

技 術 論 文

大径ロール用摩擦圧接部の強度特性の改善に関する研究 Study on Improvement of Strength Characteristics of Friction Welding Section for Large Diameter Roll



技術開発センター
商品・生産技術開発室
主任 近藤 加寿心
Kazusi Kondou

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

本社
総務部付
古田 博昭
Hiroaki Furuta

技術開発センター
副センター長
博士(工学) 姜 孝京
Hyo-Gyoung Kang

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

要 旨

当社では、平成 26 年から摩擦圧接法を用いた CPC ハイスロールの製造を行っており、多くの棒鋼・線材用圧延メーカーから当社ロールの使用実績が認められ、現在ではホットストリップミル向け大型ワークロールへの適用拡大のため、新しい CPC 製造方法と摩擦圧接の改善の検討を行っている。当初、小径ロールの圧接条件を大径ロールへ適用したところ、圧接部の延性の低下が見られた。圧接部を調査したところ細かい介在物の凝集が延性の低下を引き起こしていることが判明した。そこで、冷却機構を備え圧接部の温度上昇を抑えたところ、細かな介在物の凝集が抑制され延性の低下を防ぐことができた。また、熱処理温度(γ 化処理温度)を高くすると熱処理後の組織が均一となり延性の低下を防ぐことが確認された。

Synopsis:

FUJICO has been producing the HSS (high-speed steel) work rolls with the combination of CPC (Continuous Pouring process for Cladding) and friction welding technology since 2014. These rolls had been widely used at the steel bar and wire rod rolling. Recently we have been trying to produce work rolls for hot strip mill using the new CPC method and the improved friction welding technology. The friction welding conditions for small diameter rolls caused ductility reduction in large diameter rolls. As a result of investigation for the friction welding part with different conditions, the aggregation of small inclusions caused ductility deterioration. Therefore, suppression of friction welding temperature rising by using cooling mechanism prevents aggregation of small inclusions, and ductility deterioration. In addition, the heat treatment at high temperature homogenizes the microstructures and prevents ductility deterioration in the friction welding position.

1. 緒言

製鉄所における圧延工程では、省エネや品質向上の目的のため、これまで以上に低温、高圧下での圧延が実施されてきている。そのため、使用される圧延ロールでは、ロール胴部の品質や性能改善と同じく、軸部の品質や性能改善も重要な課題となっている。当社では、CPC 法で製造する圧延用ハイスロールを対象に、

平成 26 年から摩擦圧接法を用いたロールの軸接合を採用してきており、従来の狭開先溶接法^{1), 2)}による軸接合に代わる新しい技術として、軸部の品質や性能の改善に取り組んでいる。棒鋼・線材用の圧延ロールにおいては、ロールの軸接合は、 $\phi 120 \sim \phi 350 \text{mm}$ 程までのサイズが主流であり、Fig.1 に示す摩擦圧接装置を用いて、Fig.2 に示すように摩擦圧接による軸接合

が実施されている。このように CPC 製法で製造した胴部に摩擦圧接による軸接合を実施した圧延ロールは、高い評価を得ており多くの圧延メーカーで採用されている。

さらに、近年当社ではホットストリップミル向けの大径ワークロールの軸接合部に関して、更なる高強度化を目指している^{3), 4)}。そこで、今回は大径品(φ500mm～φ650mm)の接合部の強度特性を改善するため実施してきた内容について報告する。

2. 大径摩擦圧接部の強度特性

大径品(φ500mm～φ650mm)の摩擦圧接を実施するに当たり、当初は棒・線・形鋼材向けの圧延ロールの軸径サイズ(φ120～φ350mm)での圧接条件を参考にして、大径ロールへ適用することにした。摩擦圧接に用いた素材はφ620mmのSCM440材であり、圧接が完了後に、Fig.3に示す位置から引張試験片(JIS 4号)を採取し引張試験を行った。その結果をTable1とFig.4に示す。

φ350mmサイズの圧接条件を大径ロールでの圧接へ適用した場合、Fig.4のように採取位置によって強度レベルは変わらないものの、伸びや絞りに関しては、外径が大きく外周部に近くなるほど値が低くなり、延性が低下している傾向が確認された。そのため、大径ロール摩擦圧接部(φ500以上の大径ロールの軸接合部)の延性低下の要因を検証することとした。



Fig.1 Photo showing developed friction welding device



Fig.2 Photo showing friction welding situation (φ340)

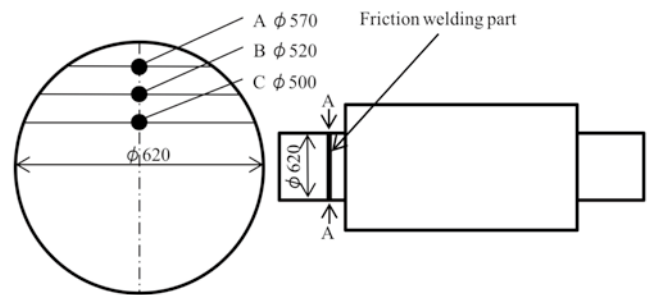


Fig.3 Schematic diagram showing sampling position for tensile test

Table1 Tensile property of friction welding part

Result \ Sample	A	B	C
Collection position (φ mm)	570	520	500
Elongation (%)	3.2	10.0	14.6
0.2% proof stress (MPa)	686	652	687
Tensile strength (MPa)	790	832	898

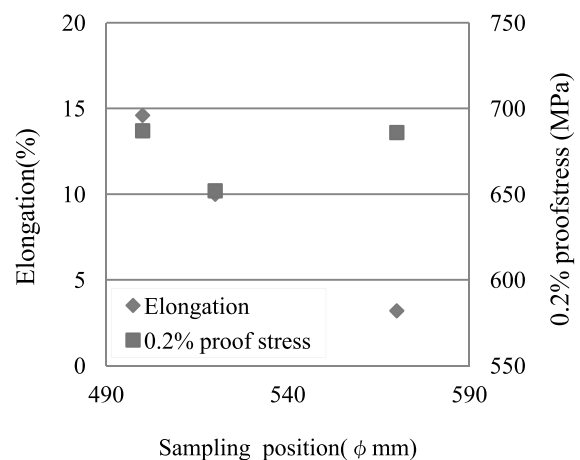


Fig.4 Relations between tensile property and sampling position

3. 大径摩擦圧接における延性低下の要因検証

3.1 引張試験片の観察

Fig.5は、2章で実施した引張試験片の破面である。Fig.5(b)に示す伸びの高かったCでは、中央部に黒色に見える延性破壊域とその周りの銀色の脆性破壊域を呈した破面が確認され、試験片もネッキングを起こして十分な伸びを伴って破断していた。これに対し、Fig.5(a)に示す伸びの低かったAでは、延性破壊領域(黒色部)は層状を示し、その周りが脆性破壊域の銀色の破面を示し、試験片断面積の減少も小さく、伸びが

低かったことがうかがえる。

黒色に見える延性破壊域について、A、C それぞれを3次元レーザー顕微鏡で観察した結果を Fig.6 に示す。Fig.6(a)に示す伸びの低かった A の層状の延性破壊域では、白い球状の介在物と思われる物が多く観察された。Fig.6(b)に示す伸びの高かった C では、白い球状の介在物はほとんど確認されなかった。さらに、A の破面を切断し破断面近傍を3次元レーザー顕微鏡で観察したところ、Fig.7 のような球状の微小介在物の凝集が確認できた。

これらのことから、伸びの低かったサンプル A では、摩擦圧接の過程で何らかの微小介在物の凝集が層状で発生したと推定される。微小介在物が多く存在する層状の領域で、比較的早期に延性破壊が起きてボイドが連結することで亀裂状となり、その後脆性的に破壊されたため、本来の伸びを伴って破断する前に試験片が破断したと考えられる。

次に、延性低下の要因と考えられる微小介在物の発生因子について検証を行った。

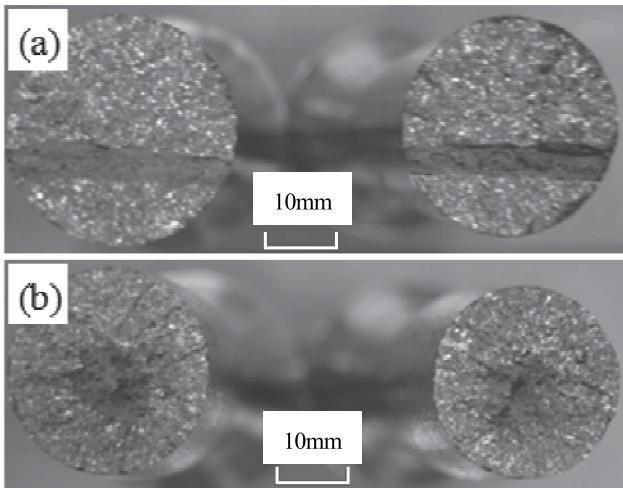


Fig.5 Photos showing fracture surface (a) sample A, (b) sample C

3.2 微小介在物発生の原因検証

今回、大径の摩擦圧接において観察された球状の微小介在物はこれまでの小径ロールでの摩擦圧接では発生していなかった。また、大径ロールの摩擦圧接時の接合部の温度が 1500°C 付近に到達しており小径に比べ約 150°C 高かった。以上のことから、球状介在物の発生には接合部の温度が影響しており、接合部の温度上昇により発生した酸化物ではないかと推定した。

そこで、SCM440 鋼材を用いて酸化物の発生を確認するための加熱テストを行った。Fig.8 に示すような幅 3mm、深さ 10mm のスリット①から③(20mm 間隔)を加工した SCM440 鋼材を試験片とした。試験片を回転させながら①が 1500±30°C で保持されるよう火力調整を行い 1 時間プロパンバーナーで加熱した。試験中

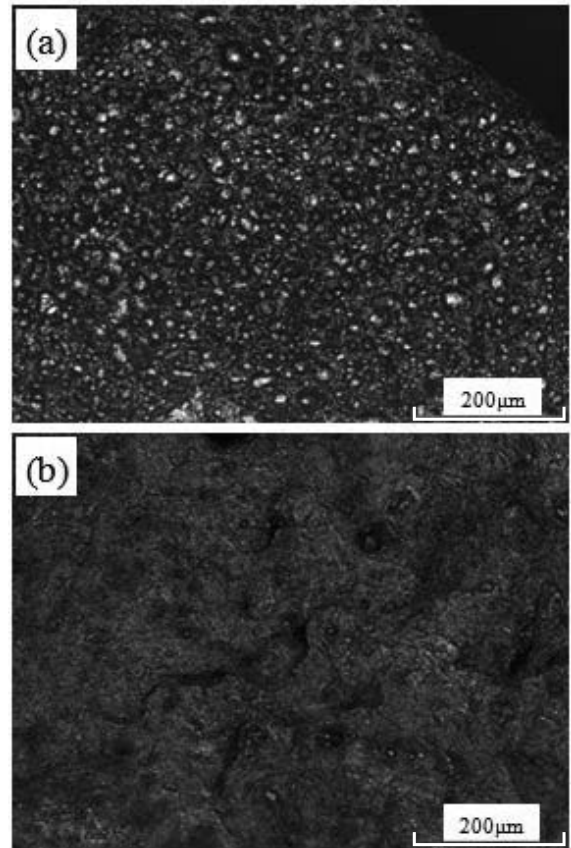


Fig.6 Photos showing macrostructures of fracture surface (a) sample A, (b) sample C

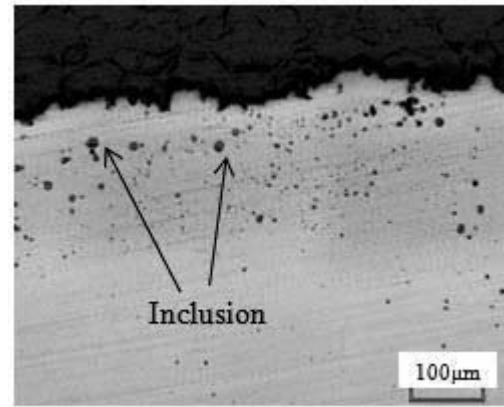


Fig.7 Microstructure showing near fracture surface of friction welding part

サーモグラフィーで①から③の温度をそれぞれ計測したところ、①約 1500°C、②約 1400°C、③約 1300°C であった。冷却後切断し①から③部分の酸化状況を 3次元レーザー顕微鏡にて観察した結果を Fig.9 に示す。約 1500°C まで温度が上昇していたスリット①付近では圧接部で確認された球状酸化物と類似したものが観察された。また、スリット付近の温度が下がるにつれて球状酸化物は確認されなかった。以上より、摩擦圧接部の温度上昇を抑えることで球状酸化物の発生を低減可能であると考えられる。

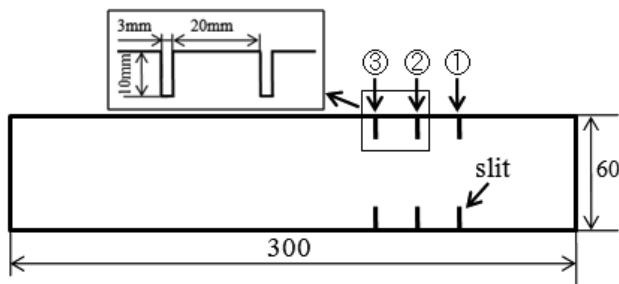


Fig.8 Schematic image showing shape of specimen for high temperature oxidation test

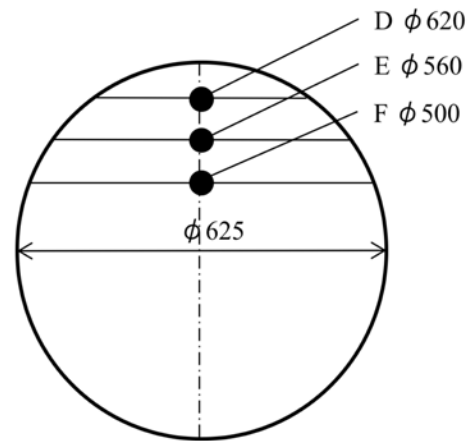


Fig.10 Sampling position of test piece

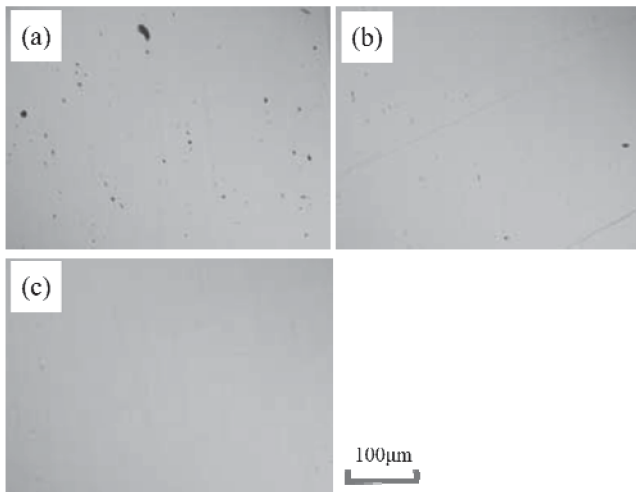


Fig.9 Macrostructures showing oxidation state (a)slit ① about 1500°C, (b)slit ②about1400°C and (c)slit ③about 1300°C

Table2 Quality and strength of friction welding part with cooling

Sample	D	E	F
Result			
Collection position (φ mm)	620	560	500
Elongation (%)	12.2	13.0	12.6
0.2% proof stress (MPa)	675	683	687
Tensile strength (MPa)	873	881	882

4. 改善条件における大径摩擦圧接での強度特性

4.1 摩擦圧接条件の改善

3章にて述べたように、圧接部の延性低下の原因と考えられる球状酸化物は接合部の温度上昇(1500°C域)により発生すると考えられる。そこで、冷却機構を備え圧接部の温度上昇を制御した(1300°C域)条件での摩擦圧接をφ625mmのSCM440材を用いて行った。圧接が完了後に、Fig.10に示す位置から引張試験片(JIS4号)を採取し引張試験を行った。その結果をTable2とFig.11に示す。外周部においても延性の低下は確認されず、接合部の温度上昇を抑えることで、延性が改善される結果となった。サンプルDの破断面をFig.12示すが、Fig5(b)で確認されたような破断面の中央に延性破断部がある延性の高い破面であった。また、サンプルDの延性破壊域と破断面近傍の切断面を3次元レーザー顕微鏡で観察した結果をFig.13示すが、微小介在物の凝集は存在しなかった。

以上の結果から、接合部の温度上昇を制御することで介在物の発生(特に細かい介在物の凝集)が抑制され、延性の低下を抑制することができたといえる。

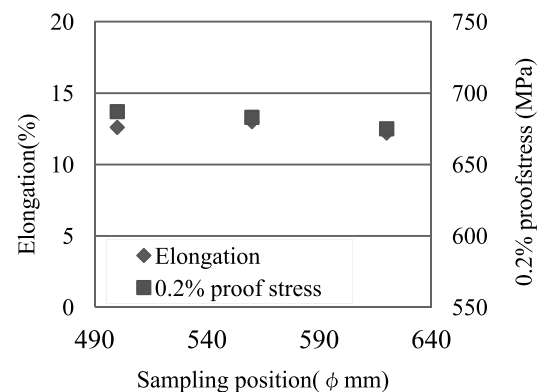


Fig.11 Relationship between tensile property and sampling position

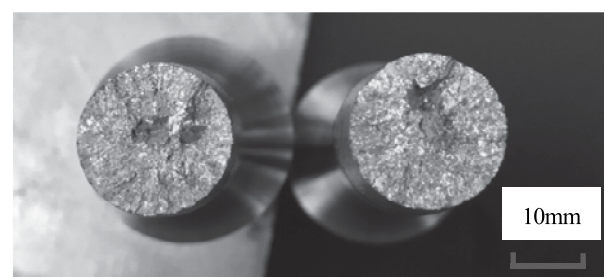


Fig.12 Photo showing fracture surface of sample D

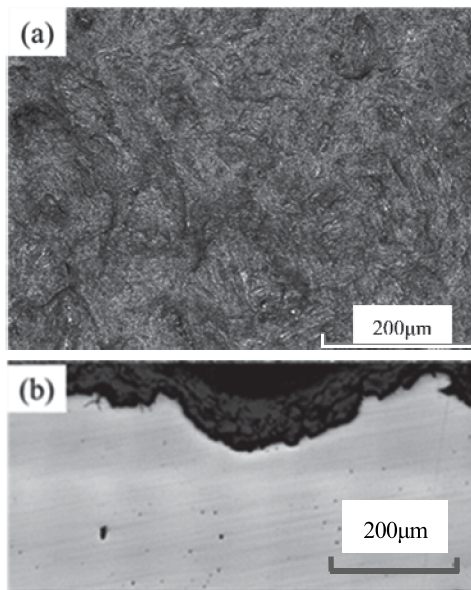


Fig.13 Observation result of 3 dimensional laser microscope (a) ductile fractured part and (b) cut surface

4.2 熱処理による組織、強度改善

最後に、大径ロールの摩擦圧接部の強度改善の取り組みの一環として、摩擦圧接後の熱処理温度が圧接部の特性に及ぼす影響の調査も行ったので報告する。

φ500mmのSCM材を用いて摩擦圧接を行った後、Fig.14に示す位置から引張試験片(JIS4号)を採集した。GからIは通常の熱処理温度、JからLはより高い温度で熱処理を行った後それぞれ引張試験を行った。試験結果をTable3、Fig.15に示す。熱処理温度を上げたJ~Lの試験片では圧接部の延性が改善されることが確認できた。

また、熱処理温度の違いによる圧接部の組織の違いをFig.15に示す。エッチングはナイトル腐食液で行った。熱処理温度が高いと圧接部が比較的均一な組織となっているのに対し、通常の熱処理温度の場合、白色の粗い組織が一部確認された。この白色組織はフェライトであり、周辺組織はベイナイトで構成されていると考えられる。なお、マイクロビッカース計にて白色部と周辺の組織の硬度をそれぞれ3点測定した結果、白色部の硬度はHV180前後、周辺の硬度はHV220前後であった。

通常の熱処理では、摩擦圧接時の温度上昇によって成長した粗い結晶粒がそのまま残存してしまい、ここでは大きな粗いフェライト相となって観察されたと推定される。摩擦圧接後により高い温度で熱処理を行うことで、圧接部は比較的均一な組織となりやすく、延性を改善する効果があったと考えられる。

Fig.17は当社独自設計の大径ロール対応摩擦圧接機と大型ワークロールの摩擦圧接状況である。本稿で述べてきたように、大径ロールの摩擦圧接技術の改善に

よって、当社では板圧延用の大型ワークロールの軸接合も可能となった。なお、製造したワークロールは実際の高圧下環境で問題なく使用され続けていることを付言する。

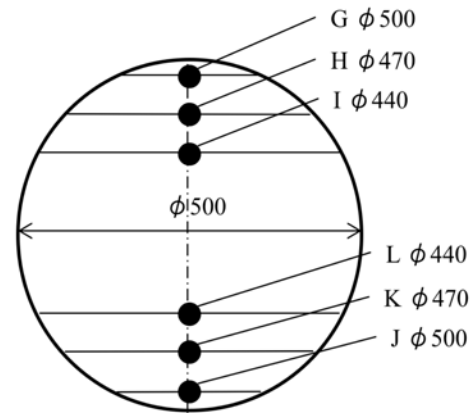


Fig.14 Sampling position of test piece

Table3 Quality and strength of friction welding part

Sample	G	H	I	J	K	L
Result						
Heat treatment temperature	Conventional			Developed		
Collection position (φ mm)	500	470	440	500	470	440
Elongation (%)	6.0	9.8	11.6	11.6	12.4	12.0
0.2% proof stress (MPa)	599	601	596	622	618	624
Tensile strength (MPa)	767	760	758	801	775	785

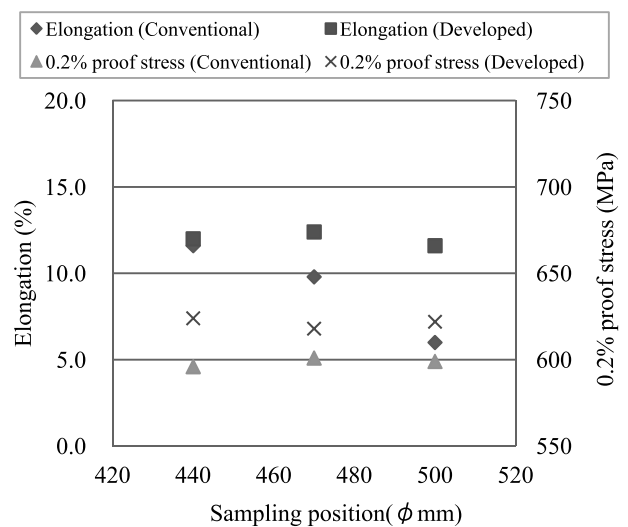


Fig.15 Relations between tensile property and sampling position on heat treatment temperature

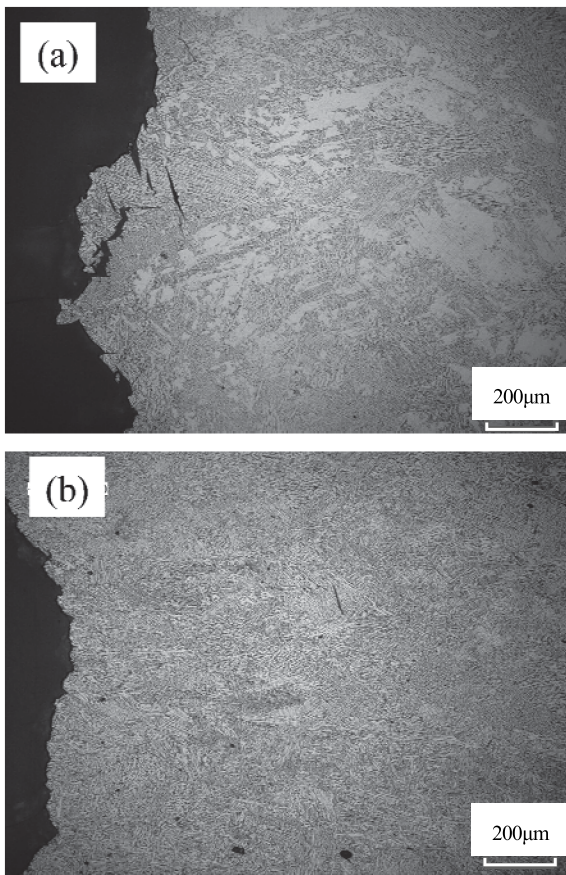


Fig.16 Microstructures of friction welded portion (a) normal temperature and (b) high temperature

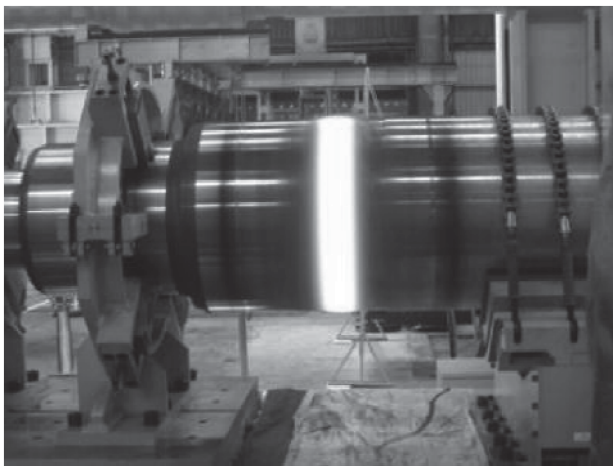


Fig.17 Photo showing friction welding of work roll for hot strip mill

5. 結言

これまでに得られた試験結果を要約すると、次の通りである。

- 1) 既に事業としてスタートしていた小径ロール(ϕ 120mm \sim ϕ 350mm)の圧接条件を、大径ロール(ϕ 500mm \sim ϕ 650mm)の圧接条件へそのまま適用したところ、圧接部外周の延性が低いという問題が発生した。
- 2) 大径摩擦圧接における延性低下の要因を検証したところ、延性の低い破面では帯状の延性破壊領域が確認された。また、このような破面では酸化物と思われる球状の介在物が多数確認された。球状酸化物が発生し凝集した個所では早い段階でポイドが連結しき裂状となることで脆性的に破壊すると考えられる。
- 3) 延性低下の要因である酸化物が発生する原因を調査するため、SCM440 で高温酸化テストを実施した。接合部の表面温度が約 1500 $^{\circ}$ Cまで上昇した場合、圧接部で観察された物と同様の球状酸化物が確認された。また、接合部の表面温度を約 1300 $^{\circ}$ Cまで制御することにより球状酸化物の発生は確認されなかった。
- 4) 高温酸化テストの結果から、圧接部の温度上昇を 1300 $^{\circ}$ C域に制御して大径摩擦圧接テストを行ったところ、圧接部の球状酸化物の発生が抑制され延性の低下を防ぐことができた。
- 5) 摩擦圧接後、熱処理を行った組織を観察するとベイナイトとフェライトの組織が観察された。そこで、より高い温度で熱処理(γ 化処理)を行うことで圧接部はより均一な組織を得ることができ、圧接部の延性の低下を防ぐことができた。

参考文献

- 1) 大野、芳谷、尾崎：フジコー技報 No.10(2002) 48
- 2) 大野、嵩、尾崎：フジコー技報 No.14(2006) 26
- 3) 木村、園田：フジコー技報 No.21(2013) 53
- 4) 園田、花田、牟、姜、永吉：フジコー技報 No.23(2015) 25