

る。測定については當時の學生石川好郎君の助力に依るところ多く、謝意を表す。(昭和 26 年 10 月寄稿)

文 献

- 1) 森, 松下: 昭和 24 年 10 月本會講演大會にて講演, 本誌に投稿中
- 2) 森, 松下: 昭和 26 年 4 月本會講演大會にて講演 本誌に投稿中
- 3) Kuan-Han Sun: Glass Ind. 29 (1948) 73
- 4) 澤井著; 「ガラスの化學と工學」, 285
- 5) M. L. Huggins, Kuan-Han Sun: J. Phys. Chem., 59 (1946) 319
- 6) K. Endell, H. Hellbrügge: Angew. Chem., 53 (1940) 271
- 7) M. Rey: Disc. Farad. Soc., (1948) 4, 257
- 8) M. Rey: Rev. Mét., 46 (1949) 849

不銹鋼合せ鉄の研究 (Ⅱ)

(合鉄の諸性質に及ぼす加熱の影響)

(昭和 25 年 9 月本會講演大會にて講演)

阿部 富美夫*・木村 熊太郎*・齋藤 利生*

STUDY OF THE STAINLESS CLAD STEEL (II)

(EFFECT OF THE HEATING ON THE VARIOUS PROPERTIES OF CLAD PLATE)

Fumio Abe Kumataro Kimura and Toshio Saito

Synopsis: On the view point of the manufacture and the practical use of the stainless clad plate, the authors studied the effect of heating on the various properties of clad plate. The results of experiments and considerations, were stated as follows:—

When the stainless clad plate was heated, various alloy elements in the contact face of both metals were diffused, and their diffusion increased as the temperature rises and the holding time increased.

In case the clad plate was heated at temperature above 800°C, the alloy layer was made at the contact face by diffusion of elements. Once the alloy layer was presented, the binding strength of both metals was decreased. Therefore, the heating at high temperature must be avoided.

Moreover, by travelling of the carbon in the mild steel to the stainless steel by diffusion, the corrosion resistant property of the stainless clad was presumed to be inferior. Then, the heating at high temperature must be avoided and the lower carbon content in the base metal was found of advantage.

The deflection produced in the clad plate by heating increases as the temperature rose and as the clad thickness increased. Specially, the deflection increased suddenly at about 800°C, because of the transformation contraction in the mild steel.

When the clad plate was utilized at parts where the deflection by temperature change was remarkable such three layer clad plate must be selected which had same clad thickness at surface and bottom.

I. 緒 言

不銹鋼々鉄の使用部位としては常温のみならず熱交換器, 煮沸釜等高温で用いられるものも多い。かゝる高温部位に不銹鋼合せ鉄を利用する時は接着強度や曲りの問

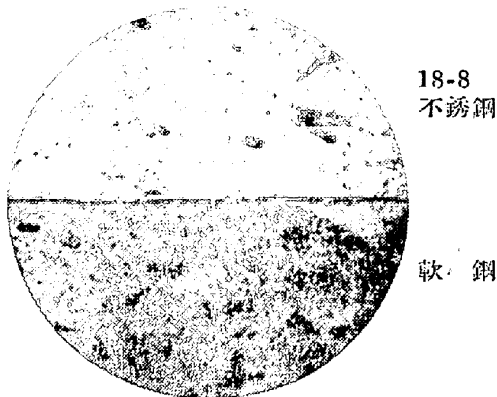
題が當然懸念される處である。従つて不銹鋼合せ鉄の利用上から合鉄の諸性質に及ぼす加熱の影響を確めることにした。

* 日本製鋼所室蘭製作所

II. 境界面の拡散に及ぼす加熱の影響

先づ接着に重要な役割を演じている境界面に於ける擴散について調べてみた。

1. 境界部の顯微鏡的觀察：不銹鋼合せ鉄境界部の顯微鏡組織の一例は寫眞第1の如くである。炭素鋼同志の境界では擴散により境界は見えなくなるが、不銹鋼合せ鉄では境界は判然としている。



18-8 不銹鋼
軟鋼
10% クロム酸電解腐蝕後
3% Picral 腐蝕
壓延の儘 ×150 (2/3 縮寫)
寫眞第1 境界部組織

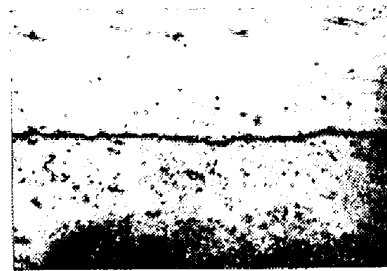
寫眞第1の試料の腐蝕は電解に依つたもので10% クロム酸溶液中にて不銹鋼單獨の鉄を陰極とし、研磨した合せ鉄を陽極として電解すると18-8だけが腐蝕され軟鋼は侵されない。之を爾後ピクリン酸溶液等にて普通に腐蝕すれば寫眞第1の如く兩者の組織が見られる。ピクリン酸曾達で煮沸しても兩者の組織は見られるが、境界面が著るしく腐蝕される爲接着状態等の詳細を調べるには適當ではない。ピクリン酸や硝酸の溶液で腐蝕したのでは勿論軟鋼側の組織だけしか得られない。

合せ鉄を加熱後境界部の状態を調べた結果は寫眞第2の如くで、加熱温度の上昇に従つて境界面は凹凸多くなり不整となつてくる。高倍率で境界面の凹凸部を觀察すると寫眞第3の如く、軟鋼地え不銹鋼成分の擴散移行と不銹鋼地えフェライトの擴散移行との兩者が認められる。

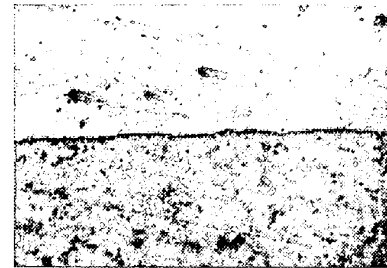
2. 擴散の測定：前述の電解腐蝕を強過ぎない様に適



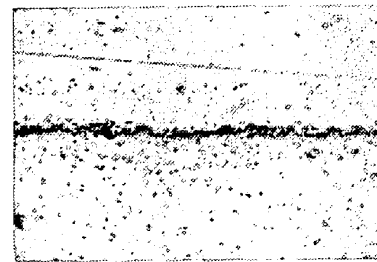
壓延儘
寫眞第2 (1) 2/3 縮寫



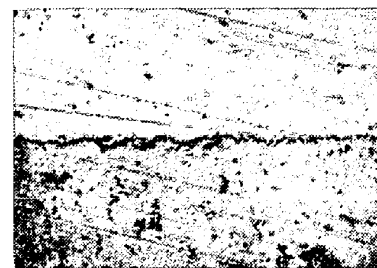
600°C × 30 分 空冷



700°C × 30 分 空冷



800°C × 30 分 空冷

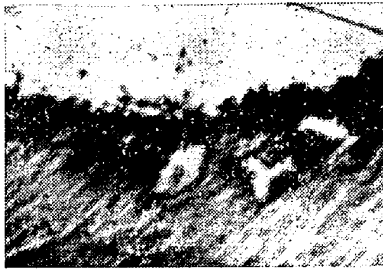


900°C × 30 分 空冷

寫眞第2 (ロ) 境界組織に及ぼす温度の影響
× 150 (2/3 縮寫)
3% Picral etch

當に行うと寫眞第4に示した如く擴散の模様を知ることが出來、且つその深さを顯微鏡により測定することが出來る。寫眞第4は壓延後 900°C に 30 分加熱した試料で擴散層は次の三層に分けて考えられる。即ち直接境界部に見られる腐蝕されない白色の細い層、その不銹鋼側の黒色に腐蝕された層及オーステナイトの結晶境界が強く腐蝕されている層との三者である。

第1の層は不銹鋼中の合金成分が擴散して境界部に合金層を造るものと思われる。第2、第3の層は軟鋼中の炭素が不銹鋼中に擴散して出來たもので、不銹鋼の炭素が高いと所謂粒間腐蝕の現象を生ずるが之の第3の層に

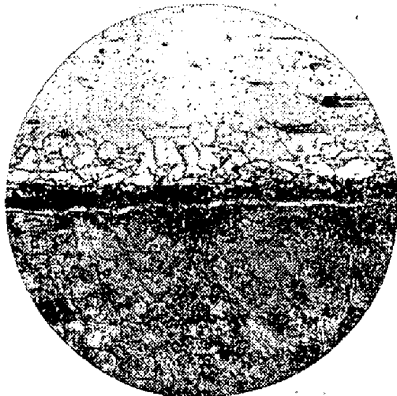


Ferrite 地え合金成分の移行



不銹鋼地え Ferrite の移行
3% Picral etch

寫眞第3 境界部の擴散
×1500 (2/3 縮寫)



不銹鋼

粒界擴散層
粒内擴散層
合金層

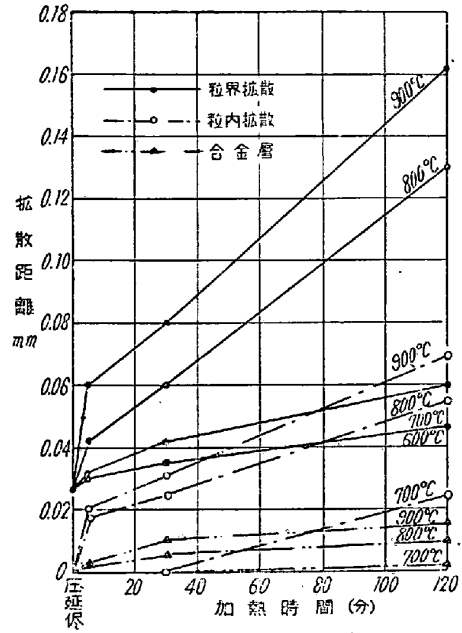
脱炭層
軟鋼

10% クロム酸電解腐蝕後
5% Nital 腐蝕
900°C×30分 空冷 ×150 (2/3 縮寫)
寫眞第4 加熱後の擴散組織

炭素が粒界擴散をした結果耐蝕性が低下したものである。第2の層は炭素の擴散が多く結晶粒内迄擴散が侵透しているものである。

各温度に加熱した合鉄試料の境界部を電解腐蝕して顯微鏡により各層の深さを測定した結果は第1圖の如くである。此の測定結果によると各擴散層は加熱時間に比例して略々直線的に増加するが、600°C以下では合金層及粒内擴散層は全然現われず粒界擴散だけしか認められない。700°Cでも短時間の加熱では現われず2時間の加熱で始めて此の3層が現われている。

粒界擴散は加熱時間と共に急激に増加して居り、擴散が著るしく進んで不銹鋼中の炭素量が増加すると粒間腐蝕が多くなり耐蝕性を低下することとなる。従つて此の



第1圖 18-8 不銹鋼に於ける炭素の擴散

點から母材の炭素量はなるべく低い方がよい。現在の製品では不銹鋼クラッド厚は1mmを標準としているから、軟鋼中の炭素が擴散して不銹鋼クラッドの表面迄現われて耐蝕性を低下せしめる迄の時間を計算してみることにする。

第1圖の測定結果から18-8不銹鋼中に於ける炭素の擴散恒数を先づ計算する。vを擴散原子の平均移動距離(cm), tを加熱時間(day)とすると擴散恒数Dは次式で現わされる。

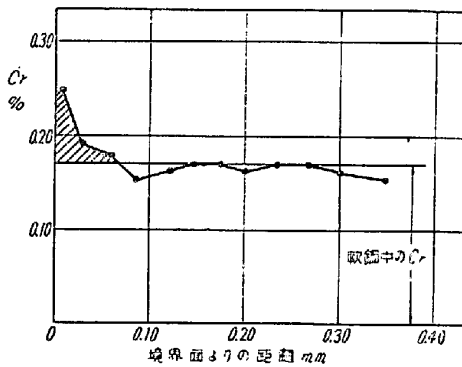
$$D = v^2 / 2t$$

900°Cに2時間加熱した場合の粒界擴散深度(壓延状態で擴散している深さ0.026mmを減じた値、0.136mm)からDを求めると $110.8 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{day}$ となる。此の擴散恒数の値からvを1mmとして上式によりtを求めると1.7dayを得る。即ち900°Cに1.7日間加熱すると厚さ1mmの不銹鋼クラッド全體に炭素が擴散し耐蝕表面も著しく耐蝕性を減ずると云うことになる。實際上は900°Cに40時間も加熱すると云うことはないから炭素の擴散による耐蝕性の低下については先づ顧慮する必要はないが、合鉄を壓延後再加熱する場合には斯る點にも一應の注意を要するであろう。18-8鋼中に於ける炭素の擴散に関する實驗は見當らないから、純鐵中の炭素の擴散恒数と前述の結果とを比較すると筆者の測定した18-8不銹鋼中の炭素の擴散恒数は鐵

1) W. Seith: Diffusion in Metallen, 1939. Berlin, 橋口譯: 丸善. 昭17

中の擴散に比べて著しく擴散が少ない。之は不銹鋼中にはニッケル、クロム等の元素が固溶して居る爲擴散抵抗が大きく、鈍鐵中よりは當然擴散は少ないであろう。然し筆者の場合は濃度勾配の小さい場合の測定を行つてゐるから多少の誤差は免れないであろう。

次に軟鋼中へのニッケル及クロムの擴散を分光分析により測定してみた。壓延の儘の試料では擴散は全然測定出来ない程度であるが、クロムの場合 900°C に2時間加熱した試料では第2圖の如く擴散が認められる。本材の軟鋼中にはスクラップから混入したクロム 0.18% を有するが、境界面近くで 0.18% 以上のクロム量を示している處は加熱により不銹鋼より擴散して來たものと考えてよい。ニッケルの線は詳細に調べてみたが定量出来る程の黒度の差はなく擴散は測定出来なかつた。従つてニッケルはクロムに比べて擴散は極めて少ないことが判る。



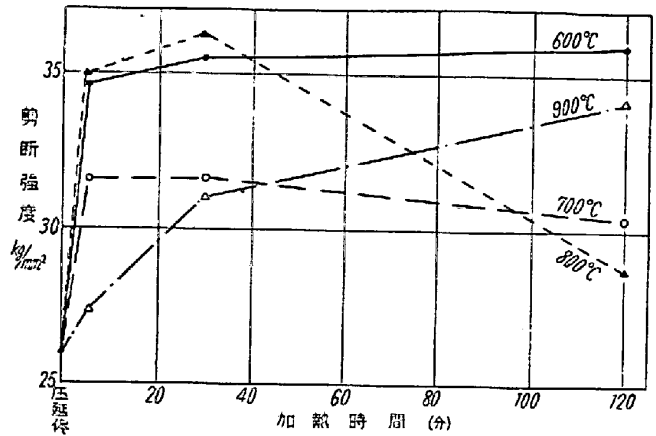
第2圖 軟鋼中の Cr の擴散
900°C × 2hr 空冷

以上の擴散實驗の結果から境界部に於ける擴散は炭素が最も著しく、クロムが之に次ぎ他は殆んど認むるに足るものはなかつた。而して炭素の擴散は不銹鋼の耐蝕性にも關係することであるから壓延後に於ける 1000°C 以上の長時間の加熱は望ましくない。且つ母材の軟鋼中の炭素量もなるべく低い方が安全である。

III. 接着強度に及ぼす加熱の影響

合鉄壓延後の再加熱により接着強度が如何に變化するかを調べた。試料は製品の餘材から採り壓延儘及 600~900°C に5分、30分、2時間夫々加熱後空冷し、之から第1報に報告した試験片及装置により接着強度を測定した。測定結果は第3圖の如くである。

第3圖によれば接着強度は加熱により壓延状態のものに比べて著しく増加する。之は加熱により兩金屬間の擴散が進む爲であるが温度と時間によつて強度の増加割



第3圖 加熱による接着強度の變化
(5mm 厚—1mm クラッド)

合も異つてゐる。即ち 600°C では加熱時間が長くなるに従つて強度も増加するが 30 分以上は加熱しても増加は著しくない。700, 800°C では 30 分以上の加熱は却つて強度を低下し、900°C では時間と共に増加はするが全體として低い。斯の如く温度によつて異なるのは擴散による境界面の性質の變化に依るもので前項に述べた如く加熱温度が高く境界面に合金層を生じたものは却つて接着強度を低下するものと思われる。

本試験の結果から若し更に合鉄の接着強度を増す爲に加熱するとすれば、600°C に30分以下の加熱を行へば充分である。高温度に加熱すると前述の炭素の擴散の問題の外、後述する熱膨脹の差による反りを生ずるからなるべく低温加熱が望ましい。然し壓延儘の状態に於て既に A. S. T. M. の現格²⁾ 14kg/mm² を遙かに上回る強度を示しているのであるから、接着強度を更に増加する爲にのみ加熱を行う必要は實際にはないであろう。

IV. 加熱による合鉄の反り

加熱により合鉄の反ることは不銹鋼合せ鉄の製造及使用上最も注意を要する處である。従つて茲で計算と二三の實驗により考察を試みた。只茲で反りの問題の對稱となるのは二層の合せ鉄であつて、加熱による反りは左右對稱の三層とすれば全然顧慮する必要のない事は承知していなければならぬ。

1. 合鉄の反りの計算: 熱膨脹の異なる軟鋼と 18-8 不銹鋼とを張合せた不銹鋼合せ鉄は一種のバイメタルと考えてよい。一般に熱膨脹係數 α_1 及 α_2 なる二種の金屬鉄を張合せた合鉄を加熱した場合に生ずる反りは數式的

2) A.S.T.M. Designation, Revised 1944.

には次の曲率半径R及び曲率Cで表わされる。

$$R = \frac{h}{(\alpha_1 - \alpha_2)T} \frac{(1+m)(1+n)(1+mn)}{12mn} *$$

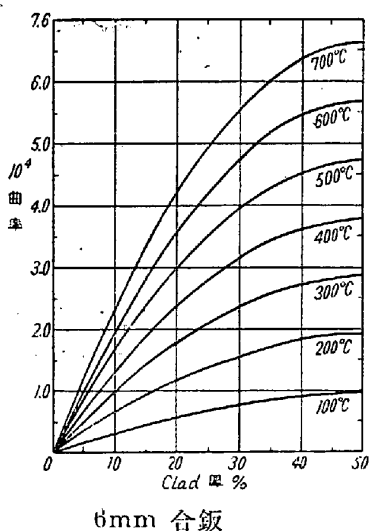
$$C = \frac{1}{R} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)T}{h} \frac{12mn}{(1+m)(1+n)(1+mn)}$$

茲で h: 合鉄の厚さ

m = h₂/h₁: 張合わせた2種の金属の厚さの比

n = E₂/E₁: 両金属の弾性係数の比

上式に於て合鉄の鉄厚を 6mm, 軟鋼の膨脹係数及弾性係数を 14.4×10⁻⁶/°C, 21700kg/mm², 不銹鋼の兩係数を夫々 18.2×10⁻⁶/°C, 20000kg/mm² として各温度に加熱した場合のクラッド厚%と曲率との關係を計算すると第4圖の如くなる。



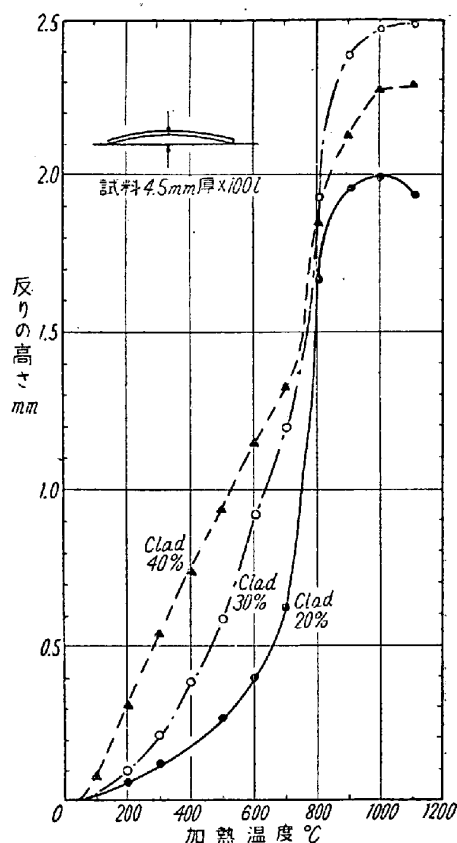
第4圖 加熱による合鉄の反り (計算)

第4圖によれば同一温度に加熱しに場合はクラッド厚が厚くなるに従い反りは大きくなり、兩者半分宛の場合に反りは最大となることが判る。上の式から曲率は膨脹係数の差 $\alpha_1 - \alpha_2$ が大なる程大きくなり、又同一比の合鉄では鉄厚 h の薄い程反りは大きく、加熱温度が高い程著るしく反ることが考えられる。

2. 加熱による反りの測定

先づ加熱により生ずる反りに及ぼすクラッド厚の影響を實測する爲短冊型の合鉄試料を電気爐中で昇温し、各温度で生ずる反りの高さを短冊型試料の中央に接したダイヤルゲージで讀取る様にした。加熱は 400°C から 100°C 毎に 5 分間保持して昇温し 1100°C 迄測定した。測定結果は第5圖の如くである。

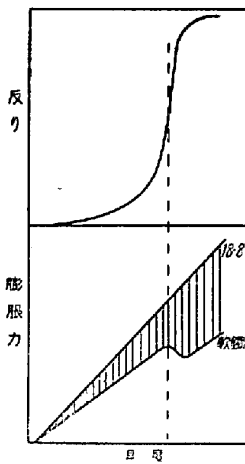
* 材料力學書参照



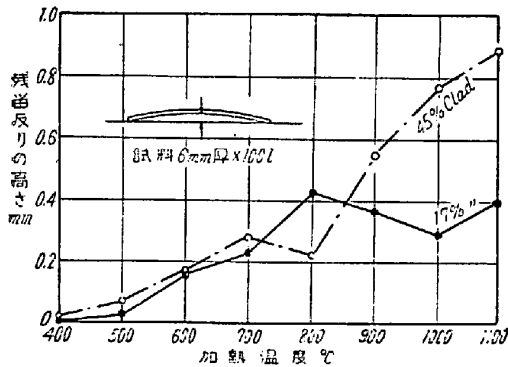
第5圖 加熱による反りの測定

この結果によると若干の實驗誤差はあるが 700°C 以下ではクラッドの厚くなるに従つて反りが多くなつて居り前項の計算結果と合致している。1 試片について見ると加熱温度 800°C 附近で反りは急に多くなり、900°C 以上になると又増加は緩くなつてくる。この變化は前述の計算式に於て兩金属の膨脹係数の差が大なる程曲率が大きくなることから證明される。即ち軟鋼は Ac₁ 變態が約 800°C から始つて收縮し約 860°C で Ac₃ を終つてから再び膨脹をする。一方 18-8 鋼には變態はなく加熱により膨脹する許りである。この關係を圖示すると第6圖の如くである。即ち Ac₁ 變態の始まりから Ac₃ 變態が終る迄の間は不銹鋼は膨脹を続けるのに對し軟鋼では收縮し結果として大きな反りを生ずることとなる。若し軟鋼の變態がなければ反りは温度の増加と共に直線的に増加する筈である。

次に加熱した合鉄を常温迄冷却した時残留する反りを測定した。試料は前と同じ短冊型に仕上げた 6mm 厚の合せ鉄で、クラッド厚は 17% 及 45% の2種とした。各試片を 400~1100°C に 10 分間爐中で加熱後空冷し室温迄冷却後、前と同様ダイヤルゲージにより反りの高さを測定した。測定結果は第7圖の如くである。クラッド厚の大なるものが常温に於て残留する反りも多く、



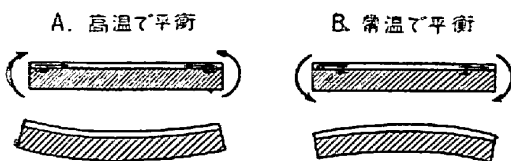
第6圖 温度と反りの関係



第7圖 合鉄加熱後の常温に於ける反り

高温に加熱する程残留する反りも大きい。800°C 加熱では両者が交錯しているが、前述の軟鋼の變態點近くを加熱冷却する爲複雑な現象を生ずるものと考えらる。

合鉄の反りでは製造時の熱間壓延に生ずる反りと製造後の加熱により生ずる反りとが問題となる。製造時の反りは第8圖Aの如く高温で膨脹係数の異なる不銹鋼と軟鋼とが平衡状態にあり、之が冷却する時不銹鋼の收縮が大きい爲モーメントを生じて不銹鋼側が凹に反る。又製造後の加熱に依る反りは常温で平衡している兩金屬間の膨脹の差で前と逆のモーメントを生ずるから不銹鋼側が凸に反りBの如くなるものである。



第8圖 合鉄の反り模型圖

最後に合鉄を温度差のある場所に使う場合を顧慮して寫眞第5の要領により表裏に温度差を與えて試験を行つ

た。即ち軟鋼側を水に浸して不銹鋼クラッド面だけを水面上に出し、クラッド面をトーチで加熱して表面温度を約 250°C に保つて裏面と約 100°C の温度差を與える様にした。トーチの加熱は 10 分間続け 3 回繰返した。温度は裏面から小孔を穿つて熱電對を挿入し表面温度を測定すると同時に裏面の温度をも測定した。此の結果は極めて輕微な反りを生じただけで 100°C 位の温度差では實用上何等差支へはないことが判つた。



寫眞第5 表面加熱試験

V. 結 言

不銹鋼合せ鉄の製造及利用上、諸性質に及ぼす加熱の影響を調べた結果次の事を明らかにすることが出來た。

1. 合鉄の加熱による境界部の擴散は温度及時間の大きな程著るしくなる。800°C 以上の加熱では擴散により境界部に合金層を造る。この合金層が出來ると兩金屬の接着強度は却つて低下するから高温度の加熱は望ましくない。
2. 實に軟鋼中の炭素が擴散して不銹鋼中に移行し不銹鋼の耐蝕性を害する懼れもあるから、高温度に長時間加熱することは避くべきである。又母材鋼の炭素量もなるべく低い方が安全である。
3. 合鉄の加熱に於て最も問題となるのは反りである。加熱による反りは温度の高い程及クラッドの厚い程大きくなり、特に軟鋼の變態收縮により 800°C 附近から急激に増加する。従つて母材軟鋼の變態點以上の加熱は避くべきである。
4. 合鉄表裏の温度差 100°C 程度では實用上は著るしい障害はないと考えられる。
5. 温度變化による反りが問題となる箇所に合鉄を使用する場合は表裏同一厚の三層合せ鉄を使えば反りの懸念は全く不要である。(昭和 26 年 9 月寄稿)