ハステロイ XR の溶接性に関する評価†

清水 茂樹* 佐藤 瓊 介*
 武藤 康** 小川 豊**

Evaluation of Weldability of Hastelloy XR

by

Shigeki SHIMIZU, Keisuke SATOH

(Kawasaki Heavy Industries, Ltd., Kawasaki)

Yasushi MUTOH and Yutaka OGAWA

(Japan Atomic Energy Research Institute, Ibaragi)

Hastelloy XR has been developed in Japan Atomic Energy Research Institute to improve the corrosion resistance of Hastelloy X in VHTR helium environment.

To evaluate weldability of Hastelloy XR, bead welding tests by EB welding and Trans-Varestraint tests by TIG welding were carried out.

The results obtained are as follows.

(1) The weld defects formed in the bead welding test by EB welding were R-porosity and microcracks, both of which are the same as in Hastelloy X.

R-porosity and microcracks can be prevented by using a proper a_0 value and by controlling the weld heat input, respectively.

(2) In the Trans-Varestraint test by TIG welding, susceptibility to weld cracking was the same for both Hastelloy XR and Hastelloy X. To eliminate microcracking in TIG welding, it is effective to decrease the welding current.

(Received July 8, 1982)

キー・ワード：ハステロイ XR, ポロシティ, ミクロ割れ

1 緒 言

多目的高温ガス炉用耐熱合金候補材であるハステロイ X は、在来合金に比して高温ヘリウム中の不純物の影響を受け難い比較的安定な合金であることが確認されている。ハステロイ X の高温ヘリウム中の耐食性をさらに改善する目的で、Mn を高めて表面被膜の保護性を向上し、Al, Ti をできるだけ低くして局部酸化を阻止し、さらに誘導放射能の問題から Co を低くしたハステロイ XR が日本原子力研究所において開発された^{1)~4)}。現在、このハステロイ XR は多目的高温ガス実験炉用材料として最も有力なものである。この材料の高温ヘリウム中における諸特性については鋭意研究が進められているが、溶接性については未だ検討されていない。

本資料ではハステロイ XR について電子ビーム溶接

によるビード溶接試験および TIG 溶接によるトランスバレストレイント試験を行った結果に基づいて、溶接部に発生する欠陥特性を明確にすると共に適正溶接諸元の範囲を設定した。また、得られた結果については、ハステロイ X の結果^{5,6)}と比較検討した。

2 電子ビーム溶接によるビード溶接試験

2・1 溶接装置

本試験に使用した電子ビーム溶接装置は、150 kV-40 mA 型 6 kW 高電圧電子ビーム溶接機である。

2・2 供試材料および実験方法

2・2・1 供試材料 供試材料として Table I(a)に示したハステロイ XR を使用した。なお、比較検討材として Table I (b)に示したハステロイ X を使用した。ハステロイ XR に比較して HAEN は Ti が高く、HAEM は Mn が低く、Al が高く、HVEN は Al, Ti が高い。本実験に使用した溶加棒は母材と同じハステロイ XR である。

2・2・2 実験方法 Fig.1 に示す斜面溶接法を採用し、電子ビーム溶接法にてビード溶接試験を行った。試験片を斜面角 $\theta_s=30^\circ$ となるようにテーブルに設

† 本報を「ハステロイ XR の溶接性とクリープ強度に関する研究 (第1報)」(Studies on Weldability and Creep Strength of Hastelloy XR, I)とする。

原稿受理 昭和57年7月8日

* 正 会 員 川崎重工業(株) 川崎市川崎区桜本

** 日本原子力研究所 茨城県那珂郡東海村

Table I. Chemical compositions and mechanical properties of Hastelloy X alloys.

(a) Hastelloy XR																		
Thick- ness (mm)	Mechanical properties			Chemical composition (%)														
	0.2% P.S (kg/ mm ²)	T.S (kg/ mm ²)	El. (%)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	B	Fe	N
6	40.4	72.9	45.8	0.07	0.31	0.90	<0.005	<0.005	Bal.	21.67	<0.05	8.97	0.49	<0.05	<0.05	<0.001	18.31	0.006
15	43.5	73.5	44.4															

(b) Hastelloy X																		
Mark	Thick- ness (mm)	Mechanical properties			Chemical composition (%)													
		0.2% P.S (kg/ mm ²)	T.S (kg/ mm ²)	El. (%)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	B	Fe
HAEN	20	30.4	71.1	59.0	0.066	0.48	0.88	0.016	<0.002	Bal.	21.36	1.77	9.05	0.45	0.07	0.15	0.002	19.09
HAEM		38.7	75.0	47.6	0.068	0.37	0.59	0.012	<0.002		20.74	1.03	8.70	0.50	0.21	0.02	0.001	18.23
HVEN		34.3	73.8	49.3	0.084	0.17	0.84	0.001	<0.002		20.70	1.59	9.20	0.55	0.22	0.19	0.002	18.53

(c) Filler wire																		
Dia. of filler wire	Chemical composition (%)																	
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	B	Fe	N			
1.2 ^φ	0.07	0.29	0.88	<0.005	<0.005	Bal.	21.44	0.05	8.84	0.47	<0.05	<0.05	<0.001	18.05	0.006			

置して、電子銃を固定し、テーブルを移動し、図の矢印の方向にアップスロープ溶接を行った。なお、この場合、ビームの焦点距離 D_f は 200 mm 一定にし、対物距離 D_0 は試験片中央で 200 mm となるようにした。

溶接後は Fig. 2 に示すような要領で X線透過試験を実施し、溶接部の欠陥、特にポロシティの発生状況について調査した。X線透過試験後、溶接部より試験

Fig. 1. Bead welding test by slope welding.

Fig. 2. X-ray inspection method of weld by bead welding test.

片を採取し、溶接部横断面を研磨腐食後、溶込み深さ、ビード幅を測定した。また、マイクロ割れおよびポロシティについて光学顕微鏡観察を行った。

2・3 実験結果および考察

溶接部の X線透過試験および顕微鏡組織観察の結果、ポロシティおよびマイクロ割れが認められた。以下にそれぞれの特性について述べる。

2・3・1 ポロシティ 溶接部の X線透過試験および顕微鏡試験の結果認められたポロシティは、いずれも溶込み深さの先端、すなわちルート部近傍に発生する R ポロシティである。発生した代表的な R ポロシテ

Welding conditions :
Vb = 150 kV
I b = 40 mA
v b = 800 mm/min
a b = 0.90
Material : Hastelloy XR

Electrolytically etched (10% Oxalic acid)

Fig. 3. Typical R-porosity.

を Fig.3 に示す。

Fig.4 は各溶接条件における a_b 値と溶込み深さおよびビード幅の関係、およびポロシティの発生領域を示したものの代表例である。ここで a_b 値は、 $a_b \equiv D_0/D_F$ (D_0 : 対物距離, D_F : ビーム焦点距離, Fig.1 参照) で定義されるパラメータであり、電子ビームの活性変数と呼ばれ、電子ビーム溶接の特性を支配する重要な変数である。Fig.4 の代表例に示したように、溶接条件にかかわらず a_b が約0.9~1.0において溶込み深さが最大となり、またポロシティは最大溶込深さ近傍で発生している。

R ポロシティの発生範囲を a_b と $w_B(=I_b V_b/2r_b v_b)$, I_b : ビーム電流, V_b : 加速電圧, r_b : アクチュアルビーム半径, v_b : 溶接速度) を用いて整理し、材料のポロシティ発生度を評価することができる。ここで w_B は電子ビームのビードエネルギー密度として定義されるものである。すなわち、溶接入熱をアクチュアルビーム径で除した数値であり、溶接過程で材料の表面に与えられる電子ビームのエネルギー密度である。ハステロイ XR の R ポロシティ発生範囲を a_b と w_B を用いて整理すると Fig.5 に示すようになる。溶込み深さおよび入熱がそれぞれ 15 mm および 5 000 Joule/cm

以下の場合の R ポロシティの発生範囲を示したもので斜線の部分が発生範囲である。

Fig. 4. Effect of electron beam weld geometry on the generation of porosity.

Fig. 5. Effect of bead energy density and active parameter on the occurrence of R-porosity.

Fig. 6. Evaluating method for R-porosity.

Rポロシティの発生度は Fig.6 に示す 発生範囲の面積 S_p , ポロシティ発生範囲における最大ビードエネルギー密度 $w_{B.m}$ およびポロシティ発生限界の a_b の差, すなわち Δa_b により評価できる. S_p が小なるほど, $w_{B.m}$ は大なるほど, また Δa_b については小なるほど材料の耐Rポロシティ性が優れている. Table II はハステロイ XR のポロシティ発生度を S_p , $w_{B.m}$ および Δa_b で評価し, ハステロイ X と比較したものである. ハステロイ XR は, ハステロイ X に比して S_p は大, $w_{B.m}$ は小, Δa_b は大で, いずれの指標においても耐Rポロシティ性はやや劣っているが, その程度は小さい.

Table II. Comparison of susceptibility to R-porosity between Hastelloy XR and Hastelloy X.

Material	$S_p/S_{p.m}$	$w_{B.m}$ (J/cm ²)	$a_{b.1}$	$a_{b.2}$	Δa_b
Hastelloy XR	1.00	2.65×10^4	0.75	1.10	0.35
Hastelloy X (HAEN)	0.98	2.95×10^4	0.83	1.08	0.25
Hastelloy X (HAEM)	0.84	2.95×10^4	0.89	1.09	0.20
Hastelloy X (HVEN)	0.85	2.95×10^4	0.87	1.07	0.20

Note: $S_{p.m}$ means max. S_p in this experiment.

2・3・2 ミクロ割れ 溶接部横断面を電解研磨後, 10% しゅう酸溶液を使用して電解腐食し, 溶接部断面の顕微鏡組織を観察し, 溶接部のミクロ割れについて調査した.

ミクロ割れの代表例を Fig.7 に示すが, 溶融境界線近傍の熱影響部および溶接金属部において, いずれも溶融境界線にはほぼ直角方向に発生し, 熱影響部では結晶粒界, 溶接金属部ではデンドライトの境界に認められる.

Fig.8 は溶接入熱とミクロ割れ発生率(同一入熱において割れの認められた試験片数と全試験片数の比率)の関係を示したものである. 入熱が増大するにしたがってミクロ割れ発生の傾向が大になるが, 入熱がある値以下になるとミクロ割れは全く認められなくなる. この値をミクロ割れ阻止限界入熱 q_{cr} と定義して

Electrolytically etched (10% Oxalic acid)

Fig. 7. Microstructure of typical microcrack.

Welding conditions :
 $V_b = 150\text{ kV}$
 $I_b = 40\text{ mA}$
 $v_b = 800\text{ mm/min}$
 $a_b = 0.75$
Material : Hastelloy XR

いる. q_{cr} の値の大なるもの程耐割れ性が良好である. Table III はハステロイ XR のミクロ割れ感受性を q_{cr} で評価し, ハステロイ X の q_{cr} と比較して示したものである. ハステロイ XR はハステロイ X のうち最も耐割れ性の優れた HAEM とほぼ同等の耐割れ性を示している.

Fig. 8. Effect of heat input on microcracking percentage.

Table III. Comparison of critical heat input for microcrack formation.

Material	q_{cr} (Joule/cm)
Hastelloy XR	2 000
Hastelloy X (HAEN)	1 406
Hastelloy X (HAEM)	2 143
Hastelloy X (HVEN)	1 286

3 材料の融点の測定

Table I に示した 6 mm 厚さのハステロイ XR の融点を熱分析装置を使用して測定した. 試料の形状は $4\phi \times 7\text{ mm}$ の円柱状とし, その底部に孔をあけ, アルミナ炉ツボに挿入し, 0°C から 1000°C までは 20°C/min , 1000°C から 1500°C までは 5°C/min の加熱速度で上昇せしめた. その際に温度・時間曲線において, 溶融潜熱による微小な変化から, 溶融終了温度 T_L と溶融開始温度 T_S を求めた.

Table IV. Melting temperature of Hastelloy X alloys.

Material	Melting temperature (°C)		
	T_L	T_S	$\Delta T (= T_L - T_S)$
Hastelloy XR	1342	1310	32
Hastelloy X (HAEN)	1337	1316	21
Hastelloy X (HAEM)	1367	1345	22
Hastelloy X (HVEN)	1347	1329	18

Table IV はハステロイ XR およびハステロイ X の溶融終了温度 T_L および溶融開始温度 T_S を示す。

4 トランスバレストレイント試験

4・1 供試材料および実験方法

Table I に示した 6 mm 厚さのハステロイ XR を使用した。母材試験板には $5^{\circ} \times 100 \times 100$ mm に切削した試験板、肉盛試験板は Fig.9 に示すように供試材料の中央部を深さ 2 mm、幅 15 mm に切削した後、Table I に示した溶加棒を利用して TIG 溶接により肉盛溶接し、 $5^{\circ} \times 100 \times 100$ mm に切削した試験板を使用した。

Welding conditions					
Pass	Dia. of filler wire	Welding current	Arc voltage	Welding speed	Shield gas flow
10	1.2 mm	70 ~ 80 A	8 ~ 9 V	50 ~ 60 mm/min	6 l/min

Fig. 9. Preparation method of overlaying test plate.

試験方法は概略図を Fig. 10 に示す。試験板を曲げブロック上に設置し、試験板の A 点より TIG 溶接を開始し、30 mm トーチ移動後、B 点にて 300 mm/sec の曲げ速度でヨークにより試験板を曲げ、所定の曲げ半径を有するダイブロックに試験板を圧着させ、所定の曲率に変形させた。その後トーチを 20 mm 移動させ C 点でアークを消失させた。これはクレータ割れの影響を除去するためである。曲げブロックの曲率と試験板表面の付加ひずみは次式で与えられ、

$$\varepsilon = (t \times 100) / 2R (\%)$$

t : 試験板厚さ (mm), R : 曲げブロック曲率 (mm)
曲げブロックの曲率を変化させることにより、付加ひずみを試験板表面に与えることができる。

なお、溶接金属中央部の熱サイクルを計測するために、曲げひずみ付加時に $0.25 \text{ mm}\phi$ の W-5% Re-W-26% Re の熱電対をアーク直後のビード中央へ瞬間的に投入し、溶接金属の凝固、冷却の過程の熱起電

Fig. 10. Schematic explanation of Trans-Varestraint test.

力を電磁オシログラフで記録した。

溶接後、溶接部に発生した割れの状況を実体顕微鏡により 30 倍に拡大して観察し、割れの長さを測定した。

4・2 実験結果および考察

実体顕微鏡により割れを観察した結果、溶接金属には凝固割れが生じている。割れの代表例を Fig. 11 に示すように、ある特定のリップル間に発生し、最大割れはビードのほぼ中央に認められた。

Fig. 12 はハステロイ XR の付加ひずみ量と最大割れ長さの関係をハステロイ X と比較して示したものである。ハステロイ XR はいずれの付加ひずみ量においても、発生する最大割れ長さはハステロイ X に比較

Welding conditions:
9.2V-120A-60mm/min
Material:HastelloyXR
Augmented strain:2.5%

Fig. 11. Typical cracks observed in Trans-Varestraint test.

Fig. 12. Relationship between augmented strain and maximum crack length for Hastelloy X alloys.

Fig. 13. Relationship between augmented strain and maximum crack length for Hastelloy XR and the weld metal.

して同等以下である。Fig. 13 は付加ひずみ量と最大割れ長さの関係について、ハステロイ XR の母材試験板と肉盛試験板を比較したものである。両者の間にはほとんど差異は認められない。

高温割れは、凝固直後の材料の延性がきわめて低くなる温度領域で発生する。この温度領域をぜい性温度領域 $TVTr$ と定義すると、この値の大なるほど割れ感受性が大である。

溶接ビード中央部の温度曲線と最大凝固割れ長さの関係より、温度・付加ひずみ座標で $TVTr$ を図示することができる。Fig. 14 はハステロイ XR のぜい性温度領域 $TVTr$ を示したものであり、ハステロイ X の $TVTr$ と比較して示した。図中の斜線部が割れ発生の $TVTr$ である。各材料のひずみ量が 5% のときの $TVTr$ を $TVTr \cdot 5\%$ とし、この $TVTr \cdot 5\%$ により各材料の割れ感受性を評価したのが Table V である。これによるとハステロイ XR の $TVTr \cdot 5\%$ は HAEM を除くハステロイ X のいずれの材料に比しても小さく、

Fig. 14. Comparison of brittle temperature range on Hastelloy X alloys.

Table V. Comparison of $TVTr \cdot 5\%$ between Hastelloy XR and Hastelloy X.

Material	$TVTr \cdot 5\%$ (°C)
Hastelloy XR	162
Hastelloy X (HAEN)	286
Hastelloy X (HAEM)	187
Hastelloy X (HVEN)	307

ハステロイ XR の耐割れ感受性はハステロイ X のうち最も耐割れ性の優れた HAEM とほぼ同等である。前述したように電子ビーム溶接の耐割れ感受性については、ハステロイ XR, HAEM は HAEN, HVEN に比して優れているが、トランスバレストレイント試験においても同様の傾向を示した。Table I に示したようにハステロイ XR, HAEM の Ti 含有量が HAEN, HVEN に比して低く、Ti 含有量が割れ感受性に影響しているかも知れない。これについては、さらに究明する必要がある。

Fig. 15 はハステロイ XR の母材試験板と肉盛試験板の割れ感受性を比較したものである。いずれも $TVTr \cdot 5\%$ は約 162°C の値を示しており、母材試験板と肉盛試験板の間には顕著な差異は認められない。

Fig. 16 および Fig. 17 はハステロイ XR について母材および肉盛試験板の最大割れ長さを入熱の関係を示したものである。いずれの場合も入熱 8000 Joule/cm で最大割れ長さは最小値を示しており、入熱 4000 Joule/cm では反って増大し、入熱が減少しても必ずしも最大割れ長さは減少していない。Fig. 18 および Fig. 19 は母材および肉盛試験板の最大割れ長さをアーク出力で整理したものであり、アーク出力の減少に従って割れ長さが減少する傾向が認められる。適正溶

Fig. 15. Comparison of brittle temperature range between Hastelloy XR and the weld metal.

Fig. 16. Relationship between heat input and maximum crack length for Hastelloy XR base metal.

Fig. 17. Relationship between heat input and maximum crack length for Hastelloy XR weld metal.

接条件保持のためには溶接電流に比例してアーク電圧を変化させる必要があるため、最大割れ長さは溶接電流により主として支配されと考えられる。

5 結 論

ハステロイ XR の溶接性について検討した結果、次のような結論が得られた。

- (1) 電子ビーム溶接によるビード溶接試験の結果、

Fig. 18. The dependence of welding current on maximum crack length for Hastelloy XR base metal.

Fig. 19. The dependence of welding current on maximum crack length for Hastelloy XR weld metal.

発生する欠陥はハステロイ X と同様、R ポロシティとマイクロ割れであり、耐ポロシティ性、耐割れ感受性はハステロイ X とほぼ同等である。R ポロシティは a_b 値を適正にすることにより、マイクロ割れは溶接入熱を制御することにより防止することが可能である。

(2) トランスバレストレイント試験の結果、耐割れ感受性はハステロイ X とほぼ同等である。また、TIG 溶接における高温割れを防止するには溶接電流を低くすべきである。

(昭和56年5月18日 日本材料学会第30期学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 新藤雅美, 鈴木富男, 近藤達男, 学振123委員会報告書, 17, No. 3, 383 (1976).
- 2) 新藤雅美, 鈴木富男, 近藤達男, 学振123委員会報告書, 19, No. 3, 331 (1978).
- 3) 新藤雅美, 鈴木富男, 近藤達男, 学振123委員会報告書, 20, No. 3, 313 (1979).
- 4) 木内 清, 近藤達男, 第16回高温強度シンポジウム前刷集, p.116 (1978).
- 5) Y. Arata, K. Terai, H. Nagai, S. Shimizu and T. Aota, Trans. of JWRI, 5, 219 (1976).
- 6) Y. Arata, K. Terai, H. Nagai, S. Shimizu and T. Aota, Trans. of JWRI, 6, 69 (1977).
- 7) T. Senda, F. Matsuda, G. Takano, K. Watanabe, T. Kobayashi and T. Matsuzaka, Trans. of JWS, 2, No.2, 45 (1971).