

THIẾT LẬP QUY TRÌNH HÀN THÉP BỀN NHIỆT P22/P91 ỨNG DỤNG CHO ĐƯỜNG ỐNG ÁP LỰC TRONG NHÀ MÁY NHIỆT ĐIỆN

ESTABLISHING THE DISSIMILAR WELDING PROCEDURE SPECIFICATION BETWEEN P22 / P91 STEELS FOR PRESSURE PIPES IN THERMAL POWER PLANTS

ĐỖ THANH TÙNG^{1*};

¹ Phòng thí nghiệm trọng điểm Công nghệ Hàn và Xử lý bề mặt – Viện nghiên cứu Cơ khí, Số 4, Phạm Văn Đồng, Mai Dịch, Cầu Giấy, Hà Nội

* Dttung1010@gmail.com

Tóm tắt: Báo cáo trình bày kết quả thiết lập quy trình hàn thép bền nhiệt khác nhau ứng dụng cho đường ống áp lực của các nhà máy nhiệt điện theo tiêu chuẩn ASME Sec. IX /AWS D1.1. Quy trình hàn được kiểm chứng thông qua thực nghiệm hàn hai loại thép bền nhiệt P22 và P91 bằng Quá trình Hàn hồ quang bằng điện cực không nóng chảy trong môi trường khí bảo vệ (GTAW). Chất lượng hàn được đánh giá qua các kết quả thử nghiệm không phá hủy (NDT), đo độ bền kéo, uốn ngang, độ cứng tế vi HV và thành phần hóa học. Quy trình hàn đã và đang được dùng trong các nhà máy nhiệt điện tại Việt Nam (Vũng Áng 1, Thái Bình 2, Sông Hậu, Quảng Ninh, Mông Dương...).

Từ khóa: *Mối hàn kim loại khác nhau, thép P22, thép P91, WPS, nhà máy nhiệt điện*

Abstract: This paper presents the results of establishing heat resistance welding procedure specification applied for pressure pipes in thermal power plants according to ASME Sec. IX/ AWS D1.1. The welding procedure specification was verified through the welding experience of heat-resistant metals P22 and P99 by process of welding tungsten electrode in gas environment (GTAW). Welding quality is assessed by the results of: NDT tests, tensile strength, cross bending, HV micro hardness and chemical composition. The process has been used in thermal power plants in Vietnam. (Vung Ang 1, Thai Binh 2, Song Hau, Quang Ninh, Mong Duong...).

Keywords: *Dissimilar metal weld; P22 steel; P91 steel; WPS; thermal power plants*

I. MỞ ĐẦU

Hiện nay, hai nhóm thép hợp kim P22 và P91 được sử dụng tương đối rộng rãi cho việc chế tạo đường ống lò hơi và các thiết bị khác trong các nhà máy nhiệt điện do chịu được nhiệt cao và áp suất cao, giá cả hợp lý dù tính hàn tương đối khó. Thép hợp kim P22 hay còn gọi là thép 2,25Cr-1Mo và thép P91 còn gọi là thép 9Cr-1Mo thuộc nhóm thép ferrite bền nhiệt có độ bền mỏi tốt khi làm việc ở nhiệt độ cao. Thép hợp kim P91 được bổ sung thêm hàm lượng nhỏ các nguyên tố như vanadium, niobium và ni-tơ với mục đích cải thiện cơ tính và khả năng chịu mài mòn khi làm việc ở nhiệt độ cao, nhưng tính hàn vẫn giống với các nhóm thép hợp kim Cr-Mo trước đó [1-3].

Quá trình hàn các kim loại đồng nhất thường thuận lợi hơn so với hàn các kim loại khác chủng loại (DMW). Khi các kim loại khác nhau được liên kết bằng hàn nóng chảy, xảy ra hiện tượng hòa trộn các thành phần tạo nên mối hàn, do đó hợp kim hóa giữa kim loại cơ bản và kim loại bổ sung là mối quan tâm chủ yếu. Thành phần kim loại mối hàn thay đổi theo thiết kế, quá trình hàn, kim loại bổ sung và quy trình hàn (WPS)...

Hàn DMW cũng có yêu cầu về biến số hàn như hàn thông thường, nhưng những hiệu ứng tương tác của kim loại khác nhau cần được xem xét qua từng ứng dụng. Đặc trưng kết tinh của kim loại mối hàn DMW bị ảnh hưởng do khác thành phần và sự hòa lẫn tương đối

của kim loại cơ bản. Kim loại bổ sung cần được chọn để tránh được xu hướng nứt nóng khi kết tinh và đảm bảo ổn định cấu trúc luyện kim sau này.

II. NỘI DUNG

2.1. Đối tượng và Phương pháp

Đối tượng nghiên cứu là thiết lập quy trình hàn DMW cho mối hàn giáp mỗi hai ống thép áp lực P91 và P22 sử dụng chế tạo hệ thống lò hơi trong các nhà máy nhiệt điện. Các mẫu dùng để thực hiện thí nghiệm hàn được chuẩn bị như sau:

- Thép ống P22 : Đường kính 51 mm, dày 9.53 mm, dài 200 mm.
- Thép ống P91: Đường kính 51 mm, dày 9.53 mm, dài 200 mm.

Thành phần hóa học kim loại cơ bản được thể hiện trong Bảng 1. Kết quả được đo bằng phương pháp EOS (quang phổ phát xạ). Cơ tính của hai thép hợp kim P22 và P91 được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 1. Thành phần của thép P22, P91 (wt-%)

Loại	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	Ti
P22	0,122	0,51	0,273	2,11	0,0511	1,01	0,0594	0,005	0,005	0,0048
P91	0,121	0,379	0,276	8,31	0,0854	0,883	0,085	0,226	0,0878	0,0094

Bảng 2. Cơ tính của thép P22 và P91

Loại	Độ bền kéo (MPa)	Giới hạn chảy (MPa)	Độ dẫn dài dọc thớ (%)
P22	≥415	205 min.	30
P91	585~760	415 min.	20

Phương pháp công nghệ: Để thiết lập quy trình hàn DMW cho việc hàn hai loại thép hợp kim P91 và P22, tác giả đã nghiên cứu về thép hợp kim P22, P91 và công nghệ hàn thép bền nhiệt Cr-Mo, phân tích các tính chất của các thép này, từ đó lựa chọn, thiết lập quy trình phù hợp để tiến hành thực nghiệm theo điều kiện tốt nhất có thể.

2.2. Thiết lập quy trình hàn sơ bộ (pWPS) với mối hàn giáp mỗi hai thép P22 và P91

a. Lựa chọn công nghệ và vật liệu hàn

Công nghệ hàn để thực hiện hàn giáp mỗi hai ống hợp kim P22 và P91 là quá trình GTAW.

Bảng 3. Khuyến cáo chọn vật liệu hàn khi hàn thép P22 và P91 theo AWS 5.28

Base Metals	C-Steel	C-Mo	1/2-1-1/4 Cr-Mo	2 & 2-1/4 Cr-Mo	3 & 5 Cr-Mo	7 Cr-Mo	9 Cr-Mo	9 Cr-Mo-V	3XX-SS
C-Steel	1	A	A	A	A	A	A	A	I ³
C-Mo	A	B	B	B	B	B	B	B	I ³
1/2-1-1/4 Cr-Mo	A	B	C ²	C	C	C	C	C	I ³
2 & 2-1/4 Cr-Mo	A	B	C	D	D	D	D	D	I ³
3 & 5 Cr-Mo	A	B	C	D	E	E	E	E	I ³
7 Cr-Mo	A	B	C	D	E	F	F	F	I ³
9 Cr-Mo	A	B	C	D	E	F	G	G	I ³
9 Cr-Mo-V	A	B	C	D	E	F	G	H	I ³
3XX-SS	I ³	I ³	I ³	I ³	I ³	I ³	I ³	I ³	4
Letter	Composition	SMAW ⁶			GTAW/GMAW		FCAW		
A	C-Steel	E7108			ER70S-2 or 3		E7X-T5M, -T9M, or -T12M		
B	C-Mo	E7018-A1			ER70S-B2L or ER80S-B2 (7)		E7XT5-A1M or E8XT1-A1M		
C	1-1/4 Cr-Mo	E7018-B2L or E8018-B2			ER70S-B2L or ER80S-B2		E8XTX-B2LM or E8XTX-B2M		
D	2-1/4 Cr-Mo	E8018-B3L or E9018-B3			ER80S-B3L or ER90S-B3		E9XTX-B3LM or E9XTX-B3M		
E	5 Cr-Mo	E8018-B6 or B6L E502-15 ⁸			ER80S-B6 ER502 ⁹		Note 7		
F	7 Cr-Mo	E8018-B7 or B7L E7 Cr-15 ⁸			Note 7		Note 7		
G	9 Cr-Mo	E8018-B8 or B8L E505-15 ⁸			ER80S-B8 ER505 ⁹		Note 7		
H	9 Cr-Mo-V	E9018-B9			ER90S-B9		Note 7		
I	Ni-Cr-Fe	ENiCrFe-2 or -3			ERNiCr-3		Note 7		

Lựa chọn vật liệu hàn được đưa ra cụ thể trong Bảng 3. Các vật liệu hàn này tương ứng các nhóm vật liệu đề cập trong AWS cho các loại que hàn, dây hàn khi dùng các phương pháp SMAW, GMAW, GTAW để hàn. Các quá trình hàn khác, thì vật liệu hàn sẽ được khuyến cáo trong từng quá trình hàn cụ thể. Theo Bảng 3 ta lựa chọn được vật liệu hàn phù hợp là ER90S-B3. Ta có thành phần hóa học kim loại que hàn được thể hiện trong Bảng 4.

Bảng 4. Thành phần của que hàn ER90S-B3 (wt-%)

Loại	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	Ti
ER90S-B3	0,115	0,613	0,452	2,97	0,0539	0,92	0,252	0,0261	0,0134	0,0047

b. Gia nhiệt trước khi hàn (Preheating)

Khi hàn thép Cr-Mo đều yêu cầu nung sơ bộ cũng như duy trì nhiệt độ giữa các đường hàn. Nhiệt độ nung sơ bộ được khuyến cáo như trong Bảng 5.

Bảng 5. Khuyến cáo nhiệt nung sơ bộ khi hàn thép hợp kim P22 và P91 [4]

Base Metal	°F	°C
C-Steel	50	10
C-Mo and 1/2 Cr-Mo	175	80
1-1-1/4 Cr-Mo	250	120
2-3 Cr-Mo	300	150
5-9 Cr-Mo	400	200
9 Cr-Mo-V	400	200
300-SS	50	0

c. Nhiệt luyện sau hàn (PWHT)

Khuyến cáo về nhiệt độ PWHT được đưa ra trong Bảng 6. Với trường hợp các loại vật liệu khác nhau thì nhiệt độ PWHT được chọn theo thép có hàm lượng hợp kim Cr-Mo cao hơn.

Bảng 6. Khuyến cáo lựa chọn nhiệt độ PWHT khi hàn thép hợp kim P22 với P91 [4]

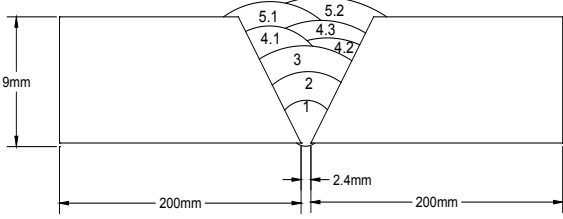
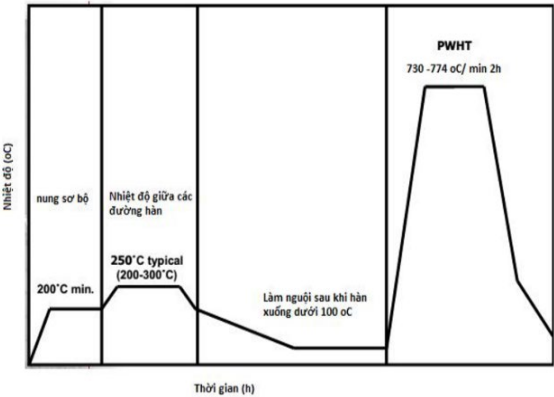
VLCB	Chiều dày		Dải nhiệt độ ¹	
	Inch	mm	°F	°C
C-Steel	≤3/4	≤19	none ¹	
	>3/4	>19	1100-1200	590-675
C-Mo and 1/2 Cr-Mo	≤5/8	≤16	none ¹	
	>5/8	>16	1150-1300	620-700
1-1-1/4 Cr-Mo	≤1/2	≤13	none ^{1,2}	
	>1/2	>13	1250-1375	675-750
2-3 Cr-Mo	≤3/8	≤10	none ^{1,2}	
	>3/8	>10	1300-1400	700-760
5-9 Cr-Mo	Tất cả		1300-1400	700-760
9 Cr-Mo-V	Tất cả		1350-1400	730-760
300-Series SS	Tất cả		none	

d. Thiết lập thông số quy trình hàn

Qua các bước phân tích và lựa chọn, ta có các thông số quá trình hàn DMW đối với hàn giáp mối P22 với P91. Tổng hợp lại thành bảng thông số quy trình hàn sau:

Bảng 7. Các thông số quá trình hàn DMW đối với P91 và P22.

Thông số	Lớp lót	Lớp phủ	Ghi chú
Quá trình hàn	GTAW/TIG	GTAW/TIG	Hàn tay
Cực tính	DCEN	DCEN	

Vật liệu hàn	AWS A5.28 – ER90S-B3	AWS A5.28 – ER90S-B3	Lincoln/Kobelco
Đường kính que hàn	2.4 (2% Thori)	2.4 (2% Thori)	
Khí xông mặt sau	Argon (99.99%)	Không yêu cầu	Yêu cầu làm sạch chân của liên kết bằng cách xông khí để tránh sự oxi hóa bên trong lòng ống
Lưu lượng khí	4-15 (l/phút)		
Khí bảo vệ	Argon (99.99%)		
Lưu lượng khí	8-15 (l/phút)	8-15 (l/phút)	
Nhiệt độ nung sơ bộ	200 °C		
Chuẩn bị liên kết	 <p style="text-align: center;">Hình 1. Mặt cắt mối hàn</p>		Thiết kế ban đầu của mối hàn bao gồm số lớp hàn là 5 với 8 đường hàn như Hình 1
Thông số chế độ	Xem bảng 8		
PWHT	 <p style="text-align: center;">Hình 2. Sơ đồ xử lý nhiệt đối với hàn giáp mối thép hợp kim P91 và P22. [7;8]</p>		Gia nhiệt cho cả 2 thép từ khoảng 200°C đến 260°C, đo bằng dụng cụ hồng ngoại. Xử lý nhiệt sau hàn PWHT được chọn theo thép hợp kim cao hơn (P91). Hình 2

Chú ý với lớp hàn lót: khuyến cáo về kỹ thuật thực hiện lớp lót có thể tham khảo thêm trong tiêu chuẩn AWS D10.11.

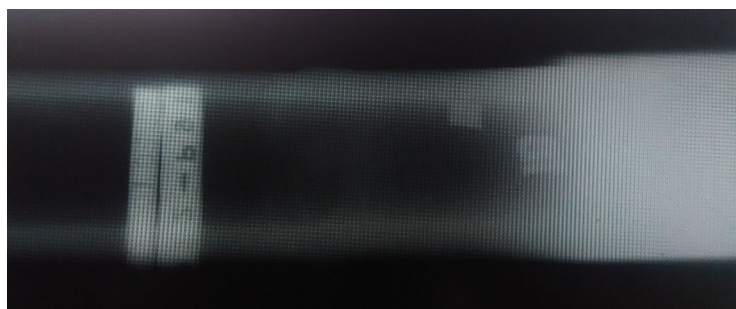
Bảng 8. Thông số chế độ hàn

TT	Đường hàn	Dòng điện (A)	Điện áp (V)	Tốc độ hàn (mm/ph)	Gia nhiệt (°C)	Năng lượng đường
1	1	80 ÷ 90	50 ÷ 60	160 ÷ 200	200	1,02 ÷ 1,72
2	2	100 ÷ 110	50 ÷ 60	160 ÷ 200	200	1,28 ÷ 2,10
3	3	105 ÷ 115	50 ÷ 60	160 ÷ 200	200	1,34 ÷ 2,20
4	4.1	105 ÷ 115	50 ÷ 60	160 ÷ 200	200	1,34 ÷ 2,20
5	4.2	105 ÷ 115	50 ÷ 60	160 ÷ 200	250	1,34 ÷ 2,20
6	4.3	105 ÷ 115	50 ÷ 60	160 ÷ 200	255	1,34 ÷ 2,20
7	5.1	105 ÷ 115	60 ÷ 70	160 ÷ 200	255	1,61 ÷ 2,57
8	5.2	105 ÷ 115	60 ÷ 70	160 ÷ 200	260	1,61 ÷ 2,57

2.3. Kết quả và thảo luận

Để đánh giá chất lượng mối hàn giáp mối thép hợp kim P22 với P91, tác giả tiến hành các thí nghiệm đánh giá chất lượng thông qua các phương pháp đánh giá: Ngoại dạng, chụp ảnh bức xạ (RT), kiểm tra cơ tính, thành phần hóa học, cấu trúc tế vi các vùng và độ cứng HV. Các kết quả sẽ được chấp nhận theo ASME Sec. IX.

Trước tiên, kiểm tra bằng mắt thường được thực hiện sau khi mẫu thí nghiệm được thực hiện hàn xong cho kết quả đạt, mối hàn đều, kín, không có vết nứt, cháy chân, rỗ khí. Tiếp theo được chụp RT với kết quả như nêu ở Hình 3. Với kết quả này ta có thể thấy mối hàn không tồn tại khuyết tật.



Hình 3. Kết quả chụp RT mối hàn hợp kim P22 với P91

Kết quả kiểm tra cơ tính: Cơ tính của mối hàn được nhóm nghiên cứu kiểm tra đánh giá 02 thông số chính đó là thử độ bền kéo và độ bền uốn với các mẫu thử có kích thước theo tiêu chuẩn ASME IX. Các kết quả được đánh giá tại Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng.

Tại mẫu kéo, độ bền đến khi xuất hiện chỗ thắt UTS, $\sigma_b = 541 - 545$ MPa, phá hủy xảy ra tại vùng kim loại cơ bản P22 do cơ tính của 2 kim loại cơ bản khác hẳn nhau về cơ tính và mối hàn thép Cr-Mo sau khi hàn luôn có độ bền kéo tốt hơn hẳn kim loại cơ bản. Kết quả kiểm tra độ bền kéo đạt yêu cầu (Bảng 9).

Bảng 9. Kết quả kiểm tra cơ tính độ bền kéo của mối hàn

Mẫu	Kích thước	Lực đứt	Độ bền kéo R_m , [MPa]	Đánh giá
T1	10,1x7,9	43500	545,1	Đạt
T2	10,1x7,9	43200	541,4	Đạt

Thử uốn gồm uốn chân và uốn mặt 180° phù hợp với tiêu chuẩn ASME IX, với mẫu uốn mặt có hiện tượng hơi nứt tại mép vùng ảnh hưởng nhiệt do chưa mài hết phần nhô. Sau khi thử uốn, độ cong lệch khỏi đường tâm ban đầu 5 – 10 mm về phía P22 (Hình 4), điều này được giải thích là do độ bền ở hai vùng khác nhau. Kết quả thử uốn đạt yêu cầu



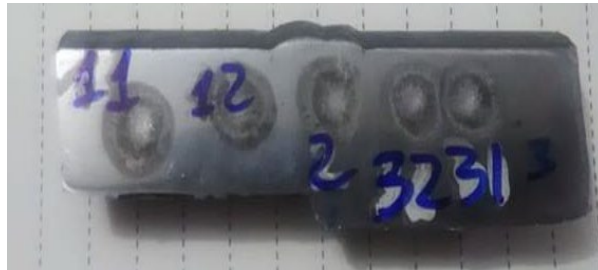
Hình 4. Mẫu thử uốn chân và mặt

Thành phần hóa học của mối hàn: Kiểm tra thành phần hóa học được thực hiện tại Viện nghiên cứu cơ khí theo phương pháp quang phổ phát xạ. Kết quả đo thể hiện ở Bảng 10.

Bảng 10. Thành phần hóa học của mỗi hàn [wt-%]

Vị trí đo	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	Ti
1-1 (P22)	0.122	0.51	0.273	2.11	0.0511	1.01	0.0594	0.005	0.005	0.0048
1-2 (P22)	0.121	0.551	0.265	2.12	0.051	1.04	0.0603	0.0049	0.0045	0.0046
2 (ER90S-B3)	0.115	0.613	0.452	2.97	0.0539	0.92	0.252	0.0261	0.0134	0.0047
3-2 (P91)	0.118	0.38	0.28	8.34	0.0866	0.926	0.0838	0.226	0.0872	0.0095
3-1 (P91)	0.121	0.379	0.276	8.31	0.0854	0.883	0.085	0.226	0.0878	0.0094

Với các vị trí kiểm tra thành phần hóa như Hình 5.

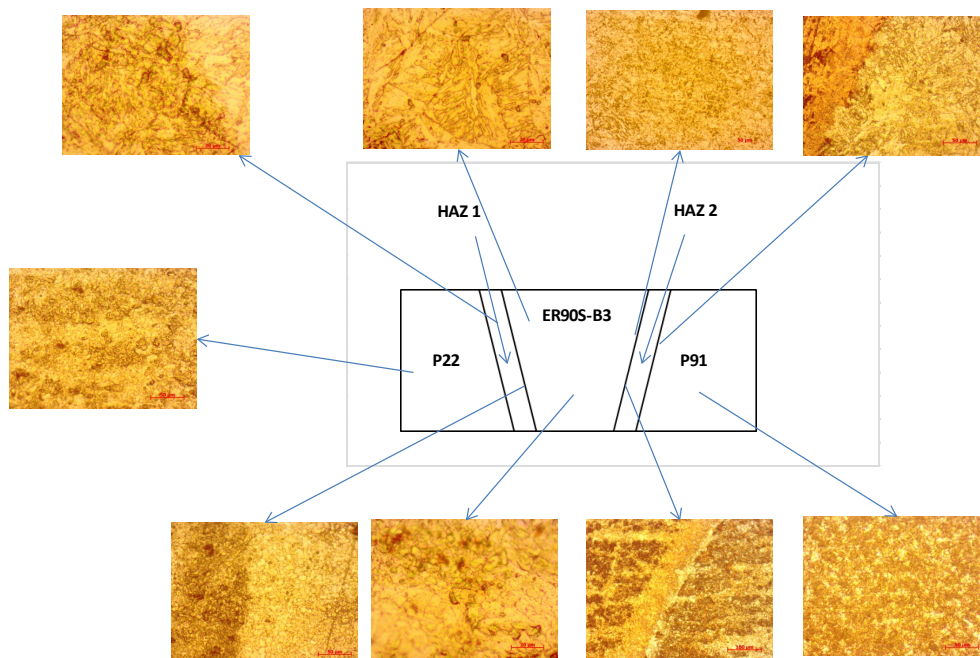


Hình 5. Mẫu kiểm tra thành phần hóa học

Qua kết quả của thành phần hóa học, ta thấy sự sai khác vật liệu ở các vùng trước và sau khi hàn hầu như không thay đổi nhiều. Một số thay đổi nhưng không đáng kể lý do là quá trình luyện kim khi hàn các thành phần của vật liệu cơ bản và vật liệu hàn hòa lẫn vào nhau.

Cấu trúc/ tổ chức tế vi:

Kiểm tra cấu trúc tế vi được thực hiện với mẫu được cắt, mài bóng và tẩm thực, sau đó chụp ảnh phóng đại (từ 50× đến 1000×) tại các vị trí và mô tả như Hình 6.



Hình 6. Ảnh kim tương các vùng (200×)

Qua phân tích ảnh có thể thấy:

- Tại nền thép P22, cấu trúc ứng với thép ferrite (sáng) và pearlite (thẫm).
- Tại nền P91, cấu trúc ứng với thép martensite.
- Tại kim loại mối hàn, cấu trúc được chia thành 2 vùng khác nhau:
 - +) Vùng trên mối hàn, cấu trúc là bainite với kích thước hạt lớn.

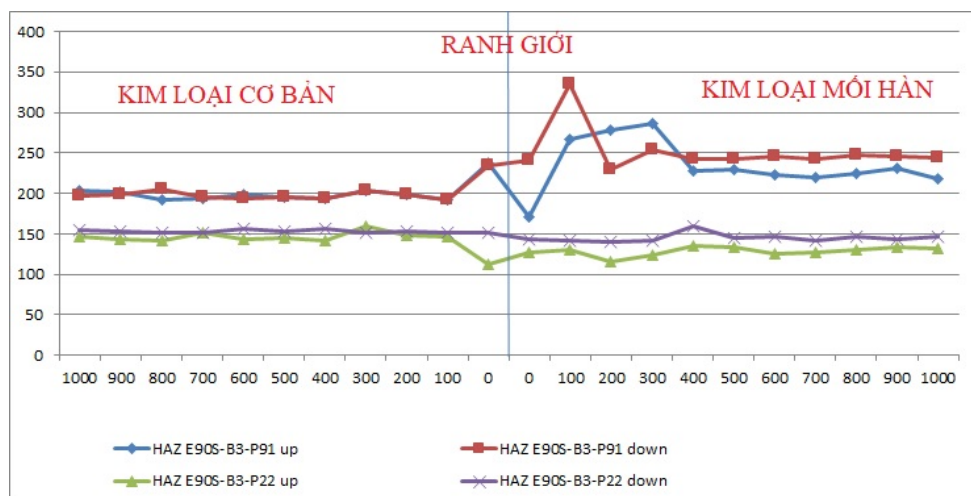
- +) Vùng dưới mối hàn, cấu trúc nghi vấn là ferrite với các hạt đa cạnh và xen lẫn với bainite kích thước nhỏ. Cần có thêm thí nghiệm để đánh giá chính xác.
- Cấu trúc vùng HAZ giữa P22 và ER90S-B3 có phân biệt rõ vùng HAZ nằm giữa 2 loại. Cấu trúc P22 và vùng biên giới không khác nhau nhiều. Tuy nhiên cấu trúc của ER90S-B3 thì có thay đổi dần vào trong.
- Vấn đề này cũng tương tự tại vùng HAZ của P91 và ER90S-B3.

Đo độ cứng tế vi HV 0.1

Kiểm tra độ cứng tế vi được thực hiện trên máy Duramin:

- Tải trọng HV0.1;
- Thời gian tác dụng lực 10 s;
- Đo từ biên giới giữa hai thép, sau đó đo dọc vào sâu trong từng thép, mỗi vết đâm cách nhau 100 μm .

Đã tiến hành đo độ cứng HV tại 4 vùng, trong mỗi vùng lại chia thành miền trên và dưới, ở các vị trí khác nhau. Khoảng cách h tính từ biên vào vùng cần đo.



Hình 7. Biểu đồ độ cứng tế vi của mối hàn P22/P91

Các giá trị độ cứng của các vùng khác nhau được hiển thị ở Hình 7. Các giá trị độ cứng trong HAZ của P91 cao hơn so với trong HAZ của P22. Nguyên nhân có thể do sau khi nhiệt luyện sau hàn, vùng cứng và vùng mềm được hình thành xung quanh vùng giáp ranh giữa kim loại mối hàn và kim loại cơ bản P91.

Như vậy, các kết quả kiểm tra đều cho thấy mối hàn hai vật liệu khác nhau P22 và P91 đều đạt yêu cầu. Do đó, Quy trình hàn hai thép bền nhiệt khác nhau (P91 và P22) ứng dụng cho đường ống áp lực của các nhà máy nhiệt điện theo tiêu chuẩn ASME Sec. IX là phù hợp, đủ điều kiện để ứng dụng rộng rãi cho việc sửa chữa, xây lắp mới các đường ống áp lực của nhà máy nhiệt điện.

III. KẾT LUẬN

Trong việc liên kết các đường ống áp lực tại nhà máy nhiệt điện, các mối hàn rất quan trọng trong việc đảm bảo chất lượng công trình. Ngoài ra, với các nhà máy nhiệt điện cũ có chi tiết đường ống có điều kiện làm việc khác nhau thì việc hàn thép P22 và P91 với nhau là khá phổ biến. Vì vậy, việc thiết lập quy trình hàn thép bền nhiệt khác nhau là rất thiết thực.

Báo cáo này là những bước đầu thiết lập được quy trình hàn DMW các ống hơi trong các nhà máy nhiệt điện. Các mối hàn được chế tạo bởi quy trình hàn có chất lượng tốt, đạt yêu cầu về ngoại dạng, không có khuyết tật khi chụp RT. Kết quả độ bền kéo thay đổi từ 541,4 MPa đến 545,1 MPa. Kết quả về độ bền uốn đạt yêu cầu. Các giá trị độ cứng đo được trên

mối hàn và HAZ của mối hàn được ghi nhận với độ cứng cao nhất ở trong HAZ của kim loại cơ bản P91.

Các kích thước ống sau sẽ được chấp nhận theo ASME Sec. IX: dày từ 5 mm đến 18 mm, đường kính không giới hạn.

Nhóm tác giả đã cố gắng thực hiện nghiên cứu quá trình hàn DMW giữa hai loại thép phổ biến nhất trong nhà máy nhiệt điện. Vì nhiều lí do, việc nghiên cứu còn bỏ qua một số vấn đề như xác định tỉ lệ hòa lẫn, ứng suất dư, nhiệt hàn, kiểm tra mối hàn bằng phương pháp siêu âm kĩ thuật sóng dọc, độ dai va đập... Hi vọng sẽ có những công trình tiếp theo nghiên cứu về các chủ đề này.

Tác giả xin gửi lời chân thành cảm ơn đến TS. Nguyễn Đức Thắng và ThS. Trịnh Văn Thế - Trung tâm đánh giá không phá hủy trực thuộc Viện Năng lượng nguyên tử Việt Nam - đã giúp đỡ rất nhiều cho tác giả thực hiện hoàn thành báo cáo này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] *Grade 22 Low Alloy Steel Handbook: 2-1/4Cr-1Mo, 10CrMo9 10*, 622, STPA24. EPRI: Palo Alto, CA, 1012840, 2005.
- [2] Baker, R.G. and M.A. Nutting, “Tempering of 2 1/4%Cr-1%Mo Steel”, *Iron and Steel*, 32, 606 – 612, 1959.
- [3] EPRI, D.G. and K. Coleman, *Performance Review of P/T91 Steels. EPRI, Palo Alto, Ca: 2002. 1004516*. 2002, Electric Power Research Institute EPRI: Palo Alto, California.
- [4] welding consumable for P91 steels for the power generation industry, Metrode Co.,
- [5] Peddle, B.E. and C.A. Pickles, Carbide Development in the Heat Affected Zone of Tempered and Post-Weld Heat Treated 2.25Cr-1Mo Steel Weldments. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 40(1), 105-126, 2001.
- [6] Peddle, B.E. and C.A. Pickles, *Carbide and Hardness Development in the Heat-Affected Zone of Tempered and Postweld Heat-Treated 2.25Cr-1Mo Steel Weldments*. Journal of Materials Engineering and Performance, 2000. 9(5): p. 477-488.
- [7] ASME B31.1 (Power Piping), Bảng 132.
- [8] ASME Section IX (Welding and Brazing Qualifications), Div 1(UCS-56), Div 2(68)