

압력용기강재 SA508 class 3 용착금속의 조사거동

고진현^{*†} · 박형근^{*} · 김수성^{**} · 황용화^{**} · 서윤석^{***}

^{*}한국기술대학교 신소재공학과

^{**}한국원자력연구원

^{***}오스텍

Irradiation Behavior of Reactor Pressure Vessel SA508 class 3 Steel Weld Metals

Jinhyun Koh^{*†}, Hyoungkeun Park^{*}, Soosung Kim^{**}, Yonghwa Hwang^{**} and Yunseok Seo^{***}

^{*}Dept. of Materials Eng., Korea University of Technology & Education, Cheonan 330-708, Korea

^{**}Korea Atomic Energy Research Institute, Yuseong-gu, Daejeon 305-353, Korea

^{***}Seat Quality Control & Assurance, AUSTEM, Yeongi 339-853, Korea

[†]Corresponding author : jhkoh@kut.ac.kr

(Received February 5, 2010 ; April 2, 2010 ; June 14, 2010)

Abstract

Irradiation behavior of the reactor pressure vessel SA508 class 3 steel weld metals was examined by Charpy V Notch impact specimens. The specimens were exposed to a fluence of 2.8×10^{19} neutrons(n)/cm²(E>1 MeV) at 288°C. The irradiation damage of weld metal was evaluated by comparison between unirradiated and irradiated specimens in terms of absorbed energy and lateral expansion. The specimens for neutron irradiation were welded by submerged arc welding process at a heat input of 3.2 kJ/mm which showed good toughness in terms of weld microstructure, absorbed energy and lateral expansion.

The post-irradiation Charpy V notch 41J and 68J transition temperature elevation were 65°C and 70°C, respectively. This elevation was accompanied by a 20% reduction in Charpy V notch upper shelf energy level. The lateral expansion at 0.9mm irradiated Charpy specimens showed temperature elevation of 65°C and was greatly decreased due to radiation damage.

Key Words : Radiation damage, SA508 class 3, Submerged arc welding, Impact test, Absorbed energy, lateral expansion, Transition temperature elevation

1. 서 론

원자력 발전소 압력용기용 강재로 사용되고 있는 ASME SA508 class(cl.) 3 강은 C, Mn, Ni, Mo를 주요 합금원소로 함유하고, 단조로 제조된 후판 저합금 페라이트계 강이다. 원자력 압력용기(Reactor Pressure Vessel, RPV)는 이 강을 용접하여 제조되고, 사용 수명 기간 동안 용기로서 건전성을 유지할 수 있도록 우수한 기계적 성질이 요구되고 있다. 특히 용접부를 포함한 압력용기는 그 수명동안 고속 중성자 조사(fast

neutron irradiation) 때문에 재료의 열화를 피할 수 없다.

원자력 압력용기에서 용접부는 가장 취약한 곳으로 용접부의 성능이 압력용기의 신뢰성에 가장 큰 영향을 미친다. 이것은 용접부가 역학적 및 금속재료학적 불연속부를 포함하기 때문이다. 원자력 압력용기는 조사 분위기에서 조사손상을 통해 용접부에 부정적인 영향을 추가 할 수 있다. 또한 압력용기는 가혹한 중성자 분위기에서 원자로 수명이 끝날 때까지 장기간 동안 사용되므로 조사취화가 큰 문제이다.

현재 압력용기 강재로 사용되고 있는 페라이트계 저

합금강들은 낮은 취성과 높은 연성을 나타내는 체심입방정 금속의 특징인 연성-취성 전이온도를 가진다. 용접부의 조사취화현상은 샤르피 충격시험으로 연성-취성 전이온도 상승(ΔT)과 최대 흡수 에너지 감소로 평가되고 있다. 지금까지의 연구 결과에 의하면 모재보다 용접부에서 조사취화현상에 대해 더 큰 변화를 보이고 있다^{1,2)}. 중성자 조사취화에 대한 연구는 강재의 합금 조성, 미세조직, 열처리, 단조, 부재형상, 용접부 및 열영향부 등 제조방법, 온도와 중성자 분위기 등으로 수행되고 있다.

본 연구에서는 압력용기강재 SA508 cl.3의 용접부를 288°C의 중성자 조건에서 조사하고 비조사된 용접 시편과 비교하여 조사손상정도를 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 모재 및 용접재료

본 실험에 사용된 모재는 두께 40mm의 SA508 cl.3 강을 절반으로 절단하여 두께를 18mm, 가로 90mm, 세로 400mm의 치수로 가공하였다. 그리고 강판 중앙에 깊이 8mm, 하단을 6mmR로 하는 U형 그루브를 가공하였다. 용접재료는 Table 1과 같이 압력용기 제작 규격에 따라 서브머지드 용접 와이어는 AWS US40N, 플럭스는 염기성 저온 소결형인 AWS PFH55SN을 선정하였다. Table 2는 모재의 화학조성

이고, Table 3는 용접 와이어의 화학 조성이다. 플럭스는 사용하기 전 건조로에서 250°C에서 4시간 동안 가열하여 건조하였다.

2.2 용 접

용접은 모재 강판 중앙에 가공된 그루브를 따라 한 패스로 실시하였다. 입열량은 Table 1의 압력용기용 강재 SA508 cl. 3의 용접 사양서에 의해 허용되는 용접조건을 토대로 시편치수와 그루브를 고려하여 서브머지드 아크 용접이 가능한 범위에서 Table 4와 같이 용접전압을 일정하게 유지하고 용접전류와 속도를 변화시켜 1.6, 3.2, 5.0 kJ/mm의 조건을 선정하였다. 용접하기 전 모재는 최저 120°C로 예열하였고, 용접 후 600°C에서 40시간 동안 열처리를 실시하였다.

2.3 미세조직검사 및 화학분석

미세조직 시편은 용접 길이 방향의 중앙을 기준으로 좌우 15mm길이를 용접부를 횡방향으로 절단하여 채취하였다. 이 시편을 미세하게 연마하고 2% Nital 용액으로 부식한 후 광학현미경으로 용접부의 미세조직을 관찰하였다.

용접금속의 화학조성은 고주파 유도결합 플라즈마 분광분석기와 발광분석기를 사용하여 분석하였다.

Table 1 Welding specification of RPV SA508 class e steel

Welding Process	Filler Metal		Current		Voltage (V)	Travel speed (cm/min)	Interpass temp. max(°C)	PWHT (°C)/hrs
	AWS Class	Dia	Type	Amp				
SAW	US40N PFH-55SN	φ4.0mm	DCRP	500~600	28-32	30-40	200	600±15, 40hrs

Table 2 Chemical composition of SA508 class 3 steel(wt.%)

Elements	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al
Wt. %	0.19	0.26	1.35	0.006	0.003	0.02	0.86	0.15	0.49	0.005	0.022
Spec.	Max	0.15	1.20	Max	Max	-	0.40	Max	0.45		
		0.25	~ 0.40	~ 1.50	0.025	0.025	-	~ 1.00	~ 0.25	~ 0.60	

Table 3 Chemical composition of welding wire(wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.13	0.02	1.80	0.006	0.003	0.02	0.04	0.02	0.53

Table 4 Welding parameters of SA508 cl.3 steel

Heat input (kJ/mm)	Welding Current (A)	Voltage (V)	Travel speed (cm/min)	PWHT	Preheat T(°C)
1.6	580	30	65	600°C 40hrs	120
3.2	600	30	34		
5.0	660	30	24		

2.4 충격시험

충격시험 시편은 용접부의 중앙선을 기준으로 Fig. 1 과 같이 용접 길이 방향으로 절단하고, 모재 표면 아래로 용접비드를 절삭한 후 ASTM standard E 23-83 에 따라 채취하였다. 이 때 시편의 치수는 5x5x55mm 이고 깊이 1mm, R 0.25mm, 45°의 노치를 갖는 서브사이즈 샤르피 V 노치 충격시편이었다. 노치는 용접 중심선을 따라 위치하도록 가공하였다.

충격시험은 완전한 연성-취성 전이곡선을 구할 수 있게 -190°C~20°C 범위에서 수행되었다. 충격에너지는 한 온도에서 두개의 시편을 시험하고 흡수에너지 값이 거의 일치하는 경우에는 이들 값의 평균값을 취하였고, 산란이 큰 경우에는 세개의 시편을 시험하여 근접한 두 시편의 값을 평균하였다. 단, 원자로 내에서 중성자 조사용 충격시편은 Table 1의 용접시공명세서에 의해 허용되는 범위의 용접조건으로 다층패스 용접하였고 표준 형태로 가공하여 사용하였다.

충격시험으로 파괴된 시편의 연성 파면율은 KSB

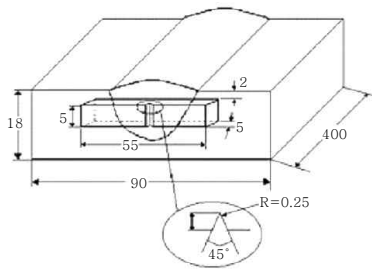


Fig. 1 Schematic diagram of subsize Charpy V notch impact test specimen in the weld joint geometry(unit: mm)

0810에 따라 조사하였고 횡팽창율은 KSA 0021에 따라 구하였다.

2.5 중성자 조사시험

중성자 조사시험을 위한 표준 CVN 충격시편은 선정된 최적 인성 용접을 갖는 조건에서 제작된 다층 용접부를 가공하여 준비하였다. 이들을 한국원자력연구원 하나로 원자로에 장입하고 압력용기 사용 조건과 수명 동안 받게 되는 중성자 조사량을 고려하여 288°C, $2.8 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$) 조건에 근접하도록 중성자를 조사 하였다. 중성자 조사된 시편은 수중에 저장하여 중성자 피복량이 감소된 후 원격장치에 의해 충격시험을 실시하였고, 횡팽창율을 측정하고 파단된 시편의 사진도 촬영하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 용접부 화학조성 및 미세조직

Table 5는 용접금속의 화학조성이다. 3가지 조건에서 용접된 용접부는 C, Mn, Mo 및 Ni가 주요원소이고 Cr의 함유량이 꽤 높고, Al 및 V과 기타 원소 등으로 구성되었고 입열조건에 따라 큰 변화가 없었다.

Fig. 2는 광학현미경으로 관찰된 용접부의 미세조직이다. Fig. 2(a),(b)와 (c)에서 용접부의 미세조직 중 입열량 3.2 kJ/mm인 Fig. 2(b)에서 다른 두 미세조직에 비해 침상형 페라이트가 좀 더 다량 생성되었음을 알 수 있었다. 우수한 인성을 갖는 것으로 잘 알려진 페라이트가 서로 얽혀있는 침상형 페라이트^{3,4)}가 주된

Table 5 Chemical composition of weld metal

Heat input (kJ/mm)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	V
1.6	0.16	0.24	1.44	0.008	0.009	0.57	0.14	0.51	0.026	0.01
3.2	0.14	0.27	1.47	0.009	0.009	0.54	0.13	0.51	0.025	0.01
5.0	0.13	0.28	1.47	0.01	0.01	0.49	0.11	0.50	0.025	0.01

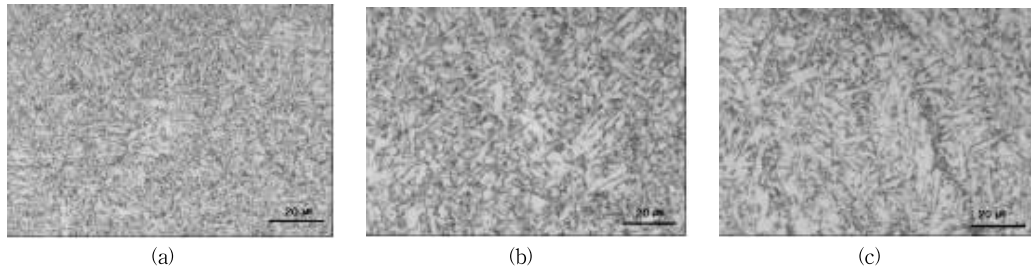


Fig. 2 Microstructure of weld metal with different heat inputs

미세조직이고 소량의 다각형 페라이트로 구성되어 있다.

3.2 충격시험

Fig. 3은 강관에 가공된 그루브를 따라 용접된 용접 부로부터 채취한 CVN 충격시편을 상온에서 -190°C 까지 시험한 충격흡수에너지이다. Fig. 4는 충격시험에서 파괴된 시편의 횡팽창율과 시험온도와의 관계이고, Fig. 5는 연성과면율과 온도와의 관계이다. 이들 3가지 결과를 살펴보면 입열량 3.2 kJ/mm에서 흡수 에너지가 가장 높고 입열량 5.0 kJ/mm에서 가장 낮은 흡수에

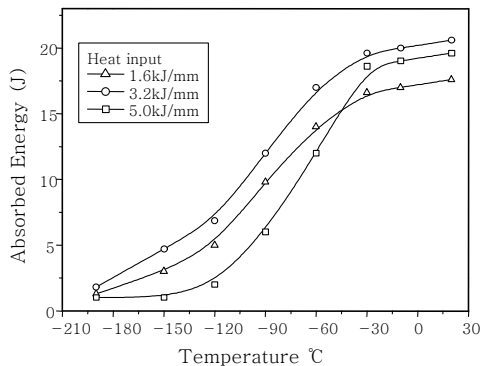


Fig. 3 Absorbed energy vs. temperatures of weld subsized CVN specimens with different heat inputs

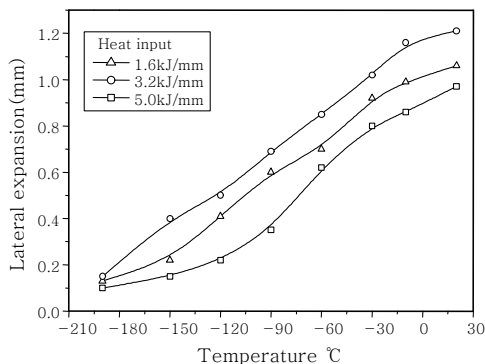


Fig. 4 Lateral expansion vs. temperature with different heat inputs

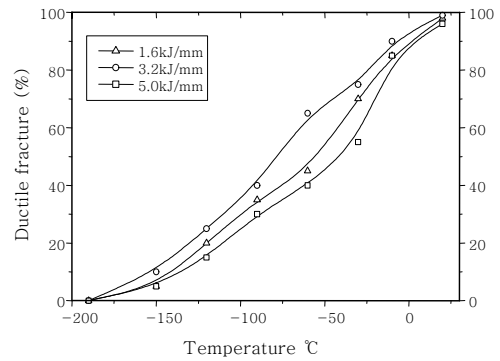


Fig. 5 Proportion of ductile fracture of subsized CVN specimens

너지를, 그리고 입열량 1.6kJ에서 흡수에너지는 중간 정도의 흡수 에너지를 보여주고 있다. Fig. 6은 입열량에 따른 흡수 에너지와 횡팽창률과의 관계로 이들 두 곡선이 만나는 연성-취성 천이온도는 각각 -90°C , -100°C 와 -75°C 로 입열량 3.2 kJ/mm에서 가장 낮다.

이상의 3가지 입열량으로 용접된 압력용기강 용접된 압력용기강 S.A508 class 3 강재 용접부의 인성을 미세조직과 충격 흡수에너지 관점에서 고려하여 볼 때 입열량 3.2 kJ/mm이 가장 좋았다. 즉, 다른 입열량에 비해 다량의 침상형상 낮았기 때문이다. 따라서 원자로 내에서 중성자 조사취화시험을 위해서 충격시편은 입열량 3.2 kJ/mm 조건이 선정되었다.

3.3 중성자 조사

입열량 3.2 kJ/mm 조건으로 용접된 압력용기강 SA508 class 3 강재로부터 가공된 표준형 충격시편을 원자로에서 $2.8 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2 (>1\text{MeV})$ 으로 중성자를 조사하였다. 그 후 취화정도를 ASME code(section III)⁵⁾에 따라 41J과 68J에서의 충격흡수 에너지와 0.9mm 횡팽창율을 중성자를 비조사한 시편과 비교하였다.

Fig. 7은 중성자 조사용접시편과 비조사 용접시편의 충격시험 결과를 보여주고 있다. 연성-취성 천이온도는

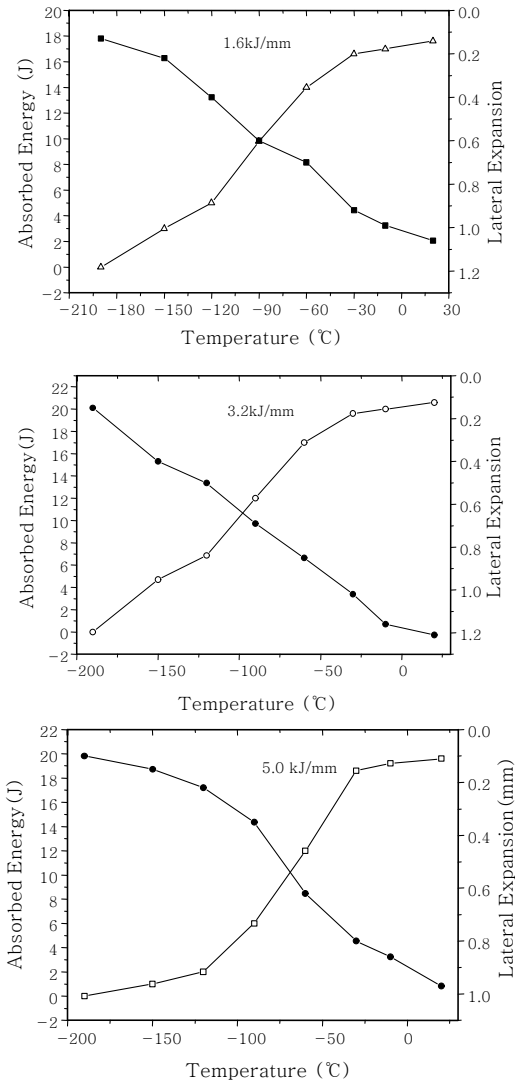


Fig. 6 Absorbed energy and lateral expansion of weld subsized CVN specimens as a function of heat inputs (a) 1.6, (2) 3.2 and (c) 5.0 kJ/mm

약 60°C 정도 상승되었고 충격 흡수에너지는 크게 감소하였다. 그리고 41J와 68J에서 천이온도 상승은 각각 약 65°C와 70°C이었다. 이러한 천이온도 상승의 영향으로 CVN 상부 셸프 에너지값이 약 20% 감소를 동반하였다. Fig. 8은 조사시편과 비조사 시편의 횡팽창율을 보여주고 있는데 0.9mm 횡팽창율에서는 약 65°C의 온도상승을 보였는데 이것은 천이온도가 중성자 조사로 크게 감소함을 보여주고 있다. 이와 같이 금속이 중성자 조사에 의해 취화되는 현상은 조사결합의 생성으로 이들이 전위이동에 장애물로 작용하고, 결정립계에 조사유기 석출물과 편석 등이 생성되어 파괴 장소로 기여되기 때문인 것으로 알려져 있다⁶⁾.

Fig. 9는 Fig. 7에 나타난 조사 후 충격시험 온도에

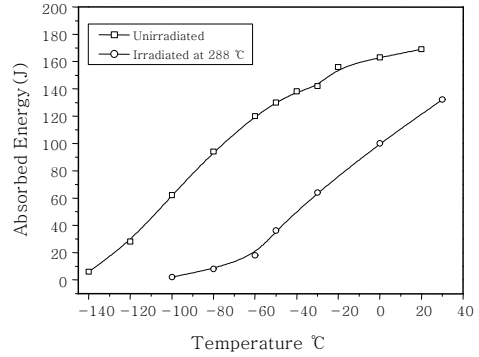


Fig. 7 Comparison of absorbed energy between unirradiated and irradiated weld standard CVN specimens

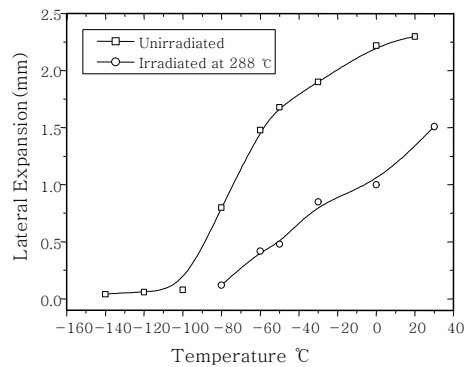


Fig. 8 Comparison of lateral expansion between unirradiated and irradiated weld standard CVN specimens

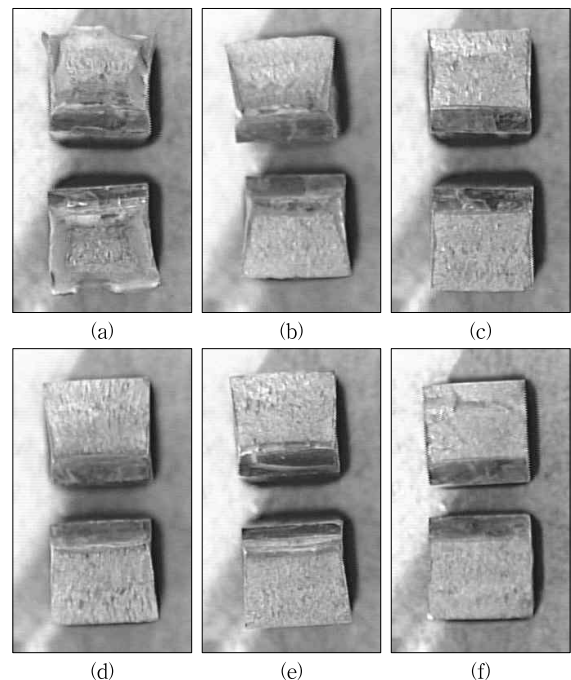


Fig. 9 Macrographs showing irradiated standard CVN impact specimens tested at different temperatures(x2). (a) 0, (b) -20, (c) -30, (d) -50, (e) -60 and(f) -80°C

따른 저배율 파단면을 보여주고 있다. 본 연구에서는 주사전자현미경을 이용한 파단면을 조사하지는 못하였지만 기타연구결과에 의하면 중성자 조사에 의해 파단면에는 기공합체(microvoid coalescence)에 의해 연성딴플⁷⁾이 많이 생성되는 것으로 알려져 있다.

중성자 조사에 의한 취화현상의 기구⁸⁾들이 다수 알려져 있지만 본 재료의 조사취화를 이해하기 위해서는 박막시편을 준비하여 조사 후 전자현미경으로 조사할 필요가 있다고 생각된다.

4. 결 론

본 연구는 압력용기 강재 용접부의 중성자 조사취화 현상을 조사하기 위하여 수행되었다. 먼저 최적의 용접부 인성을 가질 수 있는 미세조직의 용접 입열조건을 확립하고 이 조건으로 용접된 표준충격시편을 제작하였다. 이 시편을 원자로에서 288°C, 중성자 조사량 $2.8 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2 (E > 1 \text{ MeV})$ 으로 조사 한 후 원격 충격시험을 수행하였고 주요한 결과는 다음과 같다.

1) 본 실험에 사용한 입열량 1.6, 3.2, 5.0kJ/mm로 용접된 용접부의 미세조직 중 3.2kJ/mm에서 침상형 페라이트 생성 비율이 가장 높았다.

2) 서브 사이즈 CVN 충격시험에 의한 연성-취성 천이온도는 입열량 3.2kJ/mm으로 용접된 용접부가 -100°C로 가장 낮았다.

3) 용접부 미세조직과 충격시험에 의한 연성-취성 천이온도를 토대로 입열량 3.2 kJ/mm의 용접조건이 선정되어 중성자 조사 시편 제작 조건으로 선택되었다.

4) 중성자 조사된 용접시편의 연성 취성 천이온도는 상승하였으며, 흡수 에너지 41J과 68J에서 천이온도는 각각 약 65°C와 70°C로 상승하였고, 0.9mm 횡팽창율이 약 65°C로 크게 감소하여 조사취화현상을 나타내었다.

후 기

이 논문은 한국기술교육대학교 교육연구진흥비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 이기순, 핵연료/재료조사공학, 문경출판사, 1997, 145 (in Korean)
2. L.E.Steele, IAEA technical reports series No. 163, Neutron Irradiation Embrittlement of Reactor Pressure Vessel Steels, 1995, 96-101
3. J.A.Gianettu, N.J.Smith, J.T.McGrath, and J.T. Bowker, Effect of Composition and Energy Input on Structure and Properties of High-Strength Weld Metals, *Welding Journal*, 61-11 (1992), 407s-419s
4. G.M.Evans, Microstructure and Properties of Ferritic Steel Welds containing Ti and B, *Welding Journal*, 65-8 (1996), 251s-260s
5. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Subsection NB (Class Components), NB-2331, ASME, New York, 1974
6. D.N.Seidman, Field-Ion Microscope studies of the Defect Structure of the Primary State of Damage of Irradiated Metals, in *Radiation Damage in Metals*, edited by N.L.Peterson and S.D.Harkness, Materials Science Symposium, ASM, 1976, 28-57
7. E.E.Bloom, Irradiation Strengthening and Embrittlement, in *Radiation Damage in Metals*, edited by N.L.Peterson and S.D.Harkness, Materials Science Symposium, ASM, 1976, 313-315
8. N.Igata, A.Kohyama and K.Itadani, Radiation Effects on Molybdenum Alloys Bombarded by Electrons in a High Voltage Electron Microscope, *Effects of Radiation on Structural Materials*, ASTM STP 683 (1979), 12-31