

# 討19

## 熱延クラッド鋼の製造因子と諸特性

日本製鋼所 室蘭製作所 ○福田 隆, 島崎 正英, 一岡 敏夫,  
岩館 忠雄

### 1. 緒言

熱延クラッド鋼は耐食性と高い強度靱性を有した複合材であり、その高い経済性と相まって多方面で利用されている。日本製鋼所では1958年頃から熱延クラッド鋼の製造を開始し、ステンレス系のクラッド鋼から順次、2相ステンレス、ニッケル合金、銅合金と製造可能な種類を拡大し、最近では熱延方式によるチタンクラッド鋼の製造も可能になった。本報告では代表的なステンレスクラッドである316クラッド鋼と高耐食合金として今後の需要が期待されるチタンクラッド鋼をとり挙げ、これらの製造因子と接合性能について述べるとともに、実用性能としてクラッド鋼に対する溶接ならびに加工歪の影響についても言及した。

### 2. ステンレス系クラッド鋼用合せ材ならびに母材の製造

#### 2.1 合せ材の製造

熱延クラッド鋼は特別な要求がある場合を除き、比較的高い圧延終了温度から空冷された状態もしくは圧延後、焼ならし空冷処理された状態で使用される。また母材の靱性劣化の点から、ステンレスの高い溶体化温度からの焼ならしは好ましくない。この様な観点からオーステナイト系ステンレスの場合、合せ材炭素含有量はできるだけ低くコントロールされている。図1は炭素含有量=0.018%の316クラッド鋼合せ材のT.T.S.曲線を示したものである。図中代表的なクラッド鋼板合せ材部の焼ならし空冷時の冷却曲線が示されているが、鋭敏化ノーズより十分短時間側に位置しており、ミクロ組織でも炭化物の析出等は認められなかった。同様に低炭素316クラッド鋼の耐食性は950~980℃からの焼ならし処理あるいは圧延ままの状態でも316単体（溶体化処理材）と同等の耐食性を発揮できる。この様に316本来の溶体化処理を行わなくても十分な耐食性が確保できる。これは炭素化によりCr等の炭化物の析出が圧延ままの状態が無視し得るほどになることによる。

#### 2.1 母材の製造

最近、2相ステンレスやMo, Cr, およびNiの添加量の多い完全オーステナイト系ステンレスのクラッド鋼としての需要が急増しているが、これらの合金は1,000~1,100℃の高い溶体化温度がどうしても必要になる。さらにこれらの合金には、一般の炭素鋼や低合金鋼で採用される高い焼戻し温度は適用できない。これら製造の制約条件下で十分な強度、靱性を確保すべく、非調質クラッド鋼用母材を開発した。

図2は開発した母材であるLow C-Mn鋼 (Mo, V, Nb, Alの微量添加)を1030℃から冷却した場合の冷却速度、ミクロ組織および機械的性質の関係を示したものである。冷却速度45℃/minはクラッド鋼の空冷時の冷却速度に相当するが、Ceq. (I I W)が0.42以下と低いにもかかわらず、低温焼戻し(570

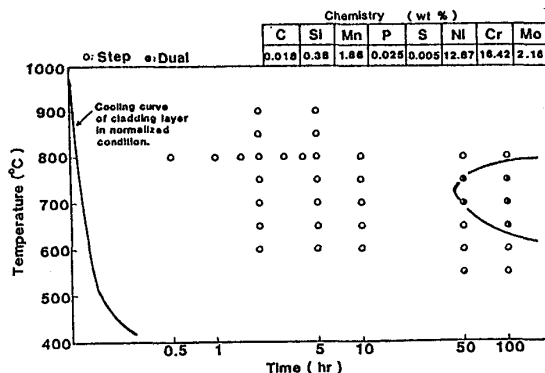


Fig.1 Time-temperature sensitization curve of 316L stainless steel (per. ASTM A262 method-A)

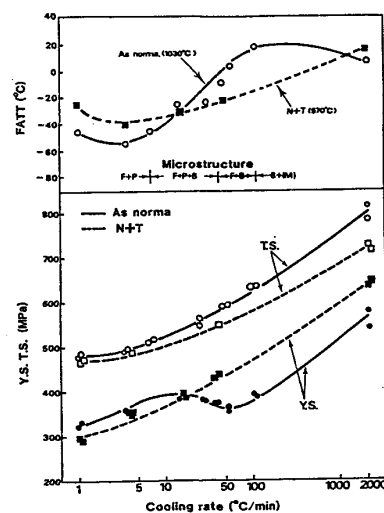


Fig.2 Relationship between cooling rate from normalizing temperature and mechanical properties

### 3. クラッド鋼の接合性能に及ぼす製造因子の影響

### 3.1 熱延チタンクラッド鋼

工業用純チタンとSS41母材間に種々の材質のインサート材を入れた組合せ体を作り、熱間圧延チタンクラッド鋼を試作し、接合性能を調査した。

### 3.1.2 界面性状と接合性能の相関

まず酸素の影響については、圧延時の真空度の低下等によって酸素汚染が大きくなると、はく離強度の低下が認められる<sup>(4)</sup>。筆者らのAES分析による調査ではチタンの界面部の固溶酸素量の増大により接合強度が低下しており、固溶酸素が拡散相（金属間化合物等）の性状に影響を及ぼし接合強度を劣化させるものと推定される。

| Intermedium     | Shear strength<br>kgf/mm <sup>2</sup> |    |    |    | Ram tensile strength<br>kgf/mm <sup>2</sup> |    |    |    | Side bend<br>(R=2,190°) |
|-----------------|---------------------------------------|----|----|----|---------------------------------------------|----|----|----|-------------------------|
|                 | 0                                     | 10 | 20 | 30 | 0                                           | 10 | 20 | 30 |                         |
| Mild steel      |                                       |    |    |    |                                             |    |    |    |                         |
| Mo steel        |                                       |    |    |    |                                             |    |    |    |                         |
| Ni sheet        |                                       |    |    |    |                                             |    |    |    |                         |
| Ni plating      |                                       |    |    |    |                                             |    |    |    |                         |
| Cr plating      |                                       |    |    |    |                                             |    |    |    |                         |
| SUS 430 sheet   |                                       |    |    |    |                                             |    |    |    |                         |
| SUS 447J1 sheet |                                       |    |    |    |                                             |    |    |    |                         |

( \* O : No crack    Δ : Micro-crack    ● : Crack )

—72—

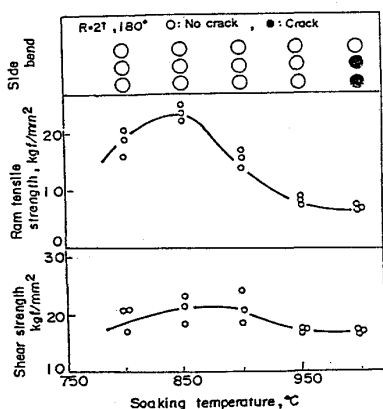


Fig. 5 Relationship between soaking temperature and bonding strength of titanium clad steel.

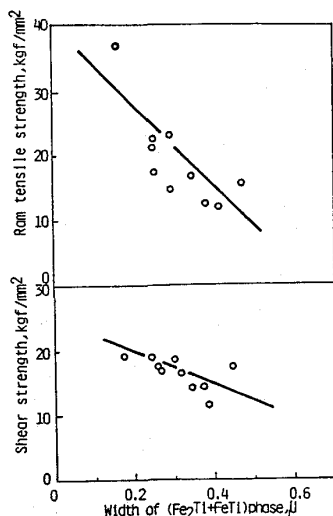


Fig. 6 Relationship between width of intermetallic compound and bonding strength of titanium clad steel.

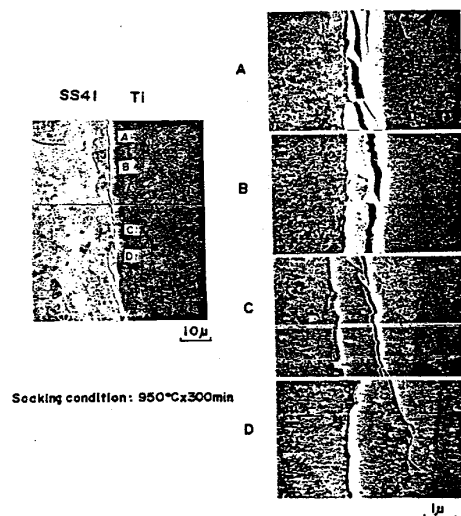


Photo. 1 Cracks observed in intermetallic compound layer of titanium clad steel.

に、金属間化合物の幅が大きくなると接合界面ノッチ部に軽い衝撃が与えられただけで瞬時にき裂が発生、伝播する。したがって図5の加熱温度上昇による接合強度の低下は金属間化合物の幅増大によるものであり、これにより写真1に示した様な接合界面の脆弱さが助長される。

3.2 熱延 316 クラッド鋼

### 3.2.1 インサート材について

一般のステンレス系の場合、インサート材としてNiメッキが有効であり多くの実績を有している。図7は温度900°Cで316クラッド鋼を種々の圧延比で1パス圧延した場合の超音波探傷による接着面積率を示したものである。予め圧延前に高温酸化処理を行なったものは処理しないものに比し当然のことながら接着率は低い値を示し、またいずれの条件でもNiメッキを施したものは無処理に比し低い圧延比で高い接着率を示す。この様にNiメッキはステンレスの酸化を防止する上で有効であり、さらに圧延時の界面の変形、密着が容易になり接着率の増大に寄与する。ただ酸化の影響が小さく完全な接着が行なわれた場合はNiメッキなしの方が逆に若干高い接合強度を示すことがあり、さらに炭素鋼母材からステンレスへの侵炭防止には、Niメッキの効果は顕著ではないが、工業的にはNiメッキははく離防止上有効であり今後とも適用鋼種の拡大が期待される。

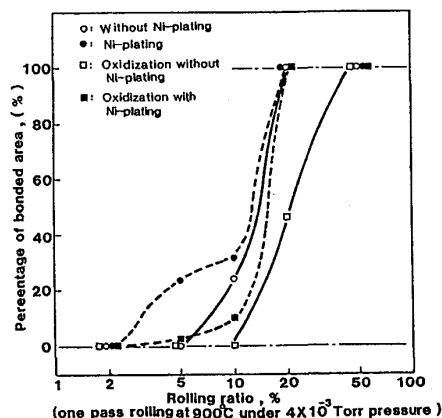


Fig. 7 Effect of nickel plating on percentage of bonded area.

### 3.2.2 界面性状と接合性能の相関

図8は多パス圧延した場合のNiメッキ処理した316クラッド鋼の界面の酸化物の総和から計算した接合率と接合強度の相関を調査したものである。接合率が增大すると(酸化物量が減小する)せん断、はく離強度いずれも増大し、せん断強度は約50%以上の接合率で飽和に達する。一方はく離強度は接合率の影響を大きく受け、約90%の接合率になってはじめて飽和に達し、その値はせん断強度の約2倍になる。図9は20%の一定圧延比で1パス圧延した場合のNi拡散層幅と316クラッド鋼(Niメッキなし)の接合強度の関係を示す。拡散層の増大とともに接合強度は上昇し、せん断強度の場合約15 μmで、はく離強度の場合約25 μmでほぼ飽和に達している。この様に1パス圧延しただけの比較的軽微な拡散で十分な接合強度の得られることが判る。さらに図8、図9両図から、はく離強度は界面の性状の影響

を受け易いが、せん断強度はその感受性が鈍いといえる。

3. クラッド鋼接合部の実用性能について  
クラッド鋼が実用に供される場合には成形加工歪や溶接熱を受けることになるためこれらの影響を把握しておくことは重要である。

図10は図8で定義される接合率を変化させた2種類の316LNクラッド鋼の接合強度と接合界面の室温のK値を示したものである。接合率の低い方(75~78%)

でも十分な接合強度を有しており、その溶接継手の引張試験では接合界面以外から最終破断しており溶接によるはく離強度の低下は極めて少ないと考えられる。接合界面のK値は疲労予備き裂を入れた場合の試験値を示しているが、接合率の違いがK値の変化として大きく現われている。接合強度が図10の溶接継手の様に設計強度として重要な役割をもつ場合にはK値による評価は有益と考えられる。討論会では溶接熱影響の無い場合の界面のK値も提示し討論される予定である。次に加工歪の接合強度に及ぼす影響は316とチタンクラッド鋼では傾向が異なる。すなわち316クラッド鋼では加工率の増大にともない、歪硬化の影響によりせん断強度は上昇する傾向にあるが、チタンクラッド鋼の場合表1に示した様にヘッド加工前に比し加工後はせん断強度、はく離強度いずれも低下する。

#### 4. 結言

界面特性の異なる2種のクラッド鋼を試験材としてとり挙げ下記の点を明らかにした。

- (1) 適正な製造条件を選ぶことにより十分な接合強度と実用性能を有する熱延チタンクラッド鋼の製造が可能である。
- (2) 316クラッド鋼は接合率、拡散層のいずれの増大も接合強度を高めるのに対し、チタンクラッド鋼は拡散層(金属間化合物)の増大にしたがい、接合強度は低下し、またチタン側の固溶酸素量の増加にともない接合強度は低下する。
- (3) せん断強度よりはく離強度の方が界面性状の変化に対して敏感であり、さらにK値による評価の方がよりいっそう界面性状の変化を拡大してとらえることができる。

#### 5. 参考文献

- (1) M.Hansen : Constitution of Binary Alloys, McGraw-Hill Book, 1958
- (2) R.P.Elliot : Constitution of Binary Alloys, McGraw-Hill Book, 1965
- (3) 大橋他 : 溶接学会論文集, 3-3 (1985) P.477~483
- (4) 加賀他 : 鉄と鋼, Vol 71 (1985) S1646

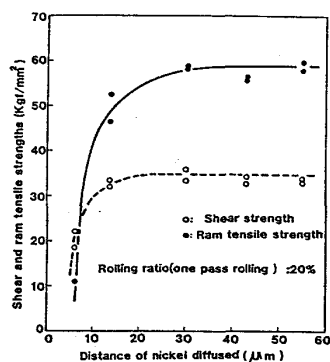


Fig. 9 Relationship between distance of nickel diffused and bonding strength of 316L clad steel.

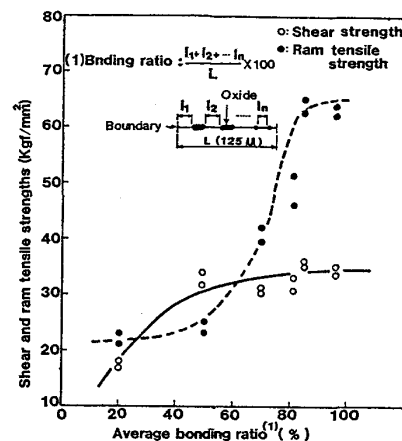


Fig. 8 Relationship between average bonding ratio and bonding strength of 316L clad steel.

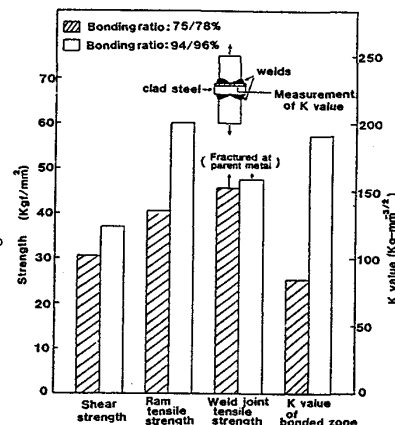


Fig. 10 Effects of bonding ratio and welding heat on bonding strength and K value of 316LN clad steel.

Table 1 Bonding strength of 2:1 ellipsoidal head made of titanium clad steel.

| Location of test specimen | Titanium clad steel                                    |                                                              |
|---------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
|                           | Shear strength <sup>(1)</sup><br>(Kg/mm <sup>2</sup> ) | Ram tensile strength <sup>(1)</sup><br>(Kg/mm <sup>2</sup> ) |
| Before cold worked        | 23.6                                                   | 21.8                                                         |
| After cold worked         | Flange                                                 | 17.0                                                         |
|                           | Knuckle                                                | 17.2                                                         |
|                           | Crown                                                  | 19.3                                                         |

(1) Average of three test specimens