肉盛溶接部の曲げ延性改善方策*

—高純度フェライト系ステンレスクラッド鋼の溶接に関する研究(第3報)—

中尾嘉邦**, 西本和俊**, 山崎和信***, 野井伸悟****, 塚原 宏*****, 原 泰弘*****

Countermeasure for Improvement of the Bend Ductility of the Overlay Weld*

—Study on Welding of the Low Interstitial Ferritic Stainless Clad Steel (Report 3)—

by Yoshikuni Nakao**, Kazutoshi Nishimoto**, Kazunobu Yamazaki***,
Shingo Noi****, Hiroshi Tsukahara***** and Yasuhiro Hara*****

The countermeasure for improvement of the bend ductility of the low interstitial ferritic stainless steel overlay welds has been investigated.

The addition of stabilizing elements, especially zirconium, up to about 0.4% to the first layer of the ferritic stainless steel overlay welds with 30% chromium on a low alloy steel improved its bend ductility. The bend ductility of the overlay welds was also improved with decreasing the chromium content in the first layer of the weld metal.

On the basis of these results, a composition of 19Cr-2Mo-0.25Zr-Fe was recommended for the filler metal for the first layer of the 30Cr-2Mo steel overlay welding on a low alloy steel in order to ensure a good weld ductility.

Key Words: Low interstitial ferritic stainless steel, Overlay weld, Bend ductility, Stabilizing element, Cr content, Filler metal, Improvement

1. 緒 言

前報^{1,2)}において、高純度フェライト系ステンレス鋼肉盛溶接部に生じる脆化機構を検討した結果、肉盛溶接部の脆化の主要因はCr炭化物の結晶粒界上への析出に起因したHall-Petch係数(K_y)の上昇による塑性緩和能の低下であり、二次的要因として、溶接後熱処理(以後PWHTと呼ぶ)過程における475℃脆化及び結晶粒の粗大化も肉盛溶接部の脆化に関与していることを明らかにした。

ところで、CrよりもCとの親和力の強い安定化元素のフェライト系ステンレス鋼中への添加は、素材及び溶接部の機械的特性の改善に有効であることはよく知られた事実でありこれに関する報告³⁻⁶⁾が数多くなされている。一方、フェライト系ステンレス鋼ではCr含有量が減少した場合、C及びNなどの不純物元素のマトリックス中への固溶量が增大する結果、これらの不純物元素による汚染に起因した脆化に対する抵抗性が向上する。またCr含有量の低下に伴い、475℃脆化の軽減も期待される。

以上のような観点より、本報においては肉盛溶接部の曲げ延性の改善を目的として、第一層目の溶接に用いる下盛溶加棒への安定化元素(ここではNb, TiもしくはZr)の添加、下盛溶加棒の低Cr化ならびにその両者の

複合効果を期待した安定化元素添加低Cr系下盛溶加棒を採用時の曲げ延性について系統的に調査し、曲げ延性改善に最も有効である下盛溶加棒組成について検討を行った。

2. 供試材料ならびに実験方法

Table 1に第一層目肉盛溶接部の作製に用いた安定化元素添加30Cr-2Mo鋼溶加棒の化学組成を示す。これらは、安定化元素としてNb, Ti及びZrを選び、各々の安定化元素の添加量を約0.1~0.45%の範囲内で3~4段階に変化させた溶加棒である。溶加棒径は1.8~2.3mmである。

Table 2には肉盛溶接部の曲げ延性に及ぼす低Cr化の効果及び安定化元素と低Cr化の複合効果を検討するため使用した下盛溶加棒ならびに母材の化学組成を合せて示す。これらの溶加棒径は1.8~2.0mmである。なお、**Table 1**及び**Table 2**中の19Cr-2Mo鋼及び30Cr-2Mo鋼溶加棒以外のものは実験室的に真空溶解により溶製し、線引き加工を行なって作製したものである。**Table 1**及び**Table 2**に示す溶加棒を用いて板厚38mmの炭素鋼板上にティグ法により溶込率15%~35%の範囲で下盛溶接を行なった後、その上層には市販の30Cr-2Mo鋼溶加棒(**Table 2**中のHM)を用いて溶込率25%で肉盛溶接を行なった。このようにして作製した肉盛溶接部に対して、PWHT後、側曲げ試験を実施し、曲げ延性を評価した。

肉盛溶接部の組織観察として光学顕微鏡及び走査型電子顕微鏡(以後SEMと呼ぶ)観察を行なった。析出物の同定には抽出残渣によるX線回折及び抽出レプリカによる透過型電子顕微鏡(以後TEMと呼ぶ)観察を行なった。破面観察に際しては、SEMにより割れ破面の詳細な検討を実施した。

なお、側曲げ試験方法の詳細は第1報¹⁾と同様の方法

*原稿受付 昭和62年11月11日 昭和60年度秋季全国大会で発表

**正員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka University

***正員 大阪大学大学院(現在 日新製鋼(株)) Member, Graduate school, Osaka University(Present address: Nisshin Steel Co., Ltd.

****正員 (株)新潟鉄工所 Member, Niigata Engineering Co., Ltd.

***** (株)新潟鉄工所 Niigata Engineering Co., Ltd.

Table 1 Chemical compositions of filler metals (mass%)

Mark	Filler metal	Diameter of filler metal (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	N	Nb+Ta	Zr	Others
H21	Zr containing 30Cr-2Mo steel	2.3φ	0.0034	—	—	—	—	30.6	1.98	—	0.26	0.0076	0.144	0.093	—
H22		2.3φ	0.0024	0.21	0.037	0.015	0.010	30.5	1.90	0.144	0.22	0.0078	0.117	0.20	—
H23		2.0φ	0.0031	0.18	0.018	0.012	0.008	30.2	1.98	—	0.28	0.0076	—	0.28	—
H24		2.0φ	0.0027	0.18	0.018	0.010	0.009	31.2	2.00	—	0.28	0.0066	—	0.37	—
HT1	Ti containing 30Cr-2Mo steel	1.8φ	0.007	—	—	—	—	—	—	—	—	0.006	—	—	0.10Ti
HT2		1.8φ	0.011	—	—	—	—	—	—	—	—	0.013	—	—	0.32Ti
HT3		1.8φ	0.006	0.21	0.077	0.020	0.005	30.10	1.80	—	—	0.004	—	—	0.42Ti
HN1	Nb containing 30Cr-2Mo steel	2.0φ	0.0028	0.22	0.021	0.013	0.009	30.2	2.04	0.16	0.22	0.0084	0.194	—	—
HN2		2.0φ	0.0030	—	—	—	—	30.8	—	—	0.23	0.0094	0.333	—	—
HN3		2.0φ	0.0030	—	—	—	—	30.4	—	—	0.21	0.0078	0.374	—	—
HN4		2.0φ	0.0028	—	—	—	—	30.4	—	—	0.26	0.0083	0.464	—	—

Table 2 Chemical compositions of filler metals and base metal (mass%)

Mark	Filler metal or base metal	Diameter of filler metal (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	N	Nb+Ta	Zr
UM	15Cr-2Mo steel	1.8φ	0.0040	0.12	0.03	0.010	0.004	14.99	1.94	—	—	0.004	0.15	—
LM	19Cr-2Mo steel	1.8φ	0.009	0.18	0.27	0.024	0.004	19.04	2.48	—	—	0.011	0.22	—
MM	26Cr-2Mo steel	1.8φ	0.0021	0.15	0.09	0.012	0.008	26.20	1.40	—	—	0.0065	0.14	—
HM	30Cr-2Mo steel	2.0φ	0.0019	0.16	—	0.016	0.011	29.40	1.98	—	—	0.0069	0.10	—
UZ1	Zr containing 15Cr-2Mo steel	1.8φ	0.0038	0.13	0.02	0.010	0.005	15.00	1.98	—	—	0.0036	0.15	0.14
UZ2		1.8φ	0.0027	0.13	0.02	0.010	0.005	15.33	2.02	—	—	0.0032	0.15	0.26
UZ3		1.8φ	0.0035	0.13	0.02	0.010	0.005	14.93	2.00	—	—	0.0034	0.15	0.40
UZ4		1.8φ	0.0051	0.13	0.02	0.010	0.005	15.00	1.99	—	—	0.0054	0.15	0.43
LZ1	Zr containing 19Cr-2Mo steel	2.0φ	0.003	0.10	0.05	0.017	0.0022	19.35	1.86	—	—	0.0047	0.070	0.092
LZ2		2.0φ	0.0019	0.07	0.05	0.017	0.0022	18.78	1.84	—	—	0.0036	0.074	0.164
LZ3		2.0φ	0.0021	0.07	0.04	0.017	0.0035	19.80	1.88	—	—	0.0039	0.066	0.248
LZ4		2.0φ	0.0030	0.11	0.06	0.012	0.0030	17.95	2.00	—	—	0.0040	—	0.410
LZ5		2.0φ	0.0013	0.12	0.06	0.008	0.0040	18.89	1.96	—	—	0.0035	—	0.530
MZ1	Zr containing 26Cr-2Mo steel	1.8φ	0.0073	0.19	0.06	0.015	0.005	26.04	1.83	—	—	0.0062	0.14	0.10
MZ2		1.8φ	0.0029	0.19	0.06	0.015	0.005	26.04	1.83	—	—	0.0052	0.14	0.23
MZ3		1.8φ	0.0045	0.19	0.06	0.015	0.005	26.04	1.83	—	—	0.0054	0.14	0.43
MZ4		1.8φ	0.0046	0.19	0.06	0.015	0.005	26.04	1.83	—	—	0.0056	0.14	0.46
BM	Carbon steel	3B*	0.08	0.30	1.10	0.013	0.0030	0.15	0.15	—	—	—	—	—

*: Plate thickness (mm)

により行なった。

3. 肉盛溶接部の曲げ延性改善に向けての検討

3.1 下盛溶加棒中の安定化元素添加の影響

下盛材として Nb, Ti 及び Zr を添加した 30Cr-2Mo 鋼溶加棒を用いて肉盛溶接を行ない、それぞれの元素の曲げ延性に及ぼす影響について検討を行なった。

Table 1 に示すように種々の 30Cr-2Mo-Zr 鋼溶加棒中には安定化元素として添加された Zr 以外に約 0.1% の Nb が含有されている。この理由は、本鋼が実験室的に真空溶解により作製された鋼であり、溶解用の母合金として市販の 30Cr-2Mo 鋼 (約 0.1% Nb を含有) を用いたためである。同様のことが、真空溶解鋼である 30Cr-2Mo-Ti 鋼に対してもいえる。このため、Zr もしくは Ti を添加した溶加棒を用いた肉盛溶接部において観察される現象は厳密には Zr+ Nb もしくは Ti+ Nb の複合効果に起因するものと考えるのが妥当であろう。しかしながら、ここでは、市販の高純度 30Cr-2Mo 鋼組成に意図的に追加添加を行なったという観点より、これらの溶加棒を用いた場合の変化をそれぞれ Zr 及び Ti の添加効果として検討を行なう。なお、後述するようを、Nb, Ti 及び Zr のうち、Nb の添加量の 0.46% までの増加においては肉盛溶接部の機械的性質はほとんど変化しないことが確認されており、この意味でも Zr+

Fig. 1 Result of side-bend test of Nb containing overlay welds post heat-treated

Nb もしくは Ti+ Nb を含有する溶加棒を用いて作製された肉盛溶接部に生じる現象を Zr もしくは Ti の肉盛溶接部に対する影響と仮定してさしつかえないものと考えられる。

Fig. 1~3 に下盛材としてそれぞれ種々の 30Cr-2Mo-

Fig. 2 Result of side-bend test of Ti containing overlay welds post heat-treated

Fig. 3 Result of side-bend test of Zr containing overlay welds post heat-treated

Nb 鋼, 30 Cr-2 Mo-Ti 鋼及び 30 Cr-2 Mo-Zr 鋼溶加棒を用い, 溶込率25%で作製された肉盛溶接部 PWHT 材の側曲げ試験結果を示す。

下盛溶加棒へ Nb を添加した場合, 今回実施した側曲げ試験温度範囲内 (253 K~303 K) においては, 試験片は大部分 30° 以下の曲げ角度で割れが発生しており, 肉盛溶接部の曲げ延性改善効果はほとんど認められない。

下盛溶加棒へ Ti を添加した場合, Nb 添加の場合と比べて同一側曲げ試験温度での割れ発生時の曲げ角度は上昇し, 曲げ延性の改善傾向のあることがわかる。しかしながら, その改善幅はわずかである。すなわち, 肉盛溶接部の側曲げ試験において, 割れが発生することなく 180° 曲げが可能な最も低い温度 (以後 CCTT と呼ぶ) は 0.4% Ti 添加の場合 323 K であるが, Ti 無添加の場合に比べて 10 K の CCTT の低下にとどまる (Fig. 2 と Fig. 4 参照)。

Fig. 4 Relation between Cr content in the filler metal used for the first layer of the overlay weld metal and crack-crack free transition temperature by side-bend test

これに対し, 下盛溶加棒への Zr 添加による肉盛溶接部の曲げ延性改善効果は大きく, 約 0.1%~0.37% までの全ての Zr 添加量において Zr 無添加の溶加棒を用いた肉盛溶接部に比べて曲げ延性の改善傾向を有していることがわかる。特に, 0.28% の Zr 添加溶加棒の採用により, 肉盛溶接部の CCTT は 263 K まで低下し, Zr 無添加の市販の 30 Cr-2 Mo 鋼溶加棒を用いた肉盛溶接部の CCTT (333 K) から比べると 70 K の CCTT の改善が可能となった。

以上の結果より, 本試験において採用した安定化元素である Nb, Ti 及び Zr の中では溶加棒への Zr の添加が高純度フェライト系ステンレス鋼肉盛溶接部の曲げ延性改善に最も有効であることが明らかとなった。

3.2 下盛溶加棒中の Cr 量の影響

下盛材として市販の高純度 30 Cr-2 Mo 鋼溶加棒より Cr 量を低減させた溶加棒を用いた場合の肉盛溶接部の曲げ延性について調査を行ない, Cr 量低減による延性改善効果について検討を行なった。側曲げ試験片の作製に際しては, 初層の溶接に Table 2 に示す 26 Cr-2 Mo 鋼, 19 Cr-2 Mo 鋼及び 15 Cr-2 Mo 鋼溶加棒を用いて溶込率25%または35%の条件で下盛溶接に行なった後, 第二, 三層目の溶接は市販の高純度 30 Cr-2 Mo 鋼溶加棒を用いて溶込率25%の条件で行なった。Fig. 4 には下盛溶加棒中の Cr 量とその溶加棒を用いて作製した肉盛溶接部 PWHT 材の曲げ試験により求められる CCTT との関係を示す。なお, 図中には初層から市販の 30 Cr-2 Mo 鋼溶加棒を用いて溶込率25%及び35%で作製した肉盛溶接部 PWHT 材 (溶込率35%については AW 材も含む) の CCTT についても合せて示している。

市販の 30 Cr-2 Mo 鋼溶加棒に比べて Cr 量を低減させた 26 Cr-2 Mo 鋼下盛溶加棒を用い, 溶込率25%で作製した肉盛溶接部 PWHT 材の CCTT は 293 K 及び溶込率35%の場合の CCTT は 323 K である。

19 Cr-2 Mo 鋼下盛溶加棒を用いた場合の肉盛溶接部 PWHT 材の CCTT は溶込率25%で 273 K, 溶込率35%

で 303 K となる。

さらに、Cr 量の低減を図った 15Cr-2Mo 鋼下盛溶接加棒を用い、溶込率25%で作製した肉盛溶接部 PWHT 材の CCTT は 243 K であり、溶込率35%で 253 K となる。

このように、肉盛溶接部 PWHT 材の曲げ延性は、下盛溶接加棒中の Cr 量の低下に伴い、改善される傾向にあることがわかる。

ところで、Fig. 4 中には、下盛溶接加棒として 15Cr-2Mo 鋼及び 30Cr-2Mo 鋼溶接加棒を用いて溶込率35%で作製した肉盛溶接部 AW 材の CCTT も合せて示している。AW 材の曲げ延性に注目すると、下盛材として 30Cr-2Mo 鋼溶接加棒を用いた溶込率35%時の肉盛溶接部 AW 材の CCTT が 273 K であるのに対し、15Cr-2Mo 鋼溶接加棒使用時のそれは 293 K と Cr 量が低下しているにもかかわらず、曲げ延性は逆に劣化しているのがわかる。さらに、15Cr-2Mo 鋼溶接加棒を用いた溶込率35%の肉盛溶接部においては、AW 材の CCTT は 293 K、PWHT 材のそれは 253 K と AW 材の曲げ延性は PWHT 材のそれよりも劣化していることがわかる。この結果は、第 1 報¹⁾において示した 30Cr-2Mo 鋼溶接加棒を下盛材として用いた肉盛溶接部の曲げ延性が PWHT の実施により著しく劣化するという事実と逆の傾向を示している。

組織観察の結果、15Cr-2Mo 鋼溶接加棒を下盛材として用い、溶込率35%で作製した肉盛溶接部中の溶融境界線近傍の結晶粒界付近には、Fig. 5 に見られるようなマルテンサイトの組織が観察された。すなわち、本溶接加棒の Cr 含有量は15%と他の溶接加棒の Cr 量に比べて低いこと、かつ溶込率が35%と比較的高いため、肉盛溶接部の組織はシェフラーの状態²⁾から予想されるようにフェライト+マルテンサイト組織になるものと推察され、この際生じたマルテンサイトが肉盛溶接部 AW 材の曲げ延性を著しく劣化させたものと考えられる。しかしながら、AW 材のマルテンサイトは、PWHT を行なうことにより焼もどされ、その結果、Fig. 4 中に示されたように PWHT 材の曲げ延性は AW 材に比べて良好な値となったものと推察される。

ところで、実際の溶接施工においては、使用するクラッド鋼の板厚が規格等で定められた PWHT 実施の臨界板厚に満たない場合、PWHT は不要となる。これらのことを考慮した場合、実溶接施工に適用される下盛材中の Cr 量の下限は肉盛溶接部の機械的特性を劣化させる危険性のあるマルテンサイトが生成するかどうかによって制限されるといえる。

Fig. 5 Microstructure of the 15Cr-2Mo steel overlay weld metal adjacent to the bond

以上の結果より、下盛材中の Cr 量の低減により、肉盛溶接部の曲げ延性が改善できることが確認されたが、その場合の Cr 量は AW 状態でマルテンサイトを生成させず、かつ大きな曲げ延性改善効果が得られるように設定することが必要であり、本実験で用いた溶接加棒では 19Cr-2Mo 鋼下盛溶接加棒を用いた場合が最も良い結果が得られた。

4. 下盛溶接加棒の Zr 添加低Cr化による肉盛溶接部の曲げ延性改善効果

前述のごとく、高純度フェライト系ステンレス鋼肉盛溶接部の曲げ延性は安定化元素を添加した下盛溶接加棒の使用により改善できる可能性がある。特に、0.28% Zr を添加した 30Cr-2Mo 鋼下盛溶接加棒を用い、溶込率25%で作製した肉盛溶接部 PWHT 材の CCTT は 263 K と極めて良好な曲げ延性を得ることが確認された。しかしながら、30% Cr を含有するフェライト系ステンレス鋼においては、良好な曲げ延性を確保できる最適 Zr 添加量範囲は極めて狭く、実施工時の種々の不確定要因を考慮した場合、本溶接加棒の使用は曲げ延性改善策として、それだけでは必ずしも十分であるとは言いがたい。

一方、Cr 量を低減したフェライト系ステンレス鋼下盛溶接加棒の採用もまた、肉盛溶接部の曲げ延性改善に有効であることが判明している。しかしながら、この方策においても 19Cr-2Mo 鋼下盛溶接加棒を用いた肉盛溶接部の CCTT は 273 K (溶込率25%)~303 K (溶込率35%)と市販の 30Cr-2Mo 鋼溶接加棒を用いた肉盛溶接部の曲げ延性に比べて著しい改善が認められるものの、その改善幅は実構造物の製作を想定した場合、さらに改善の余地があるといえる。

以上の観点より、より大幅な曲げ延性改善効果を得るため、安定化元素中で曲げ延性改善に最も有効であった Zr 添加と低 Cr 化の複合効果について検討を行なうことにした。

4.1 曲げ延性改善のための最適 Cr 量ならびに Zr 添加量の検討

Fig. 6~8 に下盛材としてそれぞれ Zr 量を種々変化

Fig. 6 Optimum Zr content range to obtain sufficient bend cutility (CCTT < 273K) indicating as a shaded region as a function of penetration ratio Filler metal (1st layer) : Zr containing 26Cr-2Mo steel

Fig. 7 Optimum Zr content range to obtain sufficient bend ductility (CCTT < 273K) indicating as a shaded region as a function of penetration ratio Filler metal (1st layer): Zr containing 19Cr-2Mo steel

Fig. 8 Optimum Zr content range to obtain sufficient bend ductility (CCTT < 273K) indicating as a shaded region as a function of penetration ratio Filler metal (1st layer): Zr containing 15Cr-2Mo steel

させた 26Cr-2Mo 鋼, 19Cr-2Mo 鋼及び 15Cr-2Mo 鋼溶加棒を用い, 実施工時の種々の不確定要因を考慮して, 溶込率を15%~35%の範囲で変動させた場合, 肉盛溶接部の曲げ延性の指標である CCTT がどのように変化するかについて調査を行なった結果を示す。各々の図中の斜線範囲内は 273 K 以下の良好な CCTT を有する肉盛溶接部を得ることのできる Cr 量及び適用溶込率に対する適正 Zr 添加量の範囲を示している。

下盛材として Zr 添加 26Cr-2Mo 鋼溶加棒を用いた肉盛溶接部の曲げ延性 (Fig. 6 参照) は, 溶込率の変動及び Zr 添加量の変動により影響を受けやすい。特に, 溶込率15%の肉盛溶接部における適正 Zr 添加量範囲は非常に狭く, 過剰の Zr 添加 (0.23%以上) は後述するごとく肉盛溶接部に凝固割れの発生をもたらす。このように, 26Cr-2Mo 系鋼下盛溶加棒において溶込率15%~35%まで安定した良好な曲げ延性を確保できる最適 Zr 添加量は約 0.2% であるが, その適正範囲は極めて

狭いことがわかる。

下盛材として, 15Cr-2Mo 系鋼溶加棒使用時 (Fig. 8 参照) には, 溶込率15%及び25%においては, 比較的広範な適正 Zr 添加量範囲を有するものの, 溶込率35%では下盛材に Zr 無添加から 0.2%程度までの Zr 添加溶加棒を用いた場合, 前述のごとく第一層目肉盛溶接部にマルテンサイトが生成する。肉盛溶接部にマルテンサイトが生じた場合においても, PWHT の実施により肉盛溶接部の曲げ延性の改善の可能なことが Fig. 8 からわかる。しかしながら, 実構造物においては AW 状態のまま使用される可能性もあることを考慮した場合, AW 材の CCTT は室温以上となり, AW 状態の曲げ延性の著しい劣化傾向が懸念される。

これに対し, 19Cr-2Mo 系鋼溶加棒を用いた場合 (Fig. 7 参照), 溶込率15%~35%において, 安定して良好な曲げ延性を有する広範な適正 Zr 添加量範囲が得られるのがわかる。すなわち, 19Cr-2Mo 系鋼溶加棒においては, Zr 無添加 19Cr-2Mo 鋼溶加棒を用い溶込率35%で作製した肉盛溶接部の曲げ延性を除き, 約 0.3% までの Zr 添加下盛溶加棒の採用により, 溶込率15%~35%の幅広い施工条件範囲内で 273 K 以下の優れた CCTT を有する肉盛溶接部の確保が可能となった。この範囲の中で特に優れた曲げ延性を得られるのは 0.15~0.25% Zr の範囲であり, 試作した溶加棒では 19Cr-2Mo-0.25 Zr 鋼溶加棒を下盛材として用いた肉盛溶接部は溶込率15%~35%の範囲内において 263 K 以下の CCTT を有する最も良好な曲げ延性を確保できることが明らかとなった。

以上のように, 下盛材への Zr 添加低 Cr 系溶加棒の使用により, 低 Cr 系溶加棒もしくは安定化元素添加溶加棒使用のそれぞれ単独の対策では得ることのできなかったより優れた肉盛溶接部の曲げ延性改善が可能であることが明らかとなった。

しかしながら, 今回の試験に供したいずれの Zr 添加低 Cr 系溶加棒を採用した場合においても, 過度の溶加棒中への Zr の添加 (例えば, 溶込率25%においては約 0.3% 以上) は, Fig. 9 の 19Cr-2Mo-0.41 Zr 鋼溶加棒を用いた例のごとく肉盛溶接部に凝固割れの発生することが認められた。したがって, 凝固割れの発生と曲げ延性改善効果の両者を勘案すると, 19Cr-2Mo 鋼の場合, Zr 添加量は約 0.25% とするのが妥当であるといえる。

4.2 硬さ分布

Fig. 10 に各種 Zr 添加低 Cr 系溶加棒の代表例として最も広範な曲げ延性改善領域を有することが明らかとなった Zr 添加 19Cr-2Mo 鋼溶加棒のうち, 0.1% 及び 0.25% Zr を添加した溶加棒を用いて溶込率25%で作製された肉盛溶接部の AW 材及び PWHT 材に対するビードに垂直な断面中の溶融境界線に対して直角方向の硬さ分布を示す。なお, 図中には比較材として Zr 無添加の 19Cr-2Mo 鋼溶加棒を下盛材に用いた肉盛溶接部 AW 材及び PWHT 材の硬さ分布も併記している。

AW 材においては, Zr 添加量の差による硬さの相違はほとんど認められず, 第一層目肉盛溶接部の硬さは約 Hv 210 であり, 第二, 三層目肉盛溶接部の硬さは約 Hv 230~240 であった。

一方, PWHT 材についても, Zr 添加量の差による硬

Fig. 9 Solidification cracking observed in the overlay weld metal using 19Cr-2Mo-0.41Zr steel as a filler metal for the first layer
(a) Optical microstructure (b) SEM microstructure

Fig. 10 Distribution of hardness in overlay welds

さの相違はほとんどなく、第一層目肉盛溶接部の硬さは約 Hv 220、第二、第三層目肉盛溶接部のそれは約 Hv 280 と AW 材の同一位置に比べて Hv 50 程度硬化していることがわかる。

4.3 金属組織学的検討

4.3.1 光学顕微鏡組織

Fig. 11 に Zr 添加量を0.10%から0.25%まで変化した 19Cr-2Mo 鋼溶加棒を下盛材として用い、溶込率25%の条件で溶接した代表的な肉盛溶接部 PWHT 材の光学顕微鏡組織を示す。

肉盛溶接部中の結晶粒は溶融境界線から溶接金属中に向かって成長しているのがみられる。第一層目肉盛溶接部中の結晶粒径は、Zr 添加量が増加するにつれ、より微細化する傾向が認められる。また、第一層目肉盛溶接部の結晶粒界は Zr 添加量の増加に伴い、よりジグザグ状を呈するのがわかる。第二層目より上層については、溶加棒中の Cr 量及び Zr 添加量の変化に伴う結晶粒の差異はほとんど認められず、いずれの場合もその結晶粒は粗大化傾向を示し、結晶粒界の形状は直線状となる。

4.3.2 析出物の挙動

肉盛溶接部中に存在する析出物を調査するため、肉盛溶接部の曲げ延性改善に有効に作用する 19Cr-2Mo-

Fig. 11 Microstructure of overlay weld metals post heat-treated
Filler metal (1st layer)
(a) 19Cr-2Mo-0.10Zr steel
(b) 19Cr-2Mo-0.16Zr steel
(c) 19Cr-2Mo-0.25Zr steel
Penetration ratio: 25%

0.25 Zr 鋼下盛溶加棒を用いて溶込率25%で作製した肉盛溶接部 PWHT の第一層目から抽出残渣を採取し、X線回折による同定を行なった結果を **Fig. 12** に示す。第

Fig. 12 X-ray diffraction pattern of residue extracted from the overlay weld metal post heat-treated
 Filler metal (1st layer): 19Cr-2Mo-0.25Zr steel
 Penetration ratio: 25%
 Analyzed region: 1st layer

Fig. 13 TEM microstructure of precipitate in overlay weld metal post heat-treated and its diffraction pattern and key diagram
 Filler metal (1st layer): 19Cr-2Mo-0.25Zr steel
 Penetration ratio: 25%
 Intragranular precipitate: ZrC

一層目肉盛溶接部中には $M_{23}C_6$, M_7C_3 及び ZrC の析出が確認された。

19Cr-2Mo-0.25Zr 鋼下盛溶加棒を用いて溶込率25%で作製された肉盛溶接部 PWHT 材の第一層目から抽出レプリカを採取し、TEM による析出物の電子線回折を行なった。パターン解析結果を Fig. 13 に示す。これより、第一層目肉盛溶接部の結晶粒内には ZrC の存在が確認された。

以上のような金属組織学的変化が Zr 添加低 Cr 系溶加棒を下盛材に用いた場合の肉盛溶接部の曲げ延性改善と密接な関連があると考えられるが、その改善機構に関しては次報で考察を行なう。

5. 結 論

本報では、第一層目肉盛溶接部に対して安定化元素添加下盛溶加棒、低 Cr 系下盛溶加棒及び安定化元素添加 (Zr 添加) 低 Cr 系下盛溶加棒採用時の高純度フェライト系ステンレス鋼肉盛溶接部の曲げ延性についての検討を通じて、曲げ延性改善に最も有効である下盛溶加棒の最適組成の検討を行なった。

以下に、得られた結果を列記する。

(1) 安定化元素として Nb , Ti もしくは Zr を取上げ、これらを約0.1%~0.45%の範囲内で添加した 30Cr-2Mo 鋼溶加棒を用いて作製した肉盛溶接部 PWHT 材に対する側曲げ試験の結果、溶加棒への Zr 添加が曲げ延性改善に最も有効であることが判明した。特に、30Cr-2Mo-0.28Zr 鋼下盛溶加棒の採用により、 Zr 無添加の場合に比べて肉盛溶接部 PWHT 材の CCTT を 70 K 低下させることが可能となった。

(2) 下盛溶加棒中の Cr 量の低減により、肉盛溶接部 PWHT 材の曲げ延性は向上する。しかしながら、 Cr 量の過度の低下は第一層目肉盛溶接部中に機械的特性に悪影響を及ぼすマルテンサイトが生成するため、この相の生成を抑制し、かつ、良好な曲げ延性を確保するには 19Cr-2Mo 鋼下盛溶加棒の使用が最適であることがわかる。この際、溶込率25%の肉盛溶接部 PWHT 材においては 273 K の CCTT を得ることができる。

(3) 下盛溶加棒の低 Cr 化を図り、同時に0.1~0.3%の Zr を添加した場合、PWHT を施した肉盛溶接部の曲げ延性を大幅に向上させることができる。その中でも 19Cr-2Mo-0.25Zr 鋼下盛溶加棒を用いた肉盛溶接部 PWHT 材は溶込率15%~35%までの溶接条件範囲内において、263 K 以下の CCTT を有する良好な曲げ延性が得られることが明らかとなった。

(4) Zr 添加 19Cr-2Mo 鋼下盛溶加棒を用いた第一層目肉盛溶接部の結晶粒径は Zr 添加量の増加に伴い微細化傾向を示すとともに、結晶粒界はよりジグザグ状を呈する。また、TEM 観察の結果、結晶粒内には Zr の析出が観察された。

参 考 文 献

- 1) 中尾, 西本, 辰巳, 野井, 塚原, 原, “肉盛溶接部の脆化現象”, 溶接学会論文集, Vol.4(1986), No.3, p.527-533
- 2) 中尾, 西本, 山崎, 野井, 塚原, 原, “肉盛溶接部の脆化機構”, 溶接学会論文集, Vol.5(1987), No.3, p.422-429
- 3) 富士川, 須藤, 牧浦他, “含 Zr フェライトステンレス鋼の成形性及び溶接性”, 鉄と鋼, Vol.65(1979), No.7, p.1094-1103
- 4) Y. Nishio, T. Ohmae, Y. Yoshida and Y. Miura, “Weld cracking and mechanical properties of 17% chromium steel weldment”, Welding Journal, 1971, p9s-19s
- 5) J. M. Sawhill, Jr and A. P. Bond, “Ductility and toughness of

- stainless steel welds", Welding Journal, 1976, p33s-41s
- 6) 門, 山崎, 山内, 矢部, "18%Cr鋼の溶接部の靱性におよぼす合金元素の影響", 鉄と鋼, Vol.63(1977), No.5, p.883-893
- 7) Anton L. Schaeffler, "Selection of austenitic electrodes for welding dissimilar metals", Welding Journal, 1974, Oct., p601s-620s

Zr 添加低 Cr 系下盛溶加棒による肉盛溶接部の曲げ延性改善機構*

—高純度フェライト系ステンレスクラッド鋼の溶接に関する研究 (第4報)—

中尾嘉邦**, 西本和俊**, 山崎和信***野井伸悟****, 塚原 宏****, 原 泰弘****

Mechanism of Improvement of the Bend Ductility of the Overlay Weld prepared with Zirconium Containing Low Chromium type Steel Filler Metal*

—Study on Welding of the Low Interstitial Ferritic Stainless Clad Steel (Report 4)—

by Yoshikuni Nakao**, Kazutoshi Nishimoto**, Kazunobu Yamazaki***,
Shingo Noi****, Hiroshi Tsukahara**** and Yasuhiro Hara****

The mechanism of improvement of the bend ductility of the low interstitial ferritic stainless steel overlay welds prepared with zirconium containing low chromium type steel filler metal for the first layer has been investigated.

In the previous report, it was indicated that the thickness of chromium carbide, 475°C embrittlement and grain coarsening were factors affecting embrittlement in the overlay welds.

Decreasing in chromium content in the first layer of the weld metal contributed to mitigation of 475°C embrittlement and decreasing of the thickness of chromium carbide on the grain boundary in the overlay weld metal. Addition of zirconium to the first layer of the ferritic stainless steel overlay welds made the thickness of chromium carbide decrease and also the grain size refine.

These resulted in an excellent weld ductility for the overlay welds.

Key Words: Low interstitial ferritic stainless steel, Overlay weld, Bend ductility, Improvement, Chromium carbide, grain size, 475°C embrittlement, Filler metal, Mechanism, Intergranular carbide thickness

1. 緒 言

前報¹⁻³⁾までにおいて、肉盛溶接部の曲げ延性は、下盛材への Zr 添加低 Cr 系溶加棒の採用により大幅に改善されることが明らかとなった。特に、下盛材として 19Cr-2Mo-0.25Zr 鋼溶加棒を用いた場合には、溶込率15%~35%までの幅広い溶接条件範囲において、安定して良好な曲げ延性を有する肉盛溶接部を得ることが可能となった。

しかしながら、Zr 添加低 Cr 系下盛溶加棒の使用による肉盛溶接部の曲げ延性改善に対して、粒界の Cr 炭化物幅、475°C 脆化及び結晶粒径が影響を及ぼしているものと推察されているものの、その詳細についてはいまだ不明である。

本報においては、下盛材への Zr 添加低 Cr 系溶加棒

使用時の肉盛溶接部の曲げ延性改善機構の解明を目的として、前報までに明らかにした肉盛溶接部の脆化要因 (粒界の Cr 炭化物幅、475°C脆化及び結晶粒径) の変化に着目して検討を行なった。

2. 供試材料ならびに実験方法

本試験に供した肉盛溶接部は、Table 1 中の溶加棒を用いて、板厚 38 mm の炭素鋼板上にティグ法により、溶込率15%~35%の範囲で下盛溶接を行なった後、その上層には市販の高純度 30Cr-2Mo 鋼溶加棒 (Table 1 中のHM) を用い、溶込率25%で肉盛溶接を行なうことにより作製した。

肉盛溶接部の組織観察は、光学顕微鏡及び走査型電子顕微鏡 (以後 SEM と呼ぶ) を用いて行なった。これらの試料には、塩酸 (10%) + エチルアルコール (90%) 溶液中で電圧 35V で 20s 間の電解研磨の後、電圧 3V で 10s 間の電解腐食を行なった。肉盛溶接部の破面観察には SEM を用い、その試料には一部破面上の析出物を観察するため塩酸 (10%) + エチルアルコール (90%) 溶液を用い、電圧 3V で 20s の電解腐食を行ない、粒界を現出させ観察に供した。Table 2 に第2報²⁾ で用いた高純度 30Cr-2Mo 鋼を炭素鋼上に肉盛溶接した場合の第一層目肉盛溶接部をシミュレートするため、Cr 量を26%に低下させ、C量を0.002~0.049%の範囲で5段階に変化させた引張試験材の化学組成を示す。これらの鋼

*原稿受付 昭和62年11月11日 昭和61年度春季全国大会で発表

**正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering Osaka University

***正 員 大阪大学大学院 (現在: 日新製鋼 (株)) Member, Graduate school, Osaka University (Present address: Nisshin Steel Co., Ltd.

****正 員 (株) 新潟鉄工所 Member, Niigata Engineering Co., Ltd.

***** (株) 新潟鉄工所 Niigata Engineering Co., Ltd.