

© 1989 ISIJ

技術報告

鑄込圧延法によるステンレスクラッド鋼板の製造技術

北岡 英就*・鑑田 征雄*・川原田 昭*²
 藤井 徹也*³・奥村 健人*⁴・千貫 昌一*⁵

Manufacturing Techique for Stainless Steel Clad Plates by Enshrouding Casting and Rolling Process

Hideinari KITAOKA, Ikuo YARITA, Akira KAWAHARADA,
 Tetsuya FUJII, Taketo OKUMURA and Shouichi SENGAN

Synopsis:

Coating conditions of organic polymers on the cladding metal surface are found to form a film of suitable thickness; thus, reoxidation of the cladding metal surface and scum entrainment can be completely prevented, resulting in satisfactory bonding at the interface between cladding metal and base metal.; An effect of hot top on a remelting behaviour of the cladding metal has been investigated. The plate with low clad ratio is realized by applying the proper hot top condition. In order to achieve uniform distribution of clad ratio and flatness in the product, new rolling and levelling methods have been developed by investigating deformation behaviour during the slab and plate rollings and levelling processes of the two-layer stainless-carbon steel clad plate.

Key words: enshrouding casting; stainless clad steel; organic polymer; oxidation; solidification; deformation; rolling; levelling.

1. 緒 言

産業の発展にともない、金属材料はますます過酷な環境のもとで使用され、しかもより優れた物理的、化学的特性を要求されるようになってきた。一方では、資源の枯渇が懸念される金属の有効利用をはからねばならない。このような背景の下で、クラッド鋼は最も可能性のある機能材料の一つとして発展してきた。これにともない、クラッド鋼の製造方法も近年種々の改良が加えられてきた。しかしながら、異種金属間の良好な界面接合性を確保するために、その処理方法や製造工程が煩雑となり、クラッド鋼製造における生産性や経済性などの問題点が十分に解決されるに至っていない。そのためクラッド鋼は機能材料として一部の用途に適用されるだけであった。これらの問題を解決する方法として、製造プロセスを簡素化・効率化できる可能性が原理的に高い“鑄くるみ法”¹⁾によるクラッド鋼の製造技術に着目した。

このプロセスは、これまで接合界面の清浄化が達成できず、層間の接合性が著しく損なわれるため大規模な工業生産やステンレスクラッド鋼の製造に不適とされていた。

著者らは、接合界面の清浄化をはじめとする種々の課題を独自の技術をもって克服することにより、界面の接合性に優れた“鑄込圧延クラッド鋼の製造技術”を開発し、工業化に成功した²⁾³⁾。

本報告では、鑄込圧延クラッド鋼の製造プロセスの概要と良好な界面接合性を確保するための諸要素技術ならびに二層クラッド鋼板の圧延技術について述べる。

2. 鑄込圧延クラッド鋼の製造プロセス

新しい鑄込圧延クラッド鋼の製造技術を確立するためには、

- 1) 接合界面の清浄化
- 2) 凝固制御(合せ材の溶損防止)

昭和63年4月本会講演大会にて発表 平成元年2月10日受付 (Received Feb. 10, 1989)

- * 川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chiba 260)
- *2 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (Chiba Works, Kawasaki Steel Corp.)
- *3 川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 工博 (Iron & Steel Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)
- *4 川崎製鉄(株)水島製鉄所 (Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp.)
- *5 川崎製鉄(株)鉄鋼企画本部 (Steel Business Planning Division, Kawasaki Steel Corp.)

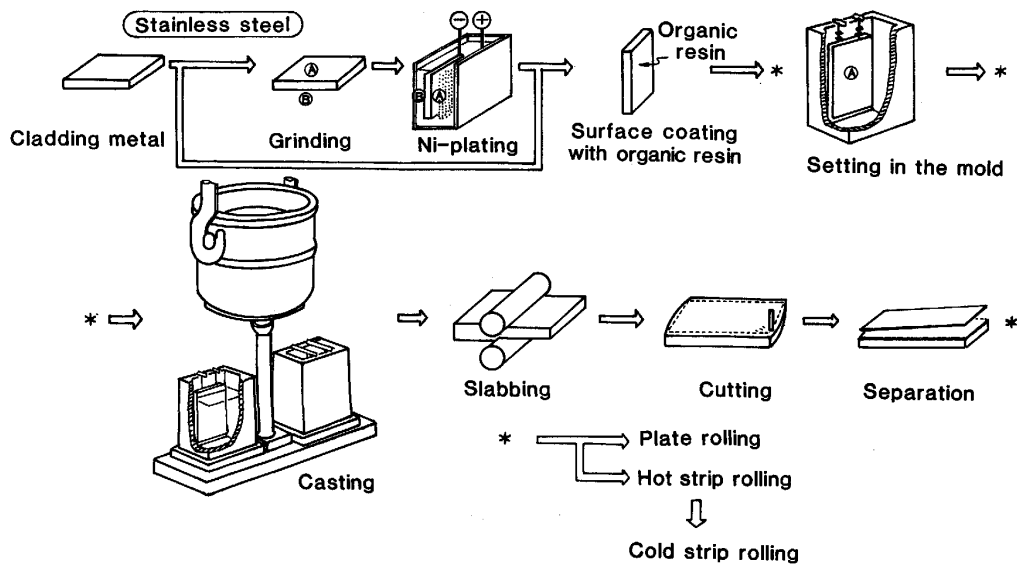


Fig. 1. Manufacturing sequence of clad steel by enshrouding cast and rolling process.

3) 高効率圧延

の三つの課題を解決しなければならない。

著者らは、これらの技術的課題を克服して 35 t の大型鋼塊で高炭素鋼やステンレス鋼を合せ材とする鑄込圧延クラッド鋼の製造技術を確立した。

製造プロセスの概要を Fig. 1 に示す。高炭素鋼合せ材は通常のグラインダーによる表面研削をした後塗布工程にまわされる。ステンレス鋼合せ材は、接合面 (A 面) を表面研磨してニッケルめっきを施した後、塗布工程にまわされる。塗布工程は、界面清浄化に不可欠な酸化防止用塗布剤を接合面 (A 面) に、また MgO を主成分とする剝離剤を剝離面 (B 面) に塗布する。酸化防止用塗布剤としては易燃性有機系樹脂を新たに開発した⁴⁾。

前処理を終えた合せ材は、所定の鑄型にセットされる。セット位置は製品のクラッド比 (合せ材厚さ/板厚) に大きな影響をおよぼす。

この工程では、注入後の接合界面において母材と吊り棒とのすきまや合せ材剝離面側の鑄くるみ部の割れ開口部よりの空気侵入による界面酸化反応を防止するために吊り棒へのシール板の取付け、適正な鑄くるみ代の確保など改善技術が適用される。

真空脱ガス処理により清浄化された母材溶鋼を、合せ材をセットした鑄型に鑄込み、複合鋼塊とする。

注入技術も界面の清浄化に重要であり、湯上がり速度や溶鋼温度および鑄型内における溶鋼の流動が適正に制御される。

このようにして鑄込まれた複合鋼塊は凝固過程で接合が始まり、分塊圧延によってさらに強化される。分塊圧

延されたスラブは、四周を切断し、鑄くるみ部を剝離除去される。その後厚板圧延または熱間圧延を経てクラッド製品となる。この工程にも均一変形を可能とする高歩留り圧延技術⁵⁾および冷却時の板反りを制御する矯正技術⁶⁾などの新技術が適用される。

3. 鑄造技術

3.1 接合界面の清浄化

従来の代表的な UT 欠陥部の断面組織を Photo. 1 に示す。界面の酸化形態は、

1) 注入時の酸化物の巻込み (Photo. 1(a)) ; 溶鋼中の酸化物が合せ材表面に付着する。

2) 注入後の界面酸化 (Photo. 1(b)) ; 凝固・冷却時に母材と合せ材界面へ空気が侵入して酸化物を生成する。

の二つに大別され⁷⁾、いずれも鑄造時の酸化に起因する。

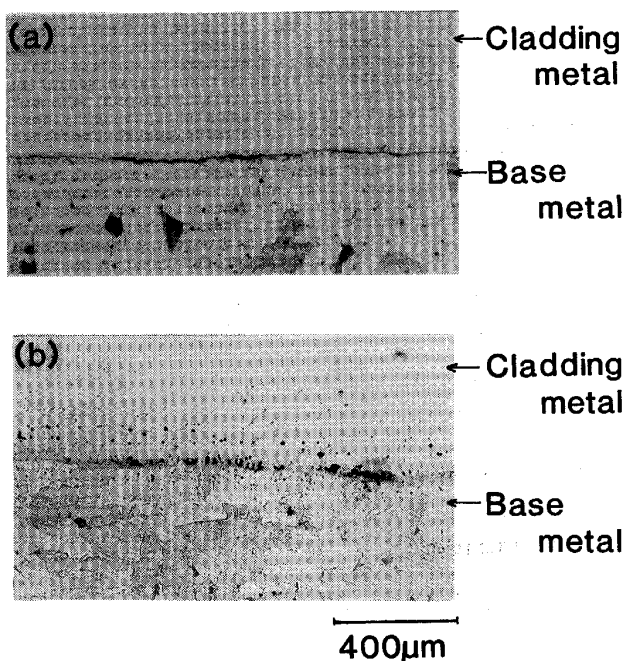
以下、それぞれの防止技術について述べる。

3.1.1 酸化防止用塗布剤の開発

合せ材表面に合成樹脂を塗布し、合せ材表面の酸化防止を図る手段は古くから提案されていた⁸⁾。しかし、優れた界面接合性を確保するために塗布剤は以下の複合機能を具備すべきである。

- 1) 鑄型内非酸化性雰囲気形成
- 2) 合せ材表面の酸化防止
- 3) ガス発生による界面への酸化物付着防止

塗布剤の選定にあたっては、エポキシ、ポリエステル樹脂などの易燃性有機系とシリコン樹脂などの難燃性有機系の塗布剤について実験室的に等温加熱曲線と分解



(a) Scum entrapped
(b) Reoxidation products

Photo. 1. Microphotographs of the defects at interlayer detected by Ultra-Sonic test.

ガス発生量を求めた。その結果、鋳型内の溶鋼表面において可燃性有機系樹脂はCO、CO₂および水蒸気に熱分解し、多量の分解ガスを発生する。これに対し、難燃性有機系樹脂はガス発生量が少ないことがわかった。

これらの知見に基づき、塗布剤の実機適用実験を行った。Fig. 2は注入開始からの鋳型内雰囲気中の酸素濃度の経時変化の測定例を示す。可燃性樹脂を用いた場合、鋳型内の酸素濃度は注入開始とともに急激に低下する。これは、塗布剤の熱分解によって多量のガスが発生したためである。注入開始前の鋳型内を不活性ガスで置換し、初期酸素濃度を低下することにより酸素濃度はさらに低減する。

3・1・2 注入時の酸化物巻き込み防止

ステンレスクラッド鋼の場合のスラブ未接合面積率におよぼす湯上がり速度の影響をFig. 3に示す。未接合面積率は湯上がり速度0.3~0.8 m/minの範囲において低く、湯上がり速度の適正範囲が存在することがわかる。

下注造塊法においては、鋼塊の表面および内部品質は溶鋼過熱度(注入温度-液相線温度)と湯上がり速度の影響が大きく、高温・低速注入が一般的である。これに対しクラッド鋼においては、塗布剤の特性から定まる条件が付加されるため、溶鋼過熱度と湯上がり速度の許容範囲は通常鋼塊と異なっている。湯上がり速度の下限は塗布剤の早期燃焼を防止するため、溶鋼メニスカス部か

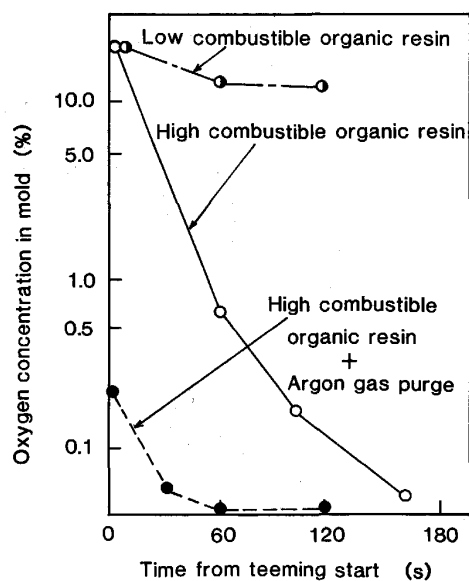


Fig. 2. Effect of resin coating on oxygen concentration in mold atmosphere.

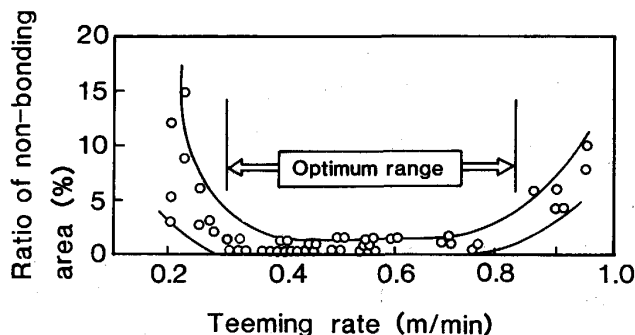


Fig. 3. Relation between ratio of non-bonding area after slabbing and teeming rate.

ら上方の合せ材表面の温度分布に支配され「塗布剤の燃え広がる速度 \leq 湯上がり速度」を満足する注入条件が重要である。一方、湯上がり速度の上限は、湯面の急激な上昇により塗布剤の効果が発揮されず酸化物の巻き込みが増加することにより制約を受ける。

3・1・3 注入後の界面酸化防止

注入後の界面酸化は、母材の凝固収縮によって生じる吊り棒と母材とのすきまおよび合せ材剝離面側の鋳くるみ部の割れ部から空気が侵入することによって起こっていることを見出した⁷⁾。

吊り棒部の導通部からの空気侵入防止については、Photo. 2に示すように吊り棒に鋼板を取り付けこの鋼板を溶着させることにより大気との遮断を図る界面シール技術を開発した。これにより空気侵入による界面の酸化物生成は皆無になり、製品における非接合面積率は

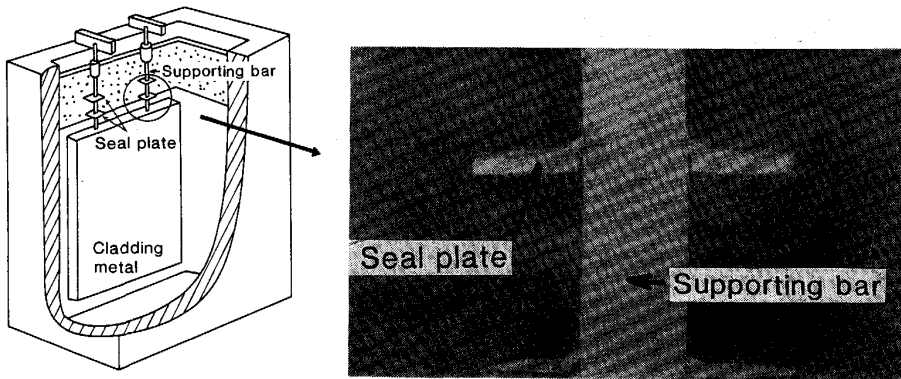


Photo. 2. Prevention method for air leak from top of ingot.

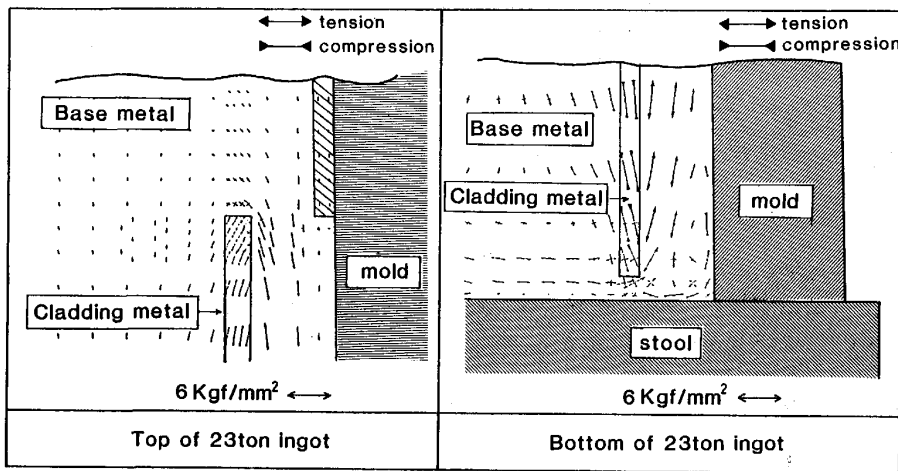


Fig. 4. Stress distribution in solidifying steel around cladding metal, obtained by numerical analysis.

One hour after teeming

幅に改善された。

一方、鑄くるみ部の割れは、母材の凝固・冷却過程での母材と合せ材の熱履歴が異なるために発生する熱応力によって生じる。割れ発生は、鑄くるみ厚さが小さい鋼塊頭部、底部で顕著である。そこで、熱弾塑性応力解析により割れ発生の可能性を検討した結果、鑄くるみ部の応力は注入完了から1 h後の鋼塊頭部と底部において最大に達することがわかった。Fig. 4にオーステナイト系ステンレスクラッド鋼塊の場合の応力分布の計算結果を示す。合せ材近傍の鑄くるみ部に大きな引張応力が発生する。これら引張応力はFig. 5に示すように鑄くるみ厚さを確保すれば緩和される。これより、引張応力が最大となる時期の母材の高温強度を考慮すれば適正な鑄くるみ厚さが決定でき、割れの発生を防止することができる。

3.2 合せ材の溶損防止

3.2.1 溶損発生機構

合せ材の溶損は歩留りの低下およびクラッド比の変化が生じ好ましくない。そこで、合せ材の溶損発生機構の解析を行った⁹⁾。

伝熱解析による注入後の母材の等凝固時間線の分布と

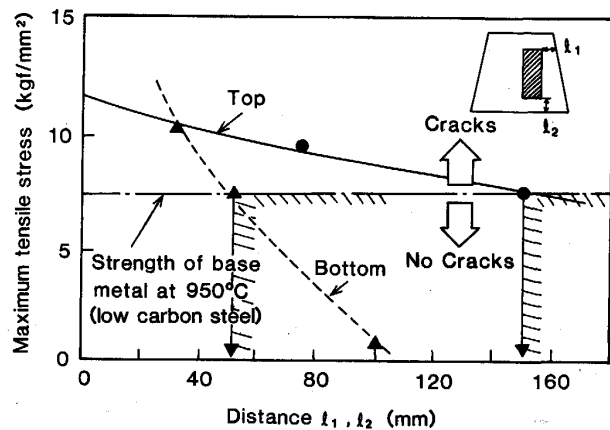


Fig. 5. Effect of position of cladding metal in mold on appearance of cracks in base metal.

合せ材 (18-8 ステンレス鋼) の頭部、中央部および底部における表面温度推移を Fig. 6 に示す。本体内の等凝固時間線は、合せ材側で密となり合せ材による断熱効果で凝固が遅れる。合せ材の温度は頭部で最も高くなり、押湯による熱負荷のため注入 15 min 後に固相線温度を超えている。このことから、合せ材の溶損は押湯部の影響を強く受けていることが推定される。

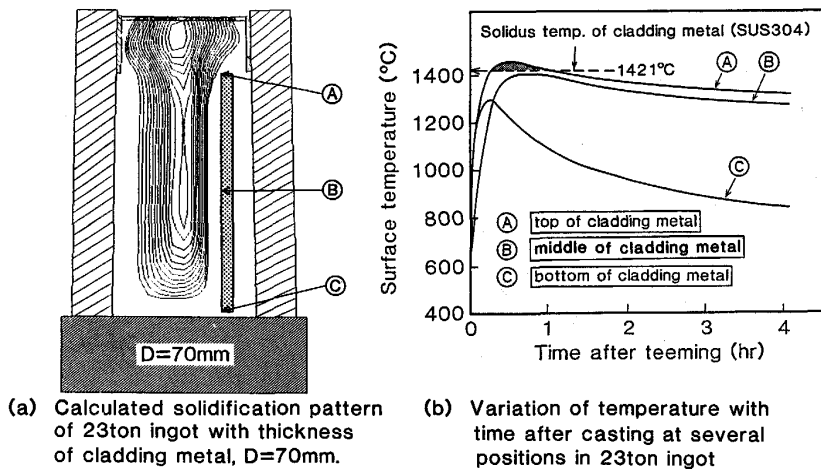
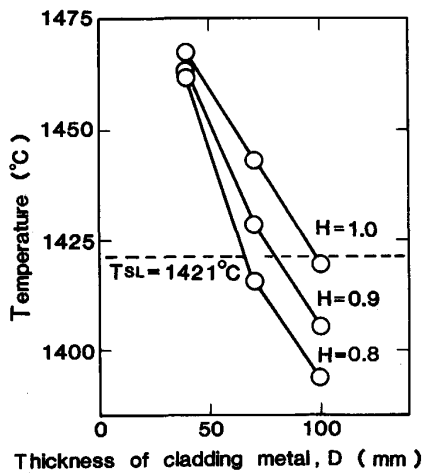


Fig. 6. Progress of solid/liquid interface after teeming and surface temperature of cladding metal with time.



T_{SL} : Solidus temperature of cladding metal
 H : Hot top ratio

Fig. 7. Influence of thickness of cladding metal on maximum temperature at surface of cladding metal.

3.2.2 押湯保温比の影響

合せ材頭部表面の最高温度におよぼす押湯保温効果の影響を Fig. 7 に示す。ここで H とは、通常キルド鋼塊の押湯比に対するクラッド鋼塊の押湯比の割合を示すパラメーターである。

表面温度は、合せ材厚さ、 D が小さく H が大きいほど高い。合せ材の溶損が固相線温度以上で発生すると仮定すれば、Fig. 7 より溶損防止のための合せ材厚さの下限値が押湯保温比別に求まる。Fig. 8 には実鋼塊における合せ材の溶損発生状況を計算結果とともに示す。実鋼塊での溶損発生と計算から求めた溶損発生領域とはよく対応している。これより、押湯保温比を適正化することにより低クラッド比（薄肉合せ材）のクラッド鋼板を溶損の問題なしに製造することが可能となった。

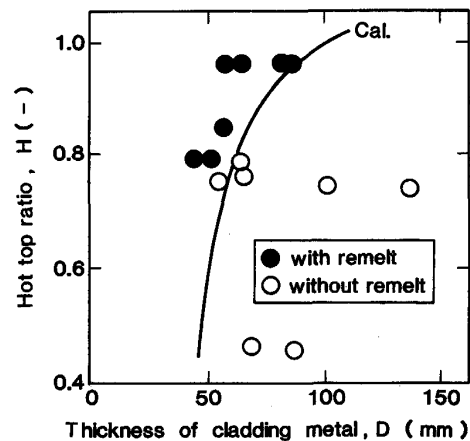


Fig. 8. Influence of thickness of cladding metal and hot top ratio on remelting of cladding metal.

4. 圧延および矯正技術

4.1 高歩留圧延

二層ステンレスクラッド鋼の圧延中の変形挙動を弾塑性有限要素法やエネルギー法による理論解析とプラスチックを用いたモデル圧延実験などにより解析し⁵⁾、高歩留圧延技術を確立した。

4.1.1 嚙抜き圧延法 (BT: Bite and Through 圧延)

従来の圧延法では母材（炭素鋼）表面層の後進により、先端部に比較し後端部では母材と合せ材との変形がより不均一となる。とくに板厚が厚い場合に顕著な母材の回り込みとクラッド比の不均一を生じ、歩留りの低下をもたらす。これに対し、BT 圧延法は Fig. 9 に示すように圧延初期の数パスにおいてスラブ長の $1/2$ 程度まで予成形圧延を行い、次パスは後端（未予成形）部より圧延を行い変形を均一にさせることを特徴とする。

BT 圧延法を分塊圧延に適用した際のスラブ長手方向

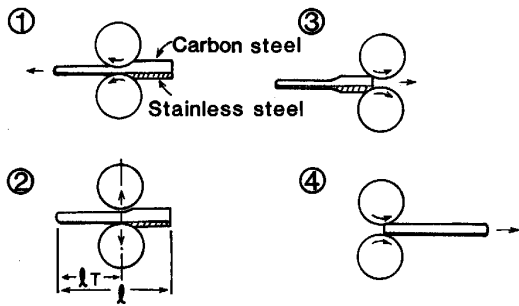


Fig. 9. Schematic illustration of the bite and through rolling method.

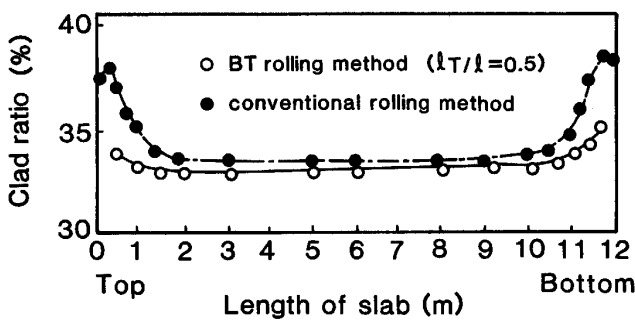


Fig. 10. Distributions of clad ratio along slab length.

のクラッド比分布を従来法と比較して Fig. 10 に示す。これより、分塊圧延時の母材の回り込み量の減少がはかれ歩留りの向上とともにクラッド比の不均一が解消され研削代的大幅低減が達成できた。

4.1.2 温度差圧延法の厚板への適用

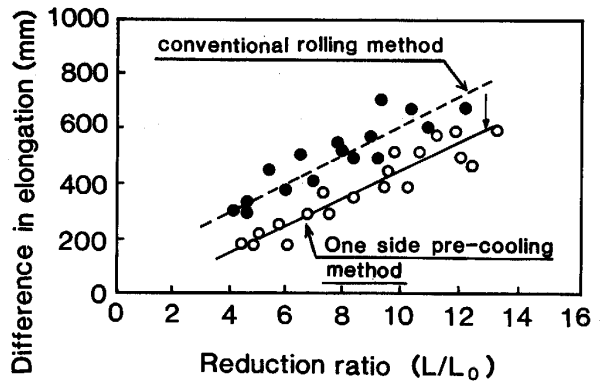
温度差圧延法は、母材と合せ材の熱間変形抵抗差に起因した母材の回り込み長さを低減するために母材側を冷却し変形抵抗の違いを小さくして圧延する方法である。

すなわち、炭素鋼側を冷却することにより炭素鋼表面から合せ材相当厚さまでの平均変形抵抗を合せ材（ステンレス鋼）の変形抵抗と一致させ、上下面に対称圧延とすることにより母材の回り込みを低減させる。この条件を達成するために必要な母材と合せ材の温度差を必要温度差とすると、これは母材と合せ材の変形抵抗差およびクラッド比により決定され、冷却速度（熱伝達係数）および冷却時間により制御ができる。

本技術を実機厚板圧延へ適用した際の効果を従来法と比較して Fig. 11 に示す。圧延方向のステンレスと炭素鋼間の伸び差が減少し、厚板圧延歩留りの向上に大きく寄与した。

4.2 拘束片面冷却矯正法

二層ステンレスクラッド鋼板は熱間圧延後の冷却時に金属の熱膨張係数差によって、熱膨張係数の大きな金属



L_0 : Plate length before rolling
 L : Plate length after rolling

Fig. 11. Difference in elongation between carbon steel and stainless steel after plate rolling by a one side pre-cooling method comparing with conventional method.

を内側にした幅方向の大きな反りが発生する。この反りは鋼板のハンドリングを困難にするだけでなく、冷間矯正の能率を著しく低下させる。この問題を解決するため熱間レベラーを用いた拘束片面冷却矯正法を開発した⁶⁾。

以下、本法の考え方、実機への適用結果について述べる。

4.2.1 本矯正法の考え方

温度 T_0 で平坦であった二層ステンレスクラッド鋼板を室温まで冷却すると、二金属の間にひずみ差を生じ熱膨張係数の大きなステンレス鋼を内側にした反りが発生する。室温においてひずみ量を両金属で同一にするためには、矯正時に熱膨張係数の大きなステンレス鋼を(1)式に示す温度 ΔT だけ低くした状態を作り出せばよい。

$$\Delta T = \frac{(a_{SS} - a_{MS}) \cdot T_0}{a_{SS}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

a_{SS}, a_{MS} ; ステンレスおよび炭素鋼の熱膨張係数
 T_0 ; 矯正直後の炭素鋼の温度

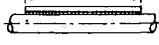
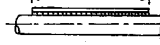
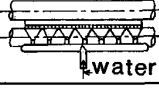
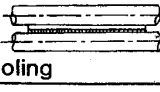
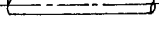

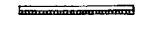

ΔT ; 矯正直後の炭素鋼とステンレス鋼の温度差

この温度差のもとで矯正時に平坦にすれば室温時の反りの発生を抑制することができる。この原理を利用した本矯正法の反り変化を従来法と対比して Table 1 に示す。

本矯正法の特徴は、

- 1) 熱間レベラーにより拘束を与えてステンレス鋼面だけ水冷し、上下面の温度差によって生じようとする収縮ひずみを打消すだけのひずみをあらかじめ与える (B 工程)。
- 2) ステンレス鋼が炭素鋼と同一温度に復熱すること

Table 1. Variation of clad plate curvature by new method, comparing with conventional method.

		New method	Conventional method
A	before levelling (hot)		
	levelling (hot)		
C	after levelling (hot)		
	after cooling (room temp.)		

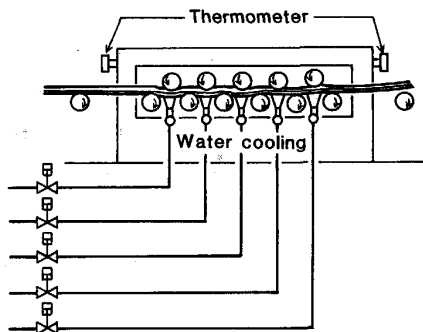


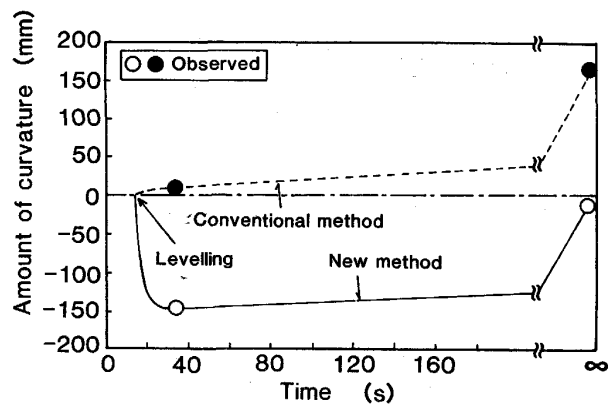
Fig. 12. Schematic illustration of a new leveller with one side cooling device.

により、ステンレス鋼を外側にした反りを発生させる(C工程)。

3) 室温に冷却後、ステンレス鋼と炭素鋼の熱膨張係数が異なることから平坦になる(D工程)である。

4.2.2 実機適用結果

厚板圧延ラインの圧延機直後に配置されている熱間矯正機内に Fig. 12 に示すような冷却設備を設置した。水冷用の5本のノズルからは総量で $210 \text{ m}^3/\text{h}$ の水を一定流量で放水する。板幅方向両端部のノズルは板幅に合わせて止水できる。また、通板速度に合わせて順次ヘッダーに通水、止水することにより炭素鋼表面への水乗りを防止している。矯正直後のステンレス鋼を外側とした適正な反り量は板厚、クラッド比などにより異なるが、冷却水量を調整し温度差を変えることによって制御可能である。本矯正法による二層ステンレスクラッド鋼板の熱間矯正後から室温に至るまでの反り挙動について理論および実験解析した結果を Fig. 13 に示す。従来法では約



Thickness : 19 mm
Width : 3 600 mm
Clad ratio : 15.8%
Levelling temperature : 500°C
Cooling time : 13.4 s
Heat transfer coefficient : $1\,100 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$

Fig. 13. Comparison of clad plate curvature after levelling by a new leveller with that by conventional leveller.

170 mm/幅の反りに対し、本矯正法では約 10 mm/幅と反り量が大幅に低減した。これにより厚物材の再矯正は不要となり、また薄物材は従来法の約 1/3 の再矯正工数となり、厚板工場におけるクラッド鋼板の処理効率が改善された。

5. 鋳込圧延法によるクラッド鋼板の生産実績

以上に述べた種々の要素技術により、経済性、品質の優れたクラッド鋼板の安定供給体制の確立および品質向上にともなうクラッド鋼化を可能とする分野の用途拡大など当初の目標を達成した。

鋳込圧延クラッド鋼板は、大量消費材のプラウ、ケミカルタンカーを主体に約 66 000 t の生産実績をもつに至っている。また最近 3 年間の年間生産量は、ステンレスクラッド鋼を主体に 7 500 t である。一方、品質面ではその優れた特性により鋼板の溶接や加工など構造物の建造コストの低減に寄与するとともに靱性および成形性向上による安全性、加工性についても高い評価を得た。

6. 結 言

鋳込圧延法によって高品質のステンレスクラッド鋼板を高歩留りで製造するために必要な要素技術について述べた。結果を要約すると、

- 1) 従来困難とされていた溶鋼-鋼片界面の清浄化を鋼片の界面処理、注入技術および凝固後の酸化防止により達成した。
- 2) 鋼片の共存下における凝固現象を解明し、鋼片の

溶損防止技術を確立した。

3) 二層鋼板の圧延および冷却挙動を研究し、均一変形を可能とする高歩留圧延技術および冷却時の板反り制御する拘束片面冷却矯正技術を開発した。

これらの技術の適用により、鑄込圧延クラッド鋼は、ステンレスクラッド鋼および高炭素クラッド鋼を主体に約 66 000 t の生産実績をもち、多くの顧客より高い評価を得た。本技術は、固相-液相の組合せの特徴を活かして新機能材料を提供する基本技術として今後ますます発展するものと考えられる。

文 献

1) A. I. CHICKANOV, M. I. LOGANOV and V. I. SHEVCHENKO :

Metallurgia, (1969) 8, p. 27
 2) K. KINOSHITA, T. EMI, A. KAWAHARADA and M. KAWANA :
 Proc. 3rd I. I. S. C (1978), p. 215
 3) 奥村健人, 中井揚一, 元田邦昭, 小林邦彦 : 圧力技術,
 19 (1981) 6, p. 319
 4) 木下勝雄, 河西悟郎, 江見俊彦, 久我正昭, 川名昌志 :
 鉄と鋼, 63 (1977), S543
 5) 蛭田敏樹, 鐘田征雄, 阿部英夫 : 塑性加工春季講演会論
 文集 (1988), p. 245
 6) 山下道雄, 吉田 博, 阿部英夫, 高島典生, 渡辺秀規
 長嶺恒夫 : 鉄と鋼, 73 (1987), A 67
 7) 石坂邦彦, 川原田昭, 北岡英就 : 材料とプロセス, 1
 (1988), p. 190
 8) R. D. PIKE : U.S Patent, No 2042800 (1936)
 9) 北岡英就, 八百 升, 藤井徹也, 川原田昭, 石坂邦彦,
 小林和子 : 材料とプロセス, 1 (1988), p. 985