

FCAW에서 용접금속 확산성수소량에 미치는 용접변수 영향의 정량적 해석

한동우* · 방국수*[†] · 정홍철** · 이종봉***

*부경대학교

**POSCO 기술연구소

***포항공대 철강대학원

Quantitative Analysis on the Effects of Welding Parameters on Diffusible Hydrogen Contents in Weld Metal Produced by FCAW Process

Dong-Woo Han*, Kook-Soo Bang*[†], Hong-Chul Jeong** and Jong-Bong Lee***

*Division of Materials Science & Engineering, PKNU, Pusan 608-739, Korea

**Technical Research Lab., POSCO, Pohang 790-300, Korea

***Graduate Institute of Ferrous Technology, POSTECH, Pohang 790-784, Korea

[†]Corresponding author : ksbang@pknu.ac.kr

(Received November 23, 2009 ; Revised December 15, 2009 ; Accepted January 28, 2010)

Abstract

The effects of welding parameters such as contact tip-to-work distance (CTWD), voltage, and current on the weld metal diffusible hydrogen contents (HD) were investigated and rationalized by the calculation of heating time and amount of heat generated in the extension length of flux cored wire. As CTWD increased from 15 to 25mm, HD decreased from 8.46 to 5.45mL/100g deposited metal. Calculations showed that, with an increase of CTWD, the amount of heat generated increased from 46 to 92J in addition to an increase of heating time. Increase of current from 250 to 320A, however, gave little variation of HD. It showed that no significant change in the amount of heat generated was found, and heating time was decreased with an increase of current. It also showed that CTWD is more influential than voltage in relatively lower heat input ranges, while voltage is more in higher input ranges

Key Words : Diffusible hydrogen content, Welding parameters, CTWD, Current, FCAW

1. 서 론

철강 용접부에 있어서 확산성 수소는 수소유기균열 (hydrogen induced cracking)을 일으키는 중요한 요인 중 하나다. 특히 플럭스 코어드 와이어 (flux cored wire, 이하 FCW)의 경우 우수한 작업성과 높은 생산성으로 용접산업 전반에서 널리 사용되고 있지만 흡습 등에 의한 높은 수소포텐셜로 용접부의 HIC가 문제로 되고 있다. 따라서 HIC에 민감한 FCAW 용접부에 대해서는 전통적인 대책인 예열, 후열처리와 함께 와이어

자체의 수소량을 최소화하는 기술 개발도 활발히 이루어지고 있다¹⁾.

FCW를 사용하여 용접하는 경우 용착금속 확산성수소량은 용접변수에도 크게 영향을 받는다²⁻⁵⁾. 예를 들어 전압의 증가는 아크길이를 증대시켜 아크 중 수소의 혼입을 증대시키나, 콘택터팁과 모재사이의 거리 (CTWD)나 전류의 증가는 와이어 저항발열을 증대시켜 와이어 중의 수소를 감소시킨다고 알려져 있다. 이와 같이 용착금속 확산성수소량에 미치는 용접변수의 영향은 정성적으로는 잘 알려져 있으나 정량적인 해석을 시도한 연구는 많지 않다. 본 연구에서는 FCW를 사용한 용접

시 CTWD, 전류, 그리고 전압의 변화가 와이어의 저항 발열량, 가열시간 등에 미치는 영향을 정량적으로 계산하고, 그에 따른 용착금속의 확산성수소량의 변화를 조사하였다.

2. 실험방법

사용한 와이어는 AWS E81T1과 E110T1K3에 해당하는 직경 1.4mm의 FCW이다. 먼저 용접변수의 개별적인 영향을 조사하기 위하여 E81T1 와이어를 사용하여 Table 1의 조건으로 용접하였다. 다른 용접변수는 일정하게 유지하며 CTWD, 전류, 그리고 전압을 각각 15~25mm, 250~320A, 28~33V로 변경하였다. 이때 입열량을 14kJ/cm로 일정하게 유지하기 위하여 용접속도를 31~40cm/min로 변경하였다. 한편 용접변수를 동시에 변경시키는 경우에도 용착금속 확산성수

소량의 변화를 조사하였다. 이 경우에는 E81T1과 E110T1K3 와이어를 사용하여 Table 2와 같은 조건으로 입열량 8kJ/cm와 20kJ/cm로 용접하였다.

용접 후 용착금속 확산성수소량은 AWS A4.3-86의 수은치환법에 따라 측정하였다⁶⁾. 인장강도 600MPa의 압연강을 25×12×80mm의 수소포집용 시편으로 가공한 후 400℃에서 2시간 동안 탈가스처리한 다음 두 개의 탭 사이에 위치시켜 20L/min 유량으로 100% CO₂용접하였다. 용접완료 후 -70℃ 이하로 유지된 드라이아이스 알콜용액에 시편을 급냉하는데 걸리는 시간은 5초를 넘지 않도록 하였다. 이후 시편을 수은이 채워진 유디오미터 내에 장입하여 45℃에서 72시간 발생하는 수소를 포집하였다. 포집된 수소는 표준압력과 온도에서의 수소부피로 변환한 후 용착금속 100g당 수소량으로 나타내었다. 기본적으로 네 시편의 평균값을 측정값으로 하였다.

Table 1 Welding conditions used

Wire	Heat input (kJ/cm)	Variable	Current(A)	Voltage(V)	Speed(cm/min)	CTWD(mm)		
81T1	14	CTWD	250	30	35	15		
						20		
						25		
		Current	250	30	30	35	20	
			280					
			320					
		Voltage	280	28	30	33	20	
								30
								35
								39

Table 2 Welding conditions used

Wire	Heat input (kJ/cm)	Current(A)	Voltage(V)	Speed(cm/min)	CTWD(mm)	[H]D (mL/100g)
81T1	8	169	28	35	25	3.10
		195	22	30	28	2.80
		187	24	34	20	4.41
		182	28	38	12	12.10
		182	28	40	20	5.14
	20	299	32	30	12	9.64
		295	28	25	25	3.06
		322	29	28	28	4.98
		307	32	30	20	6.06
		295	35	32	12	12.45
110T1K1	8	298	28	25	28	3.80
		194	21	30	28	3.10
		171	28	35	25	2.80
		194	24	34	20	4.41
		186	28	38	12	12.10
		183	29	38	18	5.14
		176	26	35	12	9.64
	20	301	33	30	12	3.06
		294	28	25	25	4.98
		323	29	28	28	6.06
		312	32	30	20	12.45
		298	35	32	12	3.80

3. 실험결과 및 고찰

CTWD, 전류, 그리고 전압의 개별적인 변화에 따른 용착금속 확산성수소량의 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 먼저 CTWD가 15에서 25mm로 증가함에 따라 용착금속 확산성수소량은 8.46에서 5.45mL/100g으로 감소하였다. 일반적으로 CTWD가 증가하면 와이어의 저항발열이 증가하여 와이어 중 윤활제나 수분 등이 더 많이 증발한 결과, 용착금속 확산성수소량이 감소한다고 알려져 있다. CTWD의 변화가 이러한 저항발열에 미치는 영향을 알아보기 위하여 저항발열량, Q를 다음의 식을 사용하여 직접 계산하였다⁷⁾.

$$Q = I^2 \rho L t / A$$

여기서 I는 전류, ρ 는 용접과정 중 와이어 저항, L은 와이어 돌출길이, t는 가열시간, A는 전류가 흐르는 와이어 단면적이다. 먼저 용접과정 중 온도 T로 가열되는 와이어의 저항은 상온에서의 저항, ρ_{20} 을 측정하여 다음 식을 사용하여 계산하였다.

$$\rho_T = \rho_{20} (1 + \alpha \Delta T)$$

여기서 α 는 온도보정계수, ΔT 는 상온과 와이어 온도와의 차이이다. 용접과정 중 와이어 온도는 상온에서 용접까지 불균일한 분포를 나타내나, 계산에서는 상온과 용접의 중간온도인 약 800°C를 와이어 온도로 가정하였다. 온도보정계수는 순철의 값인 0.00651/°C를 사용하였다. 와이어 돌출길이는 고속카메라를 이용하여 직접 관찰하였다. Fig. 2에 노즐 끝에서부터 와이어가 돌출되어 있는 길이를 나타내었다. 컨택팁은 노즐 끝에서부터 안쪽으로 2mm 떨어져 있어 사진상의 돌출길이에 2mm를 더한 길이가 와이어 돌출길이이다. CTWD의 증가에 따라 13.4에서 22.3mm로 증가하였다. 한편 가열시간은 돌출길이를 와이어 송급속도로 나눈 값으로, 와이어 송급속도는 용접과정 중 송급속도 측정장치를 사용하여 직접 측정하였다. CTWD가 15에서 25mm로 증가함에 따라 송급속도는 702에서 943cpm으로 증가하였고, 그 결과 가열시간은 0.11에서 0.14s로 증가하였다. 이상의 값들을 위의 식에 대입하여 Q를 계산하면 CTWD가 15, 20, 25mm로 증가함에 따라 Q는 46, 64, 92J로 증가한다. 즉 CTWD가 15에서 25mm로 증가하면 저항발열은 두 배로 증가함을 알 수 있다 (Fig. 3). 이상의 결과로부터 CTWD의 증가에 따른 용착금속 확산성수소량의 저감은 가열시간과 발열량 모두의 증가에 기인함을 알 수 있다.

전류의 증가에 따른 용착금속 확산성수소량은 Fig. 1 (b)에서 보는 것처럼 큰 변화가 없다. 하지만 Table 1에서 보는 것처럼 전류를 변경할 때 동일한 입열량을 유지하기 위하여 용접속도도 변경하였는데, 이러한 용접속도의 변경이 확산성수소량에 영향을 미칠 수도 있다. 즉 용접속도가 느린 경우 아크종료 시까지의 시간이 길어져 수소포집시편으로부터 더 많은 수소가 방출될 수 있다. 예를 들어 본 실험에서 가장 빠른 용접속도인 40cpm의 경우 아크종료 시까지 수소포집시편의 냉각시간은 약 16s이나 가장 느린 25cpm의 경우에는 약 25s로, 시간차이가 9s이다. 이와 같은 냉각시간 차이의 영향을 확인하기 위하여 다음과 같은 실험을 행하였다²⁾. Fig. 4와 같이 두 개의 탭 사이에 길이가

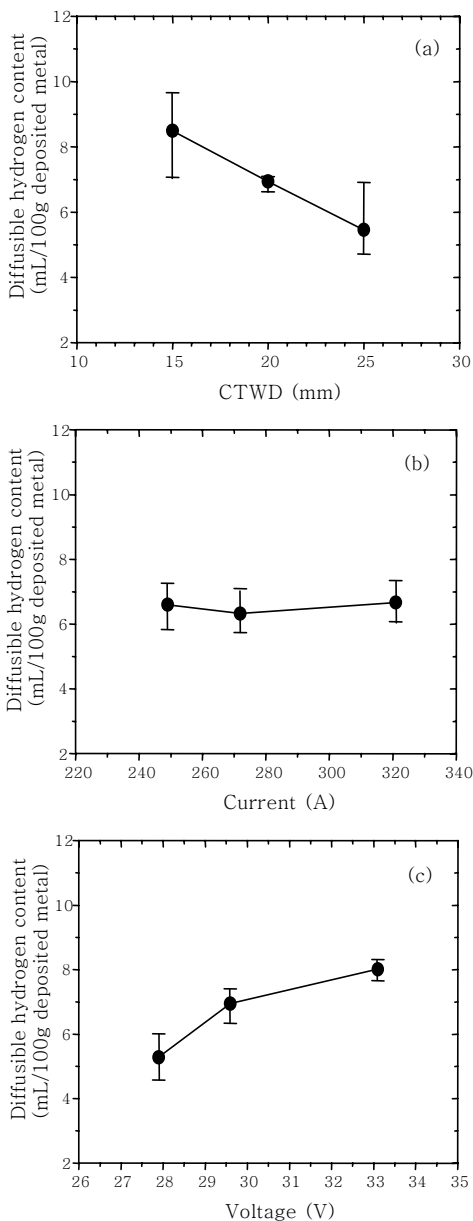


Fig. 1 Effects of (a) CTWD, (b) current, and (c) voltage on the diffusible hydrogen contents of weld metal

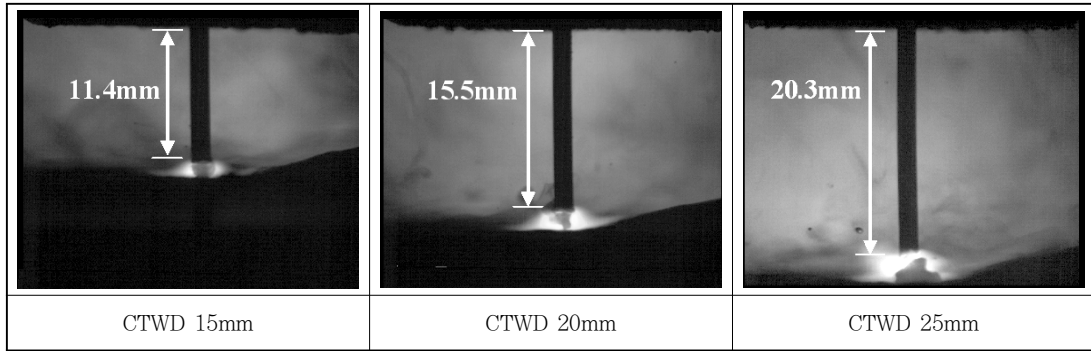


Fig. 2 Photographs showing extension length with different CTWD

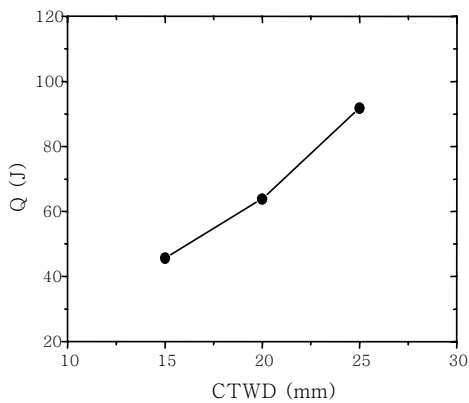


Fig. 3 Variation of Q as a function of CTWD

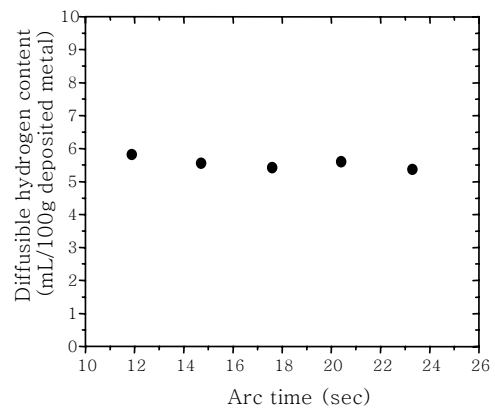


Fig. 5 Effect of arc time on the diffusible hydrogen content of weld metal

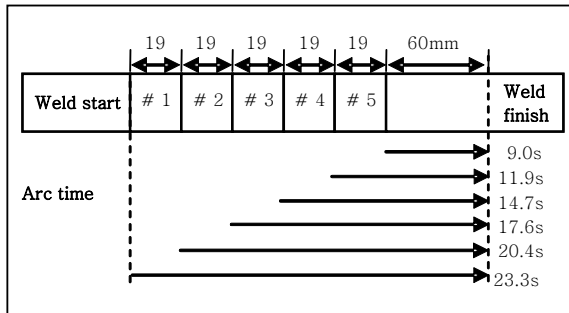


Fig. 4 Modified test assembly to investigate the effect of cooling time

19mm인 수소포집시험편 5개를 연속으로 놓은 다음 320A, 30V, 40cpm의 조건으로 용접하였다. 이런 경우 가장 앞의 시험편 #1과 뒤의 시험편 #5의 아크종료 시까지의 냉각시간 차이는 약 14s로, 본 실험에서 나타나는 최대 냉각시간 차이인 9s보다 크다. Fig. 5에 용접완료 후 각 시험편의 확산성수소량 측정결과를 나타내었다. 5개의 시험편 모두 약 6mL/100g으로 큰 차이를 나타내지 않았다. 따라서 본 전류 변경시험에서 확산성수소의 차이는 용접속도와는 상관이 없음을 알 수 있다.

앞서 CTWD 변경시험과 동일한 방법으로 전류의 변화에 따른 가열시간과 저항발열량 Q를 계산하였다. 먼저 전류가 250에서 320A로 증가함에 따라 돌출길이는 약 17.5mm로 큰 차이를 나타내지 않으나, 송급속도는 682에서 1031cpm으로 크게 증가하여 가열시간은 0.15에서 0.10s로 감소하였다. 이상의 값들을 사용하여 Q를 계산하면 전류가 250에서 320A로 증가함에 따라 Q는 65에서 72J로 조금 증가한다. 이런 점은 CTWD의 경우와 다르다. 즉 CTWD의 증가는 가열시간의 증가와 함께 Q도 크게 증가시켰으나, 전류의 증가는 가열시간은 감소시키며 Q는 조금 증가시킨다. 이러한 이유로 CTWD와 달리 전류의 증가에 따른 용착금속 확산성수소량의 변화는 그렇게 크지 않음을 알 수 있다. 본 실험과 같은 전류의 미미한 영향은 Pitrun⁷⁾의 실험결과에서도 확인되고 있다.

Fig. 1 (c)에는 전압의 영향을 나타내었는데 전압이 28에서 33V로 증가함에 따라 확산성수소량은 5.28에서 8.01mL/100g으로 증가하고 있다. 전압변화에 따른 가열시간과 Q의 변화를 계산한 결과, 두 값은 큰 변화가 없이 각각 약 0.13s, 68J을 나타내었다. 따라서

잘 알려져 있는바와 같이 전압증가에 따른 확산성수소량의 증가는 돌출길이에서의 가열시간이나 저항발열량의 변화에 따른 것이 아니라 아크 길이의 증가에 기인하는 것임을 알 수 있다.

이제까지는 용접변수 중 하나만을 독립적으로 변경하여 용착금속 확산성수소량에 미치는 영향을 조사하였으나, 이번에는 CTWD, 전류, 그리고 전압을 동시에 변경하여 용착금속 확산성수소량의 변화를 조사하였다. Table 2에 각 용접변수와 함께 측정한 확산성수소량을 함께 나타내었다. 먼저 E110T1 와이어의 경우 확산성수소량은 용접변수에 따라 다음과 같은 회귀분석식을 나타내었다(Fig. 6).

$$8kJ/cm \text{의 경우: } [H]_D(mL/100g) = -6.312 + 0.116I + 0.266V - 0.690CTWD$$

$$20kJ/cm \text{의 경우: } [H]_D(mL/100g) = -7.840 + 0.008I + 0.575V - 0.307CTWD$$

회귀분석 결과 앞서 살펴본 용접변수의 독립적인 영향과 동일한 결과를 나타낸다. 즉 CTWD의 증가는 확산성 수소량을 감소시키나 전압의 증가는 확산성 수소

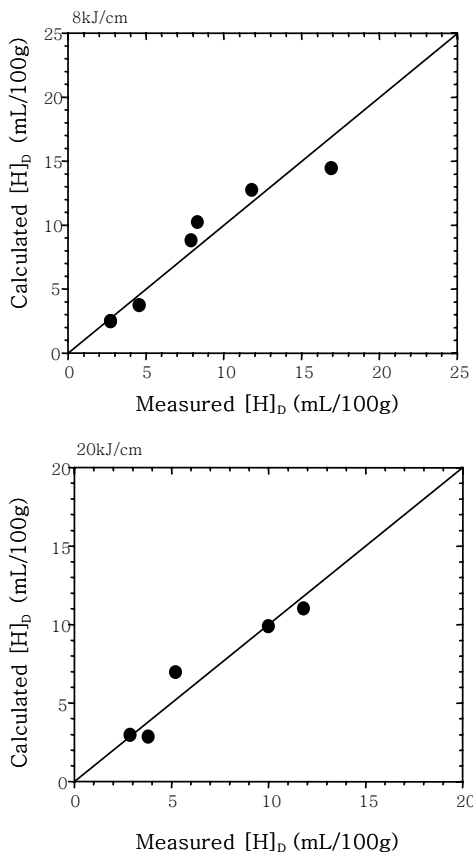


Fig. 6 Comparison between calculated and measured $[H]_D$ in 110T1 wire

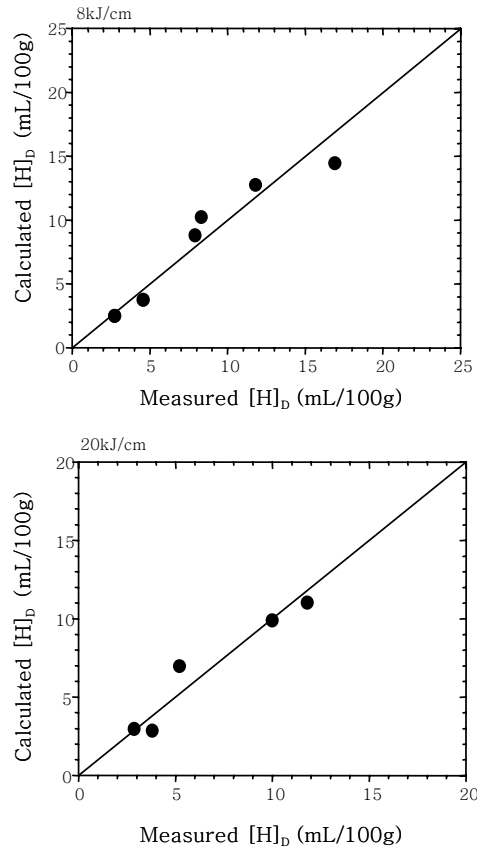


Fig. 7 Comparison between calculated and measured $[H]_D$ in 81T1 wire

량을 증가시킨다. 그리고 전류의 증가는 확산성 수소량을 증가 시키나 CTWD나 전압에 비하여 그 영향이 매우 미미함을 나타낸다. 또한 상대적으로 저입열인 8kJ/cm에서는 전압의 영향보다 CTWD가 더 큰 영향을 미치지 만, 고입열 20kJ/cm에서는 CTWD보다 전압이 더 큰 영향을 나타낸다. 따라서 전압이 어느 정도 이상이 되면 CTWD 효과보다 아크길이의 효과가 더욱 커짐을 알 수 있다. 이러한 경향은 81T1 와이어에서도 동일하게 관찰되었다(Fig. 7).

$$8kJ/cm \text{인 경우: } [H]_D = (mL/100g) = -1.412 + 0.074I + 0.193V - 0.551CTWD$$

$$20kJ/cm \text{인 경우: } [H]_D(mL/100g) = -17.190 + 0.08I + 0.745V - 0.209CTWD$$

4. 결 론

FACW에서 용접금속 확산성수소량에 미치는 용접변수의 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) CTWD가 15에서 25mm로 증가하면 용착금속 확산성수소량은 8.46에서 5.45mL/100g으로 감소하였다. 이러한 원인은 와이어 돌출길이에서 가열시간이 0.11에서 0.14s로 증가함과 동시에 저항발열이 46에서 92J로 증가하기 때문이다.

2) 용착금속 확산성수소량은 전류가 250에서 320A로 증가하여도 큰 변화를 보이지 않았다. 이러한 원인은 돌출길이에서 가열시간이 0.15에서 0.10s로 감소함과 함께 저항발열도 65에서 72J로 증가가 크지 않기 때문이다.

3) CTWD, 전류, 그리고 전압을 동시에 변경하여 용착금속 확산성수소량의 변화에 미치는 용접변수의 영향을 회귀분석한 결과, 상대적으로 저입열인 경우에는 전압보다 CTWD가 더 큰 영향을 나타내지만, 고입열에서는 전압이 더 큰 영향을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. M. Matsushita and S. Liu : Hydrogen control in weld metal by means of fluoride additions in welding flux, *Welding Journal*, **71-6** (2000), 295s-303s
2. D. White, G. Pollard and R. Gee : The effect of welding parameters on diffusible hydrogen levels in cored wire welding, *Welding & Metal Fabrication*, **60-6** (1992), 209-216
3. B. Dixon and K. Håkansson : Effects of welding parameters on weld zone toughness and hardness in 690MPa steel, *Welding Journal*, **74-4** (1995), 122s-132s
4. D. D. Harwig, D. P. Longenecker and J. H. Cruz : Effects of welding parameters and electrode atmospheric exposure on the diffusible hydrogen content of gas shielded flux cored, *Welding Journal*, **78-9** (1999), 314s-321s
5. J. H. Kiefer : Effects of moisture contamination and welding parameters on diffusible hydrogen, *Welding Journal*, **75-5** (1996), 155s-161s
6. ANSI/AWS A4.3-86 : Standard methods for determination of diffusible hydrogen content of martensitic, bainitic, and ferritic weld metal produces by arc welding, American Welding Society, (1985)
7. Miroslav Pitrun : The effect of welding parameters on levels of diffusible hydrogen in weld metal deposited using gas shielded rutile flux cored wires, Ph.D thesis, The University of Wollongong, (2004)