溶射皮膜をインサート材としたステンレス鋼と炭素鋼の接合*

—フレイム溶射に関する研究 (第5報)—

屋良 秀夫**, 生田 明彦***

Joining between Stainless Steel and Carbon Steel with Thermal Spray

Coating of Ni Based Self-Fluxing Alloy*

—Study on Flame Spraying (Report 5)—

by Hideo Yara** and Akihiko Ikuta***

The joining between stainless steel (SUS304) and carbon steel (SS400) was carried out using thermal spray coating of nickel based self-fluxing alloy under atmospheric conditions for basic data. The size of joining specimen is 50 mm in length and 10 mm in diameter. After the each edged surface of SUS304 and SS400 specimens were blasted by used steel grid material sized No. 70, those were sprayed with self-fluxing alloy (S.F.A.) at the each surface of both specimens coated about 100 μ m in thickness.

The effects of joining conditions on the structure and strength of joining were studied.

The results are summarized as follows:

- (1) The maximum tensile strength at the joint part using R notch specimen was about 579 MPa under condition of 30 sec raising time and 60 sec holding time at 1373 K temperature.
- (2) The hardness gradient was not observed near the joining zone in the Vickers hardness distribution of the both materials. Furthermore, the Vickers hardness distribution near the joining zone of SUS304 was about Hv120, that was lower than base metal because of the annealing effect.
- (3) The microstructure near the joining zone did not indicate the martensitic structure, the carburized and the decarburized layer because of its lower cooling rate. The structure near the joining zone of SUS304 was indicated in the annealed twin at the transgranular.
- (4) By the EPMA line analysis across the joining zone, Cr, Ni, and B were not observed because the inserted material S.F.A. was very little diffused and the most of it was discharged out of the joining part. The elementary analysis of Fe was indicated slightly concentrated gradient.

Key Words: Stainless steel, Carbon steel, Ni based self-fluxing alloy, Thermal spray coating, Carburized and decarburized layer, EPMA line analysis, concentrated gradient, Hardness gradient

1. 結 言

著者らは、これまで難溶接材料の一つである鋳鉄と鋳鉄の接合や鋳鉄と炭素鋼の接合について、接合時の温度が制御できる関係で、鋳鉄側には白鈍化が、また炭素鋼側には浸炭層がそれぞれわずかに見られるが、機械的冶金の性質とも良好な接合部が得られたことを報告した^{1,2)}。

ところで、優れた耐錆性、耐食性、耐酸性などの性質を持っているステンレス鋼は厨房器具からジェットエンジンや原子力関係に至るまで使用範囲が拡大し、使用量も飛躍的に増加している。さらに、最近では特にプラント関係において連結個所などにステンレス鋼と他の金属の接合が用いられているが、特にステンレス鋼と炭素鋼の異種金属の溶接では溶接部がマルテンサイト組織のため硬化したり、脱炭層や浸炭層の影響で割れの発生や脆化のおそれがある^{3,4)}。

そこで、本研究では熱伝導率や熱膨張係数などの物理的性質が大きく異なっているステンレス鋼と炭素鋼の異種金属の接合において、上述のような溶接欠陥を少なくするために、前報²⁾と同様な Ni 系の自溶性合金粉末材料を両試験片の接合端面に溶射してインサート材とし、試験片の端面を突合せ拘束したのち、高周波誘導加熱装置で溶射皮膜部を再熔融凝固させることによってステンレス鋼と炭素鋼の異種金属の接合を行い、機械的冶金の性質の両面よりインサート材としての接合性と適合性について検討したものである。

2. 供試材料および実験方法

2.1 供試材料および実験条件

本実験に用いた素材はオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304) と一般構造用圧延鋼材 (SS400) で、それらの化学成分および機械的性質を Table 1 に示す。また、インサート材は前報²⁾と同様に Ni 系の自溶性合金粉末溶射材料 (MSFNi4 相当 Self-fluxing Alloy=S.F.A.) で、その化学成分および特徴を Table 2 に示す。Fig. 1 は接合実験に供した試験片形状を示したもので、前報²⁾と同様に直径10 mm、長さ50 mmである。両試験片の端面をスチールグリッド No. 70 でブラスト前処理したのち、膜

*原稿受付 平成6年12月22日 平成6年度秋季全国大会で発表

**正 員 琉球大学 Member, University of the Ryukyus

***正 員 川崎重工工業 Member, Kawasaki Heavy Industries, LTD

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties.

a) Chemical compositions (mass %)							
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr
SUS304	0.05	0.94	0.49	0.030	0.020	8.17	18.31
SS400	0.17	0.88	0.03	0.014	0.013	—	—

b) Mechanical properties				
	Yield point (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Vickers hardness (Hv)
SUS304	317.0	584.3	79.7	248
SS400	274.4	487.1	27	127

Table 2 Chemical compositions and Characteristics of S.F.A.

a) Chemical compositions (mass %)								
	C	Si	Cr	B	Mo	Cu	Fe	Ni
S. F. A.	0.8	4.5	15.0	3.3	4.0	2.0	4.5	Bal

b) Characteristics	
	S. F. A.
Grain size (μm)	50~100
Specific gravity	8.3
Vickers hardness (Hv)	653~746
Melting point (K)	1273

Fig. 1 Shape and size of specimen.

Table 3 Spraying condition of S.F.A.

Oxygen (O_2)	Pressure (MPa)	0.343
	Supply (m^3/hr)	2.5
Acetylene (C_2H_2)	Pressure (MPa)	0.0980
	Supply (m^3/hr)	1.5
Air pressure (MPa)		0.274
Quantity of powder (kg/hr)		10
Distance (mm)		180~230
Thickness (μm)		100

厚がそれぞれ100 μm になるように粉末式溶射ガンを用いて溶射した。そのときの溶射条件を Table 3 に示す。

2.2 実験装置および実験方法

実験に用いた接合装置も、前報²⁾と同様なもので接合部を再溶融させるための高周波誘導加熱装置、加圧力と熱膨張による圧縮力を測定するためのロードセル、接合部の温度測定のための CA 熱電対、温度と圧力の記録を行うためのペンレコーダ、両試験片の軸心を一致させるための耐熱ガラスなどから構成されている。接合部近傍

a) Smoothed type

b) R-Notch type

Fig. 2 Shape of tensile specimen.

Table 4 Tensile strength for effect of shape and heat treatment (MPa).

	Smoothed type		R-Notch type	
	Pre-heating	Post-heating	Pre-heating	Post-heating
SS400	487.1	518.0	587.0	592.0
SUS304	584.3	576.4	982.0	676.0

の最高加熱温度は1373 K (1100°C) と一定にし、最高加熱温度に達するまでの時間、すなわち昇温時間が30 s のとき最高温度での保持時間を50, 60, 70 s, また昇温時間が50 s のとき保持時間を40, 50, 60 s と変化させて接合実験を行った。実験方法は溶射した SUS304 と SS400 の試験片の端面を突合せガラス管に挿入したのち、高周波誘導加熱コイル内にセットして、ねじ式による機械的方法で約1.4 KN になるように初期加圧を行う。また、接合部近傍の温度を測定するために SUS304 試験片側に CA 熱電対をセットする。それぞれの接合条件で接合した試験片について引張試験、硬度試験、組織観察などを行い、自溶性合金粉末溶射材料の接合性と適合性について調べた。なお、引張試験片の形状と寸法を Fig. 2 に示す。(a) は平滑試験片で、母材部から破断したものについては(b) の R ノッチ付き試験片を用いた。さらに各素材の熱処理前と熱処理後の試験片形状の違いによる引張強度を Table 4 に示す。

3. 実験結果および考察

本実験において最高加熱温度を1373 Kと一定にして最適接合条件を調べた。この値はSUS304の溶融温度よりも低い、半溶融状態となっており、しかもS.F.A.の溶融温度より高いため接合界面が十分に活性化できると考えられる。また、昇温時間および最高加熱温度での保持時間を変えて接合実験を行い、得られた試験片について機械的性質と冶金的性質の両面より検討した。

3.1 引張試験

本実験における接合条件は最高加熱温度に達するまでの時間、すなわち昇温時間を30 s (加熱速度36.7°C/s) と50 s (加熱速度22°C/s) にし、それぞれの場合における最高加熱温度での保持時間を50, 60, 70 s、および40, 50, 60 sと変化させて接合を行った。Fig. 3はそれぞれの接合条件における引張試験の結果を示したもので、試験片の形状は平滑試験片を用いたが、母材部から破断したものについてはRノッチ付き試験片を用いた。その結果、昇温時間が30 sのとき、保持時間が60 sで引張強度は約495 MPaと最高値になり母材部から破断し、また昇温時間が50 sのとき、保持時間が50 sで引張強度は同じく495 MPaと母材部から破断している。このように昇温時間や保持時間を変化させることによって接合部の引張強度の値が異なるのは、瀬戸ら⁵⁾の報告にもあるようにインサート材の化学成分中のSiやCrの影響で接合界面にクロム炭化物のような脆弱な金属間化合物層の形成される量の差によるものと考えられる。さらに、後述するように脱炭や浸炭の程度にも影響しているものと思われる。

Fig. 3 Relation between tensile strength and joining condition.

これらの破断位置はいずれも炭素鋼の母材部であったため、Rノッチ付き試験片を用いて引張試験を行ったところ、両条件とも約579 MPaとなりこの値をTable 4と比較すると、SS400とほぼ同様な値を示しSUS304の約85%の強度となっている。

以上のことより、最適接合条件は経済的なことを考慮すると、昇温時間は30 s、最高温度での保持時間は60 sであることになる。

3.2 硬度分布

引張試験の結果より、最適接合条件で接合した試験片の接合部近傍の硬度分布をFig. 4に示す。測定は試験片の中央部について接合部を挟み軸方向に0.5 mm間隔でSUS304とSS400の双方に渡って行った。結果より、接合部の硬度はHv164となっており、S.F.A.の硬度が約Hv700であることより接合部にはS.F.A.がほとんど残存していないことがわかる。接合前の試験片の硬度は、SUS304が圧延材料であったため約Hv250、SS400が約Hv130となっていたが、接合後はSUS304側がHv120と低くなっているのは焼きなましと同じ効果になったものと考えられる。SS400側はHv140となって素材の硬度

Fig. 4 Vickers hardness distribution of jointed part.

Fig. 5 Microstructure of jointed part (30 s raising time and 60 s holding time).

Fig. 6 SEM microphotograph and EPMA line analysis of elements.

とほとんど同じ値になっている。一般的にステンレス鋼と炭素鋼の異種金属の接合は、ステンレス鋼用溶接棒によるアーク溶接が行われるが、その場合の溶接金属の化学成分は溶込率によって変化し、境界部は炭素の移動により脱炭層や浸炭層が生じ、硬度差によって接合部近傍の硬度勾配が問題になるが⁶⁾、A. Ohmori ら⁷⁾も報告しているように、高周波誘導加熱によって接合を行っているために、加熱・冷却のサイクルや最高加熱温度の設定ができるので接合部の硬度差が見られず良好な接合状態となっていることがわかる。

3.3 ミクロ組織

硬度分布に用いた試験片と同様に、最適接合条件で接合したRノッチ付き試験片による引張試験前後の接合部近傍のミクロ組織観察結果をFig. 5に示す。これより、引張試験前のミクロ組織では接合部にはインサート材であるS.F.A.はほとんど残存していない。SUS304側はオーステナイト組織で粒内には焼きなまし双晶が観察される。また、SS400側はフェライトとパーライトの混在組織となっている。引張試験後では破断位置が接合部で、接合部近傍のSUS304やSS400の組織は引張りにより全体的に伸びた状態になっている。このように、ステンレス鋼と炭素鋼の異種金属の接合でしばしば問題となるバンド状のマartenサイト組織や浸炭層が見られず、ミクロ組織観察からも良好な接合であることがわかる。さらに接合実験中の状態を観察したところ最高加熱温度に近くにつれてインサート材であるS.F.A.がバリとなって排出されるのが見られた。

3.4 元素分析

元素分析に使用した試験片も接合強度の高い条件で接合したもので、EPMAによって接合部近傍の線分析結果をFig. 6に示す。分析元素は接合部の機械的冶金の性質に影響を与えと思われるCr, Ni, Fe, B, C, Siの6種類である。これより、Feはわずかに濃度勾配が見られるが、問題になるような勾配ではないものと思われる。Cは接合部にわずかに存在している。CrとNiはSUS304側にほぼ均一に分布しており、BとSiはほとんど観察されない。さらに、S.F.A.中のCuについては分析を行っていないが、迎ら⁸⁾も報告しているようにSUS304およびSS400側への拡散はほとんどないものと思われる。これらのことから、S.F.A.の主成分であるCr, Ni, Bが接合部に観察されないのは、大部分が接合部から排出されたためと思われる。しかし、インサート材としてのS.F.A.はSiやBを含む融点降下元素によるぬれ性の作用でろう接の効果の向上と接合部から素材

へCrやNiがわずかに拡散したために接合を可能にしたものと考えられる。このようにステンレス鋼と炭素鋼の異種金属の接合においても、前報²⁾で述べた同種金属の接合機構と同様な状態になっていることがわかる。

4. 結 言

ステンレス鋼と炭素鋼の異種金属の接合において、インサート材としてNi系の自溶性合金粉末溶射材料を用いて接合実験を行い、接合性について機械的性質や冶金の性質の両面から検討した結果、以下のような結論を得た。

(1) 最高加熱温度を1373 Kと一定にして、昇温時間と最高加熱温度での保持時間を変化させて接合した試験片の引張強度の結果から、最適接合条件は経済的な面も考慮すると昇温時間が30 s (加熱速度36.7°C/s) のとき保持時間は60 sの場合で、接合部の強度はRノッチ付き試験片で約579 MPaと高い値を示している。

(2) 異種金属における接合部近傍の硬度は接合時の熱による影響が少なく、両材料間の硬度勾配がほとんどみられず良好な接合状態となっている。

(3) 接合部近傍はバンド状のマartenサイト組織や脱炭層、浸炭層が観察されない。また、SUS304側はオーステナイト組織で粒内には焼きなまし双晶が観察される。

(4) 接合部近傍をEPMAにより線分析した結果、Feはわずかに濃度勾配が見られる。また、インサート材の大部分がバリとなって排出された関係でCr, Ni, Bがほとんど観察されないが、わずかな拡散とろう接の効果で良好な接合となっている。

謝 辞

本実験の遂行にあたり御尽力を頂いた石田輝彦工学士および津波古英一工学士に謝意を表します。また、接合部の線分析は沖縄県工業試験場機械金属室の国吉和男室長および比嘉真嗣主任研究員の御協力を得ました。併せて謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 屋良秀夫, 生田明彦, 藤木大輔: 溶射皮膜をインサート材とした鋳鉄の固相接合(フレーム溶射に関する研究—第2報), 溶接学会論文集, Vol. 11, No. 4 (1993), p. 474-478.
- 2) 屋良秀夫, 生田明彦: 溶射皮膜をインサート材とした鋳鉄と炭素鋼の固相接合(フレーム溶射に関する研究—第4報), 溶接学会論文集に投稿中(査読済).
- 3) 渡辺正紀, 向井喜彦: ステンレス鋼の溶接, 日刊工業新聞社.
- 4) 例えば, 神鋼製鋼所: ステンレス鋼の溶接(神鋼ステンレス溶接材料ガイドブック).
- 5) 瀬戸佐智生, 大脇桂, 小口徹, 入沢敏夫: 異種金属の短時間拡散接合に関する研究, 溶接学会論文集, Vol. 10, No. 2 (1992), p. 246-251.
- 6) 溶接学会編: 溶接技術の基礎, 産報出版.
- 7) Akira OHMORI, Nobuhiro TAKASAKI, Akihiko TOMIGUCHI and Yoshinobu SOCHI: Fusing of Sprayed Ni-base Coatings by Induction Heating, Transaction of JWRI, Vol. 21 No. 2 (1992), p. 195-200.
- 8) 迎静雄, 西尾一政, 馬場仁, 末永允, 石原安興: 球状黒鉛鋳鉄の固相接合(第1報)—接合性に及ぼす接合条件の影響—, 溶接学会論文集, Vol. 4, No. 1 (1986), p. 66-73.