roll

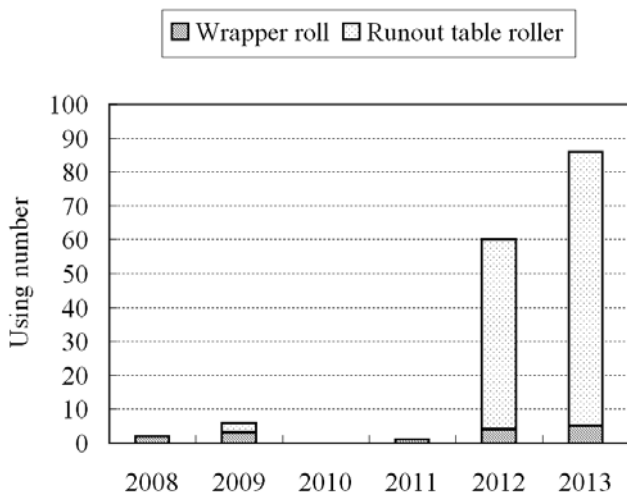


Fig.18 Using results of FKS-KC5 rolls

5. 結論

熱延巻取りロールの特性改善について要約すると次の通りである。

- (1) 硬化肉盛り法の熱影響部の腐食に起因するビードマークの発生については、抑制方法としてCPCのような1層クラッドの肉盛り方法が有効である。
- (2) 耐打ち疵性には硬化層の厚肉化が有効であり、厚肉盛りに適したCPC法に優位性がある。
- (3) ロール表面のマグネタイト (Fe₃O₄) 酸化被膜発生に起因する肌荒れ現象を抑制するためには、ロール材の耐腐食、耐酸化性が重要である。

また、材料の耐腐食、耐酸化性の評価はホモ処理を施すことで確認できる。

- (4) 熱衝撃によって発生するロール表面の割れに対しては、適切な靱性を持った材料を選定する必要がある。

耐熱衝撃性の評価法として、破壊靱性値と初期き裂先端の応力拡大係数を比較する方法を提案した。

- (5) 新しい材料であるFKS-KC5は材優れた耐久性能を有し、多くの製鉄所にて使用されて、熱延巻取りロールのみならず熱延搬送ロールにおいても長寿命化に貢献している。

参考文献

- 1)坂本、玉川、津田、森高：フジコー技報 No.1(1993)9
- 2)沼、坂本、植田、斉藤：フジコー技報 No.6(1998)25
- 3)日本鉄鋼協会編：新版鉄鋼便覧、丸善(1973)909
- 4)園田、大野：フジコー技報 No.12(2004) 42
- 5)吉武、中村：ステンレス鋼の溶接、産報出版(1979)
- 6)姜、園田、嵩、永吉：フジコー技報No.16(2008) 25
- 7)日本鉄鋼協会編：新版鉄鋼便覧、丸善(1973)1666
- 8)宮崎：フジコー技報 No.19(2011) 71
- 9)西谷、尾田、機論A、46巻、407号(1980)745
- 10)金属材料の強度と破壊、丸善(1964)562