

圧延クラッド材の製造技術

解説

川並 高雄*・吉原 征四郎*²

Manufacturing Techniques for Rolled Clad Products

Takao KAWANAMI and Seishiro YOSHIWARA

1. 緒言

クラッド材は異種金属を層状に接合したもので、優れた機能を持ち、かつ高い経済性を有している。現在、クラッド材生産高の90%以上はステンレスクラッド鋼板でしめられているが、その生産量でも熱間圧延ステンレス鋼材生産高の2%以下にすぎない(図1)。原因の一つとして、ステンレスクラッド鋼の経済的な効果が比較的小さいことによるのかも知れない。最近、付加価値の高い圧延チタンクラッド鋼板の製造技術が開発され、鋼の優れた強度や熱伝導性や溶接性と、チタンの高耐食性を兼備する新製品として需要の拡大が期待されている。また、さまざまな材料との複合化やサイズが多様化が進展し、併せて変形挙動に関する理論解析的な研究も盛んになってきた。

2. クラッド材の特徴

2.1 クラッド材の定義

クラッド材は、ある金属を他の金属で全面にわたり被覆し、かつその境界面が金属学的に接合している状態の材料のことである¹⁾。クラッド鋼は極軟鋼、軟鋼、低合金鋼などを母材とし、その片面または両面に母材と異なる種類の鋼またはその他の金属を合わせ材として熱間圧延、溶接、爆着などによつてクラッドさせた鋼材であり、合わせ鋼材ともいう²⁾。母材の片面に合わせ材をクラッドさせたものを片面クラッド鋼、両面に合わせ材をクラッドさせたものを両面クラッド鋼という²⁾。また、合わせ材を母材に重ね合わせて圧延し、クラッドを製造する方法を圧延法と呼び、圧延法により製造したクラッド鋼を圧延クラッド鋼と呼ぶ¹⁾。

2.2 クラッド材の用途

クラッド材はステンレスクラッド厚中板が量的に多

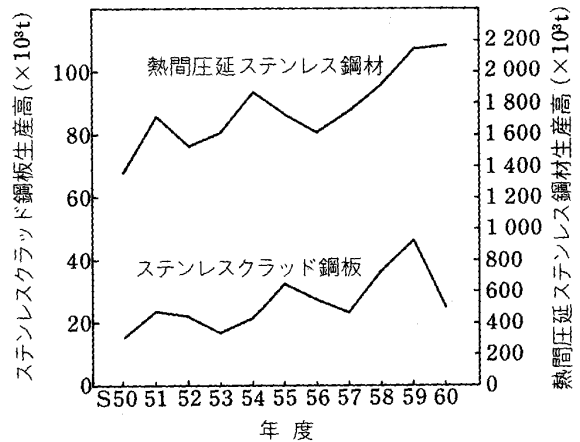


図1 ステンレスクラッド鋼板および熱間圧延ステンレス鋼材の生産高推移

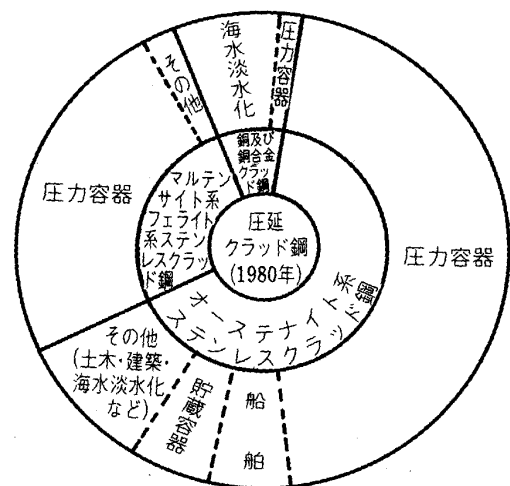


図2 クラッド鋼の利用分野別分類³⁾
(圧延クラッド鋼の例)

昭和62年7月30日受付 (Received July. 30, 1987) (依頼解説)

* 金沢工業大学機械工学科教授 工博 (Kanazawa Institute of Technology, 7-1 Ohgigaoka Nonoichimachi Ishikawa pref. 921)

*² 新日本製鉄(株)加工プロセス研究センター主任研究員 工博 (Material Forming Process Research Lab., Nippon Steel Corp.)

Key words : sandwich rolling ; clad material ; clad steel ; stainless steel ; titanium ; thermal conductivity ; weldability ; corrosion resistance ; composite material ; economy [efficiency].

く、圧力容器、貯槽容器、海水淡水化設備などの耐食性用途が主である(図2)³⁾。クラッド化による素材費の低減や切削および溶接加工費の低減などの経済的効果は、合わせ材に対して母材が安価なほど、そして母材の加工が容易なほど大きくなる。石油精製リアクタ用としての耐食性ステンレス鋼と高強度モリブデン鋼、刃物や工具としての耐摩耗性高炭素鋼と加工しやすい低炭素鋼、食品工業用加熱槽としての熱伝導率の大きい炭素鋼と耐食性ステンレス鋼、リニヤモーター用良導電材としてのアルミや銅と強磁性鋼、そして電磁調理鍋用としての強磁性炭素鋼と見映えの良いステンレス鋼などのクラッド材は複合材料としての機能を重視した用途例であり、今後ますます広がってゆくであろう。

2.3 圧延クラッド材の特徴

圧延によつて接合したクラッド材を圧延クラッドと呼び、他の製法による材料に比べて次のような特徴をもっている。すなわち、(1)製品の幅や長さが大きくできる(2)大量生産に適しコスト低減が可能である(3)素材から製品までの一貫管理が容易である(4)接合性能が安定している(5)合わせ材成分が母材によつて稀釈されないなどである。なお、爆着法、肉盛法、鑄ぐるみ法などで接合したのち圧延しても、前記圧延法の利点の一部を享受でき、これらはそれぞれ爆着圧延クラッド、肉盛圧延クラッド、鑄込圧延クラッドなどと呼ばれている。

3. 接合機構と変形挙動

3.1 接合機構

圧延クラッドは固相接合であり、金属が相互に固溶できる相互拡散と金属間化合物相を形成する反応拡散とが認められている^{4)~12)}。図3に750°Cで圧延接合したチタンクラッド鋼板接合部のEPMA線分析結果を示す。

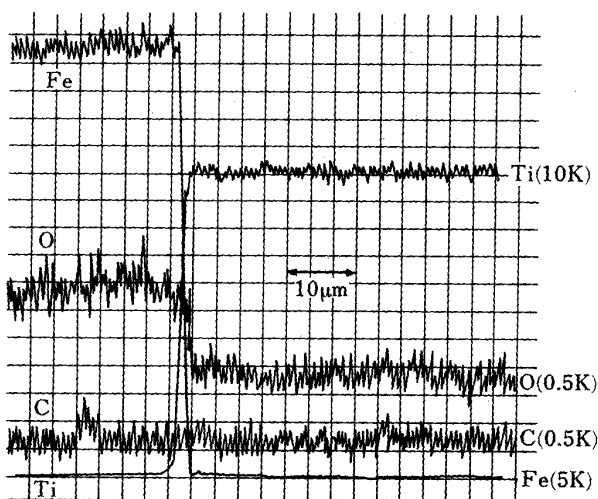


図3 チタンクラッド鋼板接合部のEPMA線分析(圧延まま)¹⁰⁾

この例ではTiとFeの極微量が相互拡散しているにすぎないが、接合強度は十分に大きい¹⁰⁾。このチタンクラッド鋼板を1000°Cで30min加熱すると、図4に示すようなTiFeやTiFe₂などの金属間化合物を含む相が接合部に生成し、接合部は著しく脆化することになる。すなわち、チタンクラッド鋼の例では相互拡散の方が反応拡散の状態よりも結果的に接合性能が安定して優れている。

3.2 反り防止技術

クラッド材の圧延時には反りが生じやすく、圧下率や形状比(=投影接触長/平均板厚)によつて反りの方向が反転するなどの複雑な挙動を示し、実験的、理論的検討が行われている^{13)~18)}。反りの原因としては圧延素材の材質、ロール径、ロール周速度などの非対称性のほかに、材料の進入角度¹⁶⁾やロールと圧延材料間の摩擦係数の影響¹⁷⁾が指摘されている。圧延時の反り防止の実用技術として、圧延素材を上下対称のサンドイッチ構造に組み立てる方法が広く行われているが、注文ロット、サイズ構成を考慮すれば限界がある。非対称の圧延材料に対して反りの生じやすい方向を下面にし、ローラテーブルによつて変形を抑制しながら圧延するやり方や、上下ロールの摩擦係数を潤滑条件を変えることによ

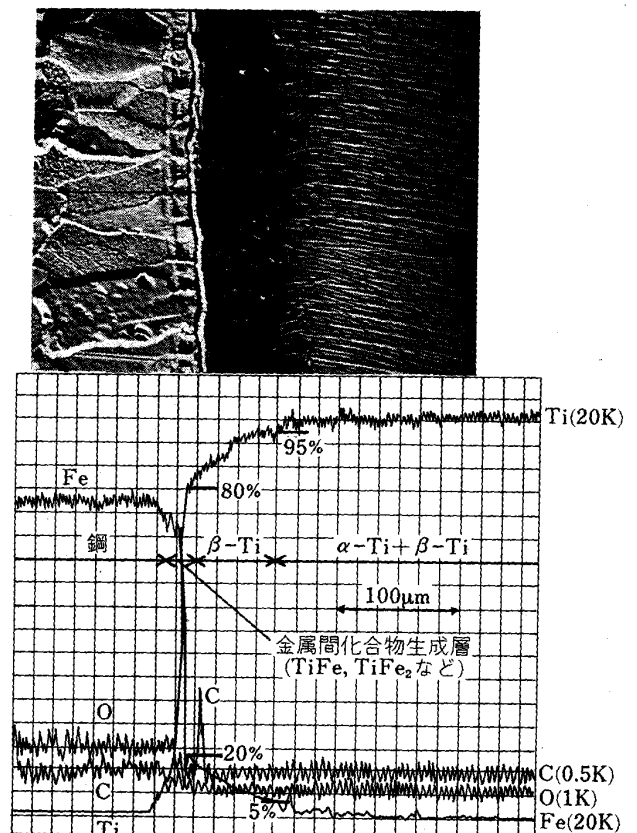


図4 チタンクラッド鋼板接合部のEPMA二次電子像と線分析(圧延接合後の熱処理:1000°C×30min)

り差違をつけて圧延する技術¹⁷⁾が発表されている。また熱間圧延後の冷却時に生ずる反りの防止法として、片面冷却矯正技術が開発された¹⁹⁾。

3.3 クラッド板厚改善技術

合わせ材と母材との圧延条件のちがいにより、圧延時のクラッド比 (=合わせ材厚さ/クラッド全厚さ) が変化する。合わせ材と母材の降伏応力差が大きいほど、両材料間の摩擦係数が小さいほど、後方張力が大きいほどクラッド比の変化は大きく、クラッド全厚みに対する軟材料 (降伏応力の低い方の金属) の厚さ比が小さくなる。とする圧着圧延における力学的特性を総合的に解析した研究¹⁴⁾や、3層クラッド材で圧延前後のクラッド比を実験的に調査した報告²⁰⁾などがある。

サンドイッチ構造の素材を圧延すると表層材と心材の変形のちがいが端部で顕著になり、精整切断時の歩留り低下の原因になっている。片面クラッド材では合わせ材となる心材の変形挙動を MEESTER ら²¹⁾の分類を参考にして図5に示す。すなわち (a) 心材の端部が厚くなるドッグボーニング (b) 心材の端部が薄くなるテーパリング (c) 心材の中心部の伸びが小さいフィッシュテール (d) 心材の厚さの変動 (e) 心材組織の不均一 (f) 心材の回転 (g) 心材の曲がり (h) 心材のウェッジ形化、(i) 心材の幅、長さ方向の変形不均一などであるが、これらの原因についての体系的な説明はいまだなされていない。

最近提案された板厚改善技術としては、サンドイッチ構造での上下板厚の同一化を狙い、圧延前まで保温カバーを用い上下面を同一温度に保つ方法²²⁾や、先後端

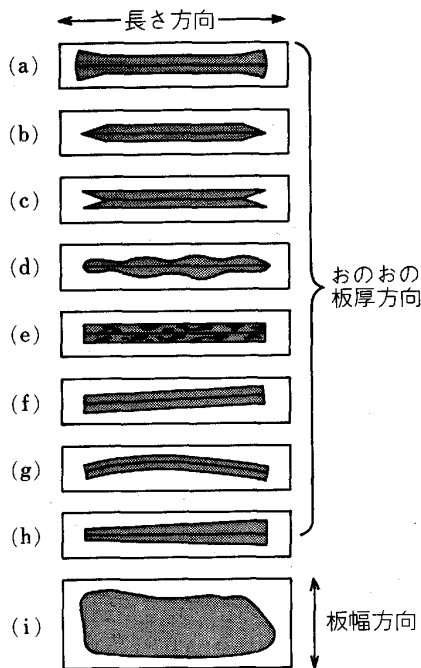


図5 サンドイッチ状素材の圧延による心材の変形パターン

における合わせ材板厚の均一化を計るため端部をテーパ状に加工する方法²²⁾や、先後端及び幅端部に発生する低変形抵抗材のまくれ込みを防止する目的で事前に予備成形する方法²³⁾などが発表され、歩留り・コスト面に大きく影響するだけにこの分野の研究開発の進展が望まれる。

4. 圧延ステンレスクラッド鋼板の製造技術

圧延法によつて製造した通常のステンレス鋼板と炭素鋼板との接合予定面を清浄にして重ね合わせ、周囲を溶接してクラッド用素材を組み立てる。この素材は製造工程中の反りや溶接部破損を防ぐために、ステンレス鋼板2枚を炭素鋼板間に挟んだサンドイッチ構造に組み立てることが多い。接合予定部にはニッケル箔を挿入して浸炭を防止する²⁴⁾²⁵⁾か、ニッケルめつきを施してステンレス鋼の酸化を防止する²⁶⁾ことが行われていたが、ニッケル中間材は必要がないとする発表²⁷⁾もある。

図6に日本高圧力技術協会クラッド研究委員会が行つた圧延クラッド鋼、爆着クラッド鋼、肉盛クラッド鋼の常温及び高温せん断試験結果を示す²⁸⁾。圧延クラッド鋼は十分なせん断強さを保有していることが分かる。図7に SUS 316 オーステナイト系ステンレスクラッド鋼の接合境界部の熱処理後の硬さ分布を示す²⁸⁾。爆着クラッドは接合部で合わせ材の硬さが高くなっており、これが図6の室温でのせん断強さが高目に変動している原因の一つであろう。

表1にステンレスクラッド鋼の十字継ぎ手引張試験結果をニッケル中間材の有無の場合について比較して示す。このように十字継ぎ手のような拘束が厳しい場合でも、ニッケル中間材の必要性が認められない例が報告さ

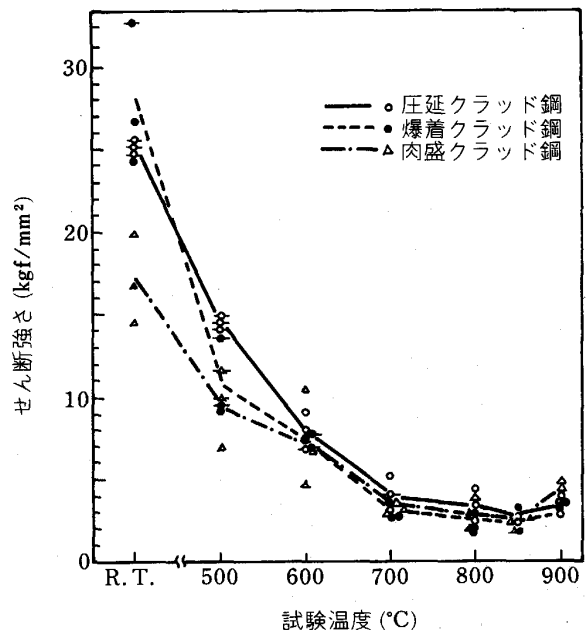


図6 各クラッド鋼の常温および高温試験結果²⁸⁾

表1 ステンレスクラッド鋼の溶接継ぎ手性能²⁷⁾

鋼材 (母材+合わせ材)	厚さ (mm)	ニッケル 中間材	側曲げ ⁴⁾ (溶接まま)	十字継ぎ手 ⁵⁾ 引張試験 (SR後)	
			r=2.0t	T.S. (kgf/mm ²)	破断位置
SB49+SUS316L ¹⁾	40+6	なし	良好	49.9	母材
		めつき	良好	49.7	母材
		箔	良好	49.9	母材
SB42+SUS405 ²⁾	17+3	なし	良好	46.0	継ぎ手
SCMV3+SUS410S ³⁾	15+3	なし	良好	62.3	継ぎ手
	29+3.5	箔	良好	56.9	接合境界

熱処理条件 (N焼ならし, T焼もどし, SR応力除去焼ならし)

- 1) 910°C・1hN-625°C・2hT-溶接-620°C・4hSR
- 2) 910°C・10minN-910°C・10minN-溶接-625°C・2hSR
- 3) 910°C・10minN-730°C・20minT-930°C・3hN-675°C・1.5hT-溶接-675°C・4.8hSR
- 4) SMAW 110~130A-24V-15cpm (合わせ材)
- 5) SMAW 170~210A-24V-15cpm

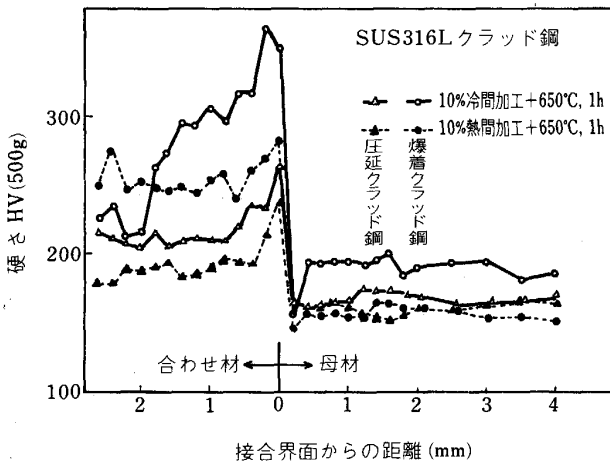
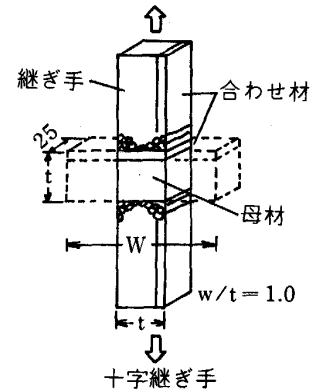


図7 SUS316Lクラッド鋼の各加工および熱処理後の硬さ分布²⁸⁾

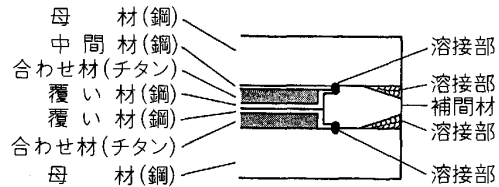


図8 素材組立構造例¹⁰⁾

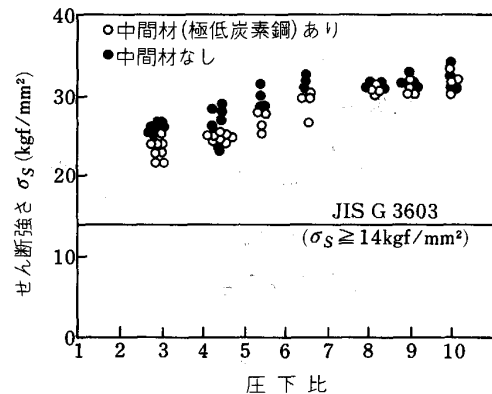


図9 接合部のせん断強さに及ぼす圧下比の影響³⁵⁾

れている²⁷⁾.

5. 圧延チタンクラッド鋼板の製造技術

圧延法によるチタンクラッド鋼板の製造技術が開発され、1986年にJIS G 3603とWES 7602 (HPIS E117)が制定された。チタンと鋼とは直接溶接できないため、チタン板を鋼材間に挟んでサンドイッチ構造に組み立て、圧延後に中央で分離する。このため中央の分離予定部に分離材(剤)を介在させるが、これが接合予定部に侵入しないように配慮しなければならない。図8に素材組立構造例を示しており、接合予定部は覆い鋼板によって密閉され、接合性能に及ぼす中間材の効果を比較評価するため上板にのみ中間材を挿入している。

圧延開始温度1000~1050°Cで最も高いせん断強さが得られるとする報告²⁹⁾があるが、共晶点(1080°C)に近く、溶融金属による不安定な製造の可能性があるので注意を要する。また圧延温度は850~900°C近傍で最も

高い接合強度を示すとする発表^{30)~32)}や、金属間化合物あるいはTiCの生成を抑制するために850°C以下が良いとする報告^{10)33)~36)}、さらに強力な圧延機での大圧下圧延が必要であるとする報告³³⁾や図9のように圧下比を3まで小さくできるとする論文³⁵⁾³⁶⁾などがある。

中間材の種類によって、接合強さの指標であるせん断強さは図10のように変化する¹⁰⁾³⁶⁾。チタンと鋼を直接接合した場合や中間材として極低炭素鋼を用いた場合には、せん断強さは高位に安定しており、中間材としてニッケル箔を挿入したり、チタン側または鋼側にニッケルめつきを施した場合には、NiTiやNiTi₂の金属間化合物とポイドを生じ¹⁰⁾³⁷⁾、せん断強さが低下している。図

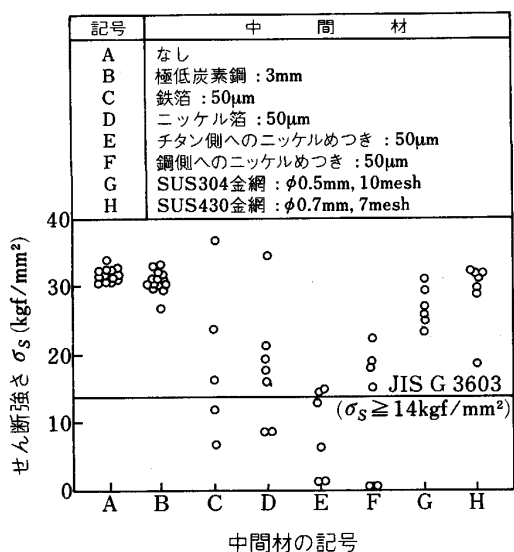


図 10 せん断強さに及ぼす中間材の影響³⁷⁾

	化学成分 (wt%)									
	C	Si	Mn	P	S	Fe	N	O	H	Ti
母材	0.104	0.191	0.682	0.017	0.007	Bal.	-	-	-	-
合わせ材	-	-	-	-	-	0.035	0.005	0.050	0.0012	Bal.

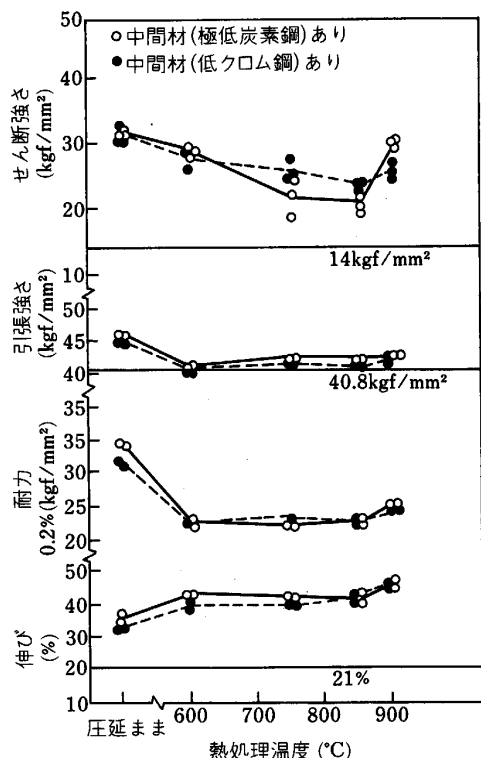


図 11 接合部の機械的性質に及ぼす熱処理温度の影響³⁶⁾

11 に示すように熱処理によつて一般にせん断強さは低下するが、Ti の β 変態点 (880°C) 以上では TiC が接合境界から拡散して、せん断値の低下が小さくなる場合がみられる³⁶⁾。製品加工の面からは鏡板の成形³³⁾³⁵⁾³⁶⁾、

表 2 接合部破壊誘起因子³⁵⁾³⁶⁾

破壊誘起因子	発生源	製造上の対策	
炭化物	TiC	<ul style="list-style-type: none"> 加工中の潤滑剤や冷却剤 鋼中の炭素 有機物 分離剤 	<ul style="list-style-type: none"> 密閉構造を採用する (図 8 参照)
金属間化合物	TiFe TiFe ₂	<ul style="list-style-type: none"> 相互拡散 共晶反応 共析反応 	<ul style="list-style-type: none"> チタンの β 変態点以上に加熱しない
酸化物	Ti _m O _n Ti ₂ O Fe _m O _n (FeO)	<ul style="list-style-type: none"> 板の汚れや酸化 破損部から侵入した空気 	<ul style="list-style-type: none"> 接合予定部から汚れや酸化物を除去する 素材組立構造を強固にする

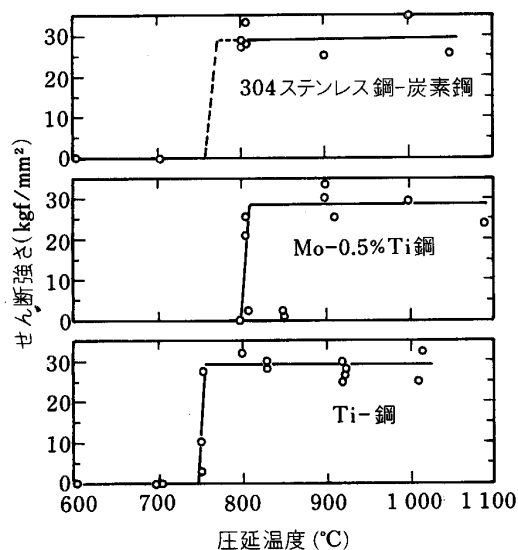


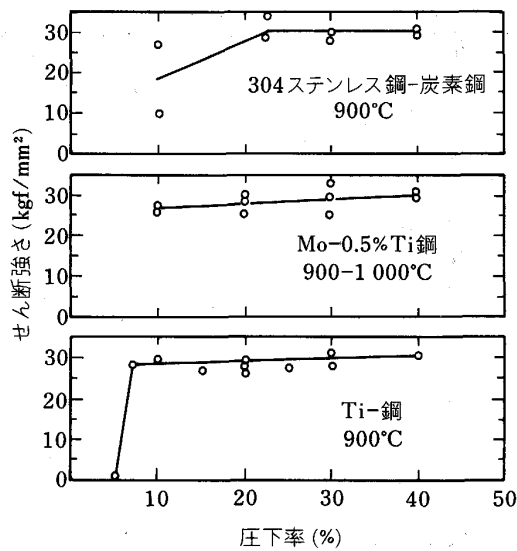
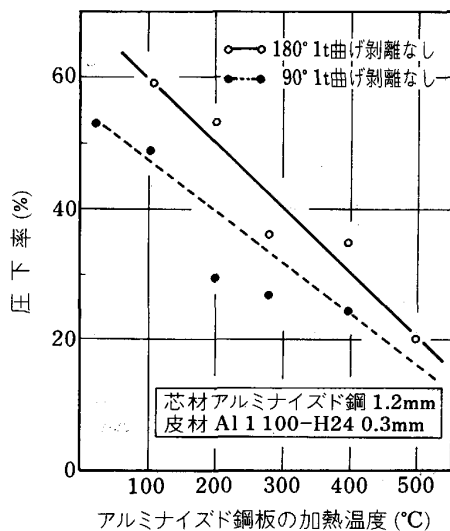
図 12 圧延温度の接合に及ぼす影響⁴⁰⁾

管板穴あけ加工、管板への管取付加工、溶接加工などいずれも良好な結果をしめしている³²⁾³³⁾³⁶⁾⁻³⁸⁾。チタンクラッド鋼では表 2 に例示するような接合部破壊誘起因子を管理して接合性能を安定させる技術³⁵⁾³⁶⁾も報告されており、厚中板のみならず薄手クラッド材の試作も始められている³⁶⁾。

6. 特殊圧延接合法

6.1 真空圧延接合法

活性金属クラッド材を真空圧延により製造する技術は、1964 年に DOLZHENKOV ら²⁹⁾がチタンと鋼、1966 年に AMONENKO ら³⁹⁾がチタンと鋼、銅とニオブ、銅とニッケル、銅と鋼、モリブデンとニオブ、クロムとタングステン、チタンとモリブデンなどの組合せについて、1980 年に BLICKENSERFER⁴⁰⁾が鋼を母材とし、銅、クロム、ニッケル、モネル、インコネル、304 ステンレス鋼、430 ステンレス鋼、モリブデン、Mo-0.5 Ti, Cb-D 36 合金、タンタル、チタン、タングステン、ジルカロイ 2 などを合わせ材とした場合について報告している。いずれも真空圧延によつて低い圧下率で強固な接合が得られることを述べており、図 12 と図 13 に BLICKENSERFER の接合

図13 圧下率の接合に及ぼす影響⁴⁰⁾図14 芯材の加熱温度と限界圧下率⁴⁴⁾

に及ぼす圧延温度と圧下率の影響の例を示す。いずれも大気圧延で知られている値よりも低い温度と圧下率で接合していることが分かる。国内でも真空圧延機が試作されており⁴¹⁾、真空装置に関する設備、制御技術の進歩と共に有用な手法として、今後ますます発展していくものと思われる。

6.2 冷間圧延接合法

薄手クラッド材の製造法として冷間圧延接合法がある。冷間圧延接合の機構は摩擦熱による凝着あるいは融着とされており⁴²⁾⁴³⁾、母材と合わせ材の間の相対すべりによる摩擦熱や変形発熱と高い圧延圧力により、金属原子が相互に拡散するに至ると言われている。

冷間圧延によりアルミ板と鋼板を接合するとき、接合界面温度は0.05 sの平均で650°C、瞬間的には1000°C

位までに達して、鉄-アルミ系の共晶温度655°Cを上回るといふ⁴³⁾。アルミめつき鋼板とアルミ板とを昇温して圧延すると、図14に示すように接合に必要な圧下率を小さくすることができる⁴⁴⁾。

また接合予定面を機械的にブラッシングして表面の活性化をはかった場合、銅板と鋼板の例では通常50~58%必要であった圧下率が23~33%で十分接合したとの報告がある⁴⁵⁾。アルミ板とアルミめつき鋼板、あるいはアルミめつき鋼板の圧延接合の場合、事前に300°Cに加熱してブラッシングする方法も発表されている⁴⁶⁾。

高圧下することにより接合界面に広範囲にわたり新生面を発生させ、かつ強固な接合を得るねらいで、プラッタ式遊星圧延機を用いて接合の評価が行われている。アルミ板と銅板およびアルミ板とアルミ板の組合せでは接合に80%の圧下率が必要であり、アルミ板とチタン板、アルミ板とSUS430板、アルミ板とSUS304板の組合せでは接合にも至っていない⁴⁷⁾⁴⁸⁾。

異周速圧延により2枚の薄板表面を摩擦力で活性化して接合する試みも報告されている⁴⁹⁾⁵⁰⁾。

7. 結 言

圧延過程でクラッド材を製造する技術は近年著しく進展し、それと共に国内における研究発表も急増し、本文で引用した文献50件の大半がここ数年内のものである。もちろん需要構造の急激な変化があつての動きであるが何よりも技術的に高度なレベルに達している板圧延技術を活用し、優れた製造面での実験手法や解析手法を縦横に駆使し得たことが今回の圧延クラッド材の早期開発成功の主原因なのであろう。それにしても現状の設備の範囲内で特殊な工程や作業をほとんど必要とせず、クラッド材の製造を可能とした意義は高く評価できる。また一方では真空圧延や冷間圧延によるクラッド材の製造研究も進められており、新しい複合材料の製造や製品の多様化が可能となりつつある。

今後は1) 素材組立法の簡易化 2) 非対称圧延法の利用 3) 最適圧延条件の整備 4) 中薄板のコイル化 5) 切断・接合技術の向上 6) 形状矯正法の確立 7) 二次加工性の評価などの実現や進展が必要であり、また、他製品以上にクラッドとしての合理的なコストの追究が要請されよう。

文 献

- 1) JISハンドブック、鉄鋼、G0601(1985)、p.1183
- 2) JISハンドブック、鉄鋼、G0203(1985)、p.51
- 3) 鉄と鋼、71(1985)、p.320
- 4) 平野賢一：日本金属学会会報、7(1967)、p.856
- 5) 平野賢一：日本金属学会会報、8(1968)、p.34
- 6) 平野賢一、一法師康武：日本金属学会誌、32(1968)、p.815
- 7) 辻 新次：日本金属学会誌、40(1976)、p.844
- 8) 辻 新次：日本金属学会誌、41(1977)、p.678

- 9) 鉄鋼便覧, 第3版, I (1981), p. 343
- 10) 吉原征四郎, 川並高雄, 鈴木堅市: 鉄と鋼, **72**(1986), p. 137
- 11) 桃野 正, 圓城敏男, 池内建二: 鉄と鋼, **72**(1986), S 1660
- 12) 野上敦嗣, 奥村直樹: 鉄と鋼, **72**(1986), S 1659
- 13) 鈴木 弘, 荒木甚一郎, 新谷 賢: 塑性と加工, **13** (1972), p. 114
- 14) 鈴木 弘, 荒木甚一郎, 饗場 誠: 塑性と加工, **15** (1974), p. 931
- 15) 木内 学, 向 四海: 生産研究, **36**(1984), p. 112
- 16) 木内 学, 向 四海: 生産研究, **36**(1984), p. 116
- 17) 浜渦修一, 上堀雄司, 山田健二, 吉田忠継, 川並高雄: 鉄と鋼, **73**(1987), A 59
- 18) 木内 学, 黄永 茂: 塑加春講論, (1987), p. 131
- 19) 山下道雄, 吉田 博, 阿部英夫, 高島典生, 渡辺秀規: 鉄と鋼, **73** (1987), A 67
- 20) 田中明弘, 告野昌史: 塑加春講論, (1984), p. 557
- 21) P. DE. MEESTER, A. DERUYTTERE and M. J. BRABERS: J. Inst. Met., **98** (1970), p. 86
- 22) 柴田光明, 森本禎夫, 大江憲一, 松岡雅典, 梶 晴男: 鉄と鋼, **73** (1987), A 63
- 23) 升田貞和, 中内一郎, 多賀根章, 山脇 満, 八子一了: 鉄と鋼, **73** (1987), A 55
- 24) 松岡 孝, 上田 仁, 上野茂次, 善永 悠: 住友金属, **35** (1983), p. 35
- 25) 中川 洋, 中村 剛, 赤坂 清, 善永 悠, 三浦 実, 古澤 遵: 住友金属, **35** (1983), p. 45
- 26) 福田 隆, 島崎正英, 一岡敏夫, 岩館忠雄: 鉄と鋼, **73** (1987), A 71
- 27) 津山青史, 須賀正孝, 多賀根章, 伊沢 徹, 松本和明, 末永博義: 鉄と鋼, **73** (1987), A 83
- 28) 稲垣道夫, 恩沢忠男: 圧力技術, **15** (1977), p. 2
- 29) F. E. DOLZHENKOV and Yu. I. KRIVONOSOV: Soviet J. Nonferrous Metals, Journal Announcement (1964), 1602 p. 65
- 30) 島崎正英, 加賀 寿, 馬場幸彦, 中島 進, 前田栄二: 鉄と鋼, **71** (1985), S 1645
- 31) 柳本龍三, 島崎正英, 加賀 寿, 中島 進, 前田栄二: 鉄と鋼, **72** (1985), S 1646
- 32) 島崎正英, 加賀 寿, 五味 均, 斉藤康信: チタニウム・ジルコニウム, **34** (1986), p. 157
- 33) 平部謙二, 津山青史, 関 信博, 多賀根章: チタニウム・ジルコニウム, **35** (1987), p. 23
- 34) 吉原征四郎, 川並高雄, 加来勝夫, 鈴木堅市, 内藤浩光: 鉄と鋼, **72** (1986), S 1658
- 35) 吉原征四郎, 川並高雄, 内藤浩光, 黒沢文夫, 加古幸博: 鉄と鋼, **73** (1987), A 83
- 36) 吉原征四郎, 川並高雄: チタニウム・ジルコニウム, **35** (1987), p. 77
- 37) 日野谷重晴, 大森靖也: 鉄と鋼, **72** (1986), S 1653
- 38) 原 修一: チタニウム・ジルコニウム, **34** (1986), p. 278
- 39) Y. M. AMONENKO, A. S. TRON', V. V. MUKHIN, N. D. RYBAL'CHENKO, and E. A. KOVALEVA: Soviet J. Nonferrous Metals, **12** (1966), p. 90
- 40) R. BLICKENSDEFER: Report of investigations-Bureau of Mines, 8481, (1980), p. 1
- 41) 本村 貢, 小島淳良: 鑄研報告, **32**(1977), p. 23
- 42) 角川清夫, 片岡 忍, 寿 憲夫: 塑加連講論, (1971), p. 477
- 43) 前田光明, 豊島清三: 鉄と鋼, **61** (1975), p. 957
- 44) 川瀬尚男, 横本 守, 高木一字, 石田洋治, 田中孝一: 日新製鋼技報, **44** (1981), p. 96
- 45) 田中英八郎, 福田武司, 山路賢吉, 吉田善一, 角川清夫: 塑性と加工, **6** (1965), p. 202
- 46) A. S. GULYAEV: Soviet J. Nonferrous Metals, **8** (1967), p. 97
- 47) 城田 透, 田頭 扶: 塑性と加工, **24** (1983), p. 53
- 48) 城田 透, 田頭 扶: 塑性と加工, **24** (1983), p. 480
- 49) 中村雅勇, 牧清二郎, 松田忠明, 永井直記: 塑加春講論, (1982), p. 73
- 50) 中村雅勇, 牧清二郎, 松田忠明, 永井直記: 塑加春講論, (1983), p. 431