

1GPa급 DP강 전기저항점용접부의 경도분포와 미세조직의 상관관계

나혜성* · 공종판* · 한태교** · 진광근** · 강정윤*,†

*부산대학교 재료공학부

**POSCO 기술연구원

Hardness Distribution and Microstructures of Electric Resistance Spot Welded 1GPa Grade Dual Phase Steel

Hye-Sung Na*, Jong-Pan Kong*, Tae-Kyo Han**, Kwang-Geun Chin* and Chung-Yun Kang*,†

*Dept. of Material Science and Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

**POSCO Technical Research Laboratories, Gwangyang 545-711, Korea

†Corresponding author : kangcy@pusan.ac.kr

(Received April 16, 2012 ; Revised April 25, 2012 ; Accepted April 30, 2012)

Abstract

In this study, the effect of the welding current on the hardness characteristics and microstructure in the resistance spot welding of 1GPa grade cold-rolled DP steel was investigated. Also, correlation between the hardness and microstructure was discussed. In spite of the change in the welding current, the hardness distributions near weld was similar. The hardness in the HAZ and the fusion zone was higher than that of the base metal and the hardness in the fusion zone was varied with the location. Especially, the hardness of HAZ adjacent to the base metal showed maximum value, and softening zone in the base metal adjacent to HAZ was found. With the increasing of welding current, there were no difference in maximum hardness and average hardness in the fusion zone were, but the hardness of the softening zone reduced. The difference in the hardness in each location of weld due to grain size of prior austenite. The softening of the base metal occurred by tempering of the martensite.

Key Words : DP steel, Electric resistance spot welding, Welding current, Hardness, Microstructure, Softening

1. 서 론

자동차 차체에는 연강(Mild Steel)에서 첨단고강도강 (Advanced High Strength Steels, AHSS)까지 다양한 강종들이 적용되고 있다. 최근에는 높은 강도와 우수한 성형성을 확보할 수 있는 고강도-고연성복합조직상의 Complex-Phase(CP)강, δ -Transformation Induced Plasticity (TRIP)강, Twinning Induced Plasticity (TWIP)강 등이 활발히 연구되고 있다¹⁾. 그러나 용접성 및 용접부 특성에 관한 충분한 검증이 이루어 지지 않아 아직 자동차 차체에 적용되고 있지 않는 실정이다.

페라이트와 마르텐사이트로 구성된 DP (dual phase) 강은 비교적 적은 합금원소를 가지고도 높은 강도를 확보할 수 있다. 또한 유사 강도 수준의 다른 첨단고강도강에 비해 가공성이 우수하고, 탄소(C)함량이 낮아 용접성이 우수한 특징이 있어 자동차 등 수송기기분야에서 매우 각광을 받고 있다¹⁻³⁾.

자동차 차체 부품을 최종 제품으로 생산하기 위해서는 용접공정이 필수적이며, 원가 측면에서 유리한 전기저항점용접(Electrical Resistance Spot Welding, ERSW)이 차체 용접에서 80%이상으로 가장 많이 적용되고 있다^{4,5)}.

마르텐사이트 분율이 높은 첨단고강도강(DP 780강과 DP 980강등)을 전기저항점용접 시 모재와 HAZ사

이에 모재내의 마르텐사이트가 용접열영향에 의해 A₁변태점 (공석변태점) 이하의 온도로 가열되어 템퍼드 마르텐사이트 (Temperd Martensite)로 변태되어 연화부 (Softening Zone, SZ)가 발생하게 되고^{6,7)}, 이 부분에서 파단이 일어나 용접부의 강도가 저하된다고 보고되고 있다^{8,9)}.

본 연구는 1 GPa급 DP강에 대한 저항점용접성 및 용접부 특성을 평가하는 것을 주목적으로, 용접부 경화 특성 및 미세조직에 미치는 용접전류의 영향을 검토하고, 경도와 미세조직과의 상관관계를 고찰하였다.

2. 사용 재료 및 실험방법

실험에 사용된 강재는 두께 1.2mm, 인장강도 1 GPa 급인 냉연 DP (Dual Phase)강을 사용하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 강재의 화학성분과 기계적 성질을 나타낸 것이다.

용접은 공기압축식 AC 저항점용접기를, 전극은 Cr-Cu합금계에 6mm 선단경의 돔형상의 전극을 각각 이용하였다. 시편은 가로 40mm, 세로 40mm로 절단한 다음, 표면을 아세톤과 메탄올로 세척 후 겹침 점용접을 실시하였다.

Table 2는 용접조건을 나타낸 것으로 가압력, 용접 시간, 유지시간 등은 ISO 18278-2¹⁰⁾에서 추천하는 용접조건으로 고정하고, 용접전류만 5.2~9.0 (kA)범위에서 0.2 (kA) 간격으로 변화하여 용접부 경도특성 검토하였다. 그리고 경도측정은 Mitutoyo사의 마이크

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of the investigated base metal

Wt.%					UTS (MPa)	YS (MPa)	EL (%)
C	Si	Mn	P	S			
0.07	0.5	2.3	0.01	0.003	1007	627	20

Table 2 Welding conditions and electrode dimension (Single phase AC, 60Hz)(ISO 18278-2)

Welding parameters	Conditions
Weld force(kN)	4
Weld time(cycle)	17
Hold time(cycle)	17
Squeeze time(cycle)	40
Weld current(kA)	5.2~9.0
Water fiow rate(ℓ/min)	4
Electrode	Cr-Cu alloy, R Type, 6mm

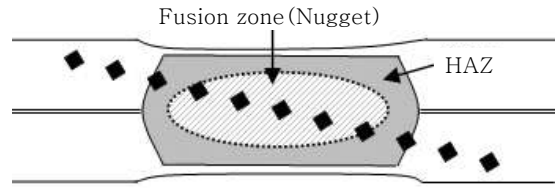


Fig. 1 Schematic illustration for measurement method of hardness test. (AWS D8.9-97)¹¹⁾

로 비커스 경도기를 사용하여 Fig. 1에 나타낸 것처럼 용접부의 대각선방향으로 하중 500gf(0.5kN), 유지시간 15초로 200μm 간격으로 측정하였다.

용접부 미세조직은 연마 후 3% 나이탈 (Nital)과 NaOH (NaOH 5g + Picric acid 3g + boiled water 100mL) 용액으로 에칭하여 광학현미경과 SEM으로 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 용접부 경도분포에 미치는 용접전류의 영향

Fig. 2와 Fig. 3은 5.4kA와 7.4kA의 용접전류로 전기저항 점용접한 경우의 너깃 형상과 용접부 근방의 경도분포를 나타낸 것이다. 이들 용접조건에서는 결합

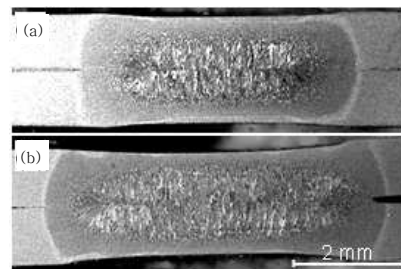


Fig. 2 Cross-sections of spot welded as a function of welding current. (a) 5.4 (kA), (b) 6.6 (kA), (c) 7.4 (kA), (d) 8.2 (kA), (e) 8.8 (kA)

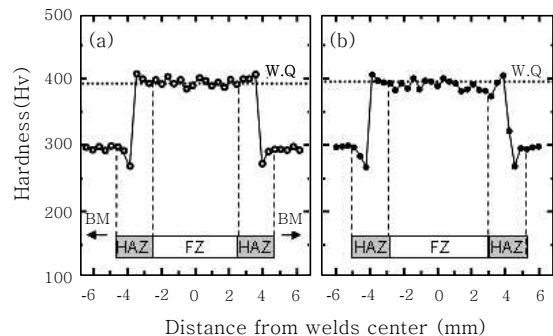


Fig. 3 Typical hardness distribution of spot welds with welding current. (a) 5.4 (kA), (b) 7.4 (kA)

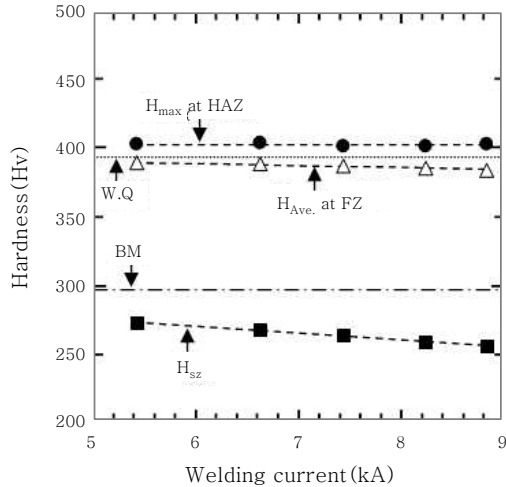


Fig. 4 H_{MAX} , H_{Ave} , H_{WQ} , H_{SZ} with welding current. H_{MAX} : Hardness at fine HAZ, H_{Ave} : Average hardness at fusion zone, H_{WQ} : hardness at water quenching of raw material, H_{SZ} : hardness at softening zone

이 없는 건전한 너깃 형상을 하고 있음을 볼 수 있다.

경도분포는 용접전류에 관계없이 거의 유사한 것을 볼 수 있고, HAZ와 용융부의 경도가 모재보다 높으며, 용융부 내의 경도가 부위에 따라 편차가 있다. 특히 모재에 가까운 HAZ에서 최고경도값을 가지며, HAZ 근방의 모재에서 연화부가 나타남을 알 수 있다.

Fig. 4는 용접전류에 따른 HAZ에서 최고경도값(H_{MAX}), 용융부에서 평균 경도(H_{FZ}), 모재 연화부의 경도(H_{SZ}) 변화를 나타낸 것이다.

용접부 냉각속도의 경도값을 비교할 시편으로 900°C에서 수냉 처리한 시편의 경도값(H_{WQ})변화도 함께 나타내었다.

H_{MAX} 는 용접전류에 따른 변화가 없으며, 수냉한 처리한 시편의 경도(H_{WQ})보다 높다. H_{FZ} 는 용접전류가 증가함에 따라서 약간 감소하는 경향이 있고, 모두 H_{WQ} 보다 낮다. 한편, H_{SZ} 는 용접전류가 증가함에 따라서

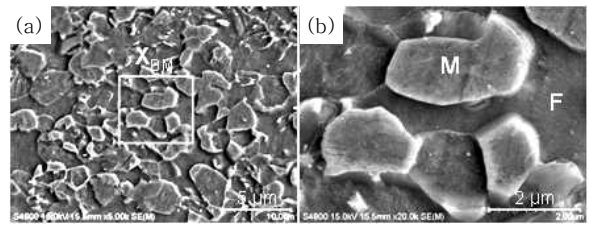


Fig. 5 (a) SEM micrographs of base metal and (b) enlarged SEM micrographs of the area marked X_{BM} in (a). (F : Ferrite, M : Martensite)

약간 감소하는 경향이 있다.

3.2 용접부의 경도와 미세조직과의 관계

Fig. 5는 모재의 미세조직을 나타내 것으로, DP강의 전형적인 조직인 페라이트와 마르텐사이트 조직으로 구성되어 있다. Fig. 6은 7.4kA의 용접전류로 점용접한 용접부의 단면 거시조직(a)을 나타낸 것이고, (b)와 (c)의 각각 HAZ(b)와 용융부(c)의 SEM조직이며, 이러한 상변태 거동을 JmatPro v-5소프트웨어를 이용하여 CCT 곡선을 작성하고 해석하여 보았다¹²⁻¹³⁾.

Fig. 7은 CCT곡선을 나타낸 것으로, 그림에서 알 수 있듯이 점용접을 하거나, 900°C 수냉하게 되면, 마르텐사이트 변태만 일어나는 것을 알 수 있다.

Fig. 3에서 같은 조성이고 급랭에 의해서 얻어진 조직임에도 불구하고, $H_{FZ}/H_{WQ}/H_{MAX}$ 순으로 경도가 높은 이유를 파악하기 위하여 미세조직을 관찰해 보았다.

Fig. 8의 (a)는 경도분포의 모식도이고, (b)~(e)의 미세조직은 각각 (a)의 1~4의 지점 미세조직이며, (f)는 모재의 수냉 조직 (5)을 나타낸 것이다. 각 지점에서 구오스테나이트 결정립 크기와 경도를 비교하여 보면, 최고경도를 나타내는 HAZ는 결정립 크기가 수냉한 것보다 미세하며, 경도가 가장 낮은 용융부는 조대한

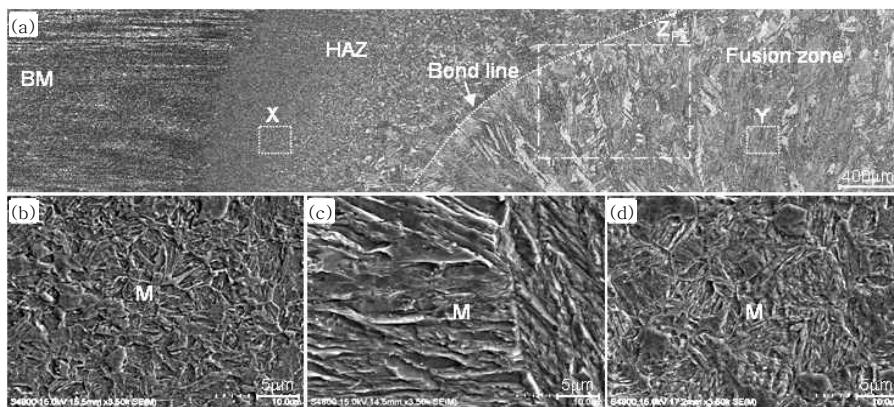


Fig. 6 Optical (a) and SEM micrographs (b~d) of spot welds. (b) X in (a) (HAZ), (c) Y in (a) (Fusion zone), (d) Water quenching (900°C) of raw material. [Welding current : 7.4 (kA)]

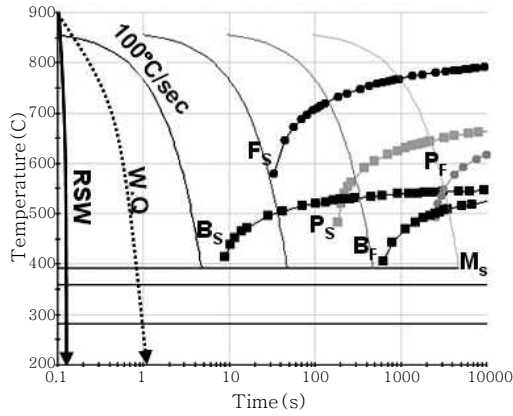


Fig. 7 CCT diagram with DP steel calculated using JmatPro v-5 program. W.Q cooling rate : 600°C/sec by experiment, ERSW cooling rate : 6000°C/sec

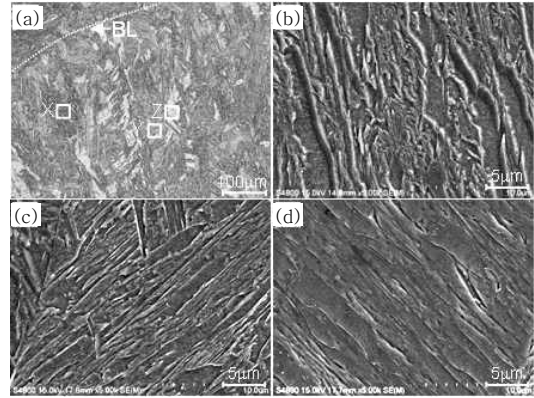


Fig. 9 Optical (a) and SEM micrographs (b~d) in fusion zone of spot welds. (b) X (382.9 ± 5.3 Hv.), (c) Y (376.8 ± 4.8 Hv.), (d) Z (394.3 ± 6.8 Hv.) [Welding current : 7.4 (kA)]

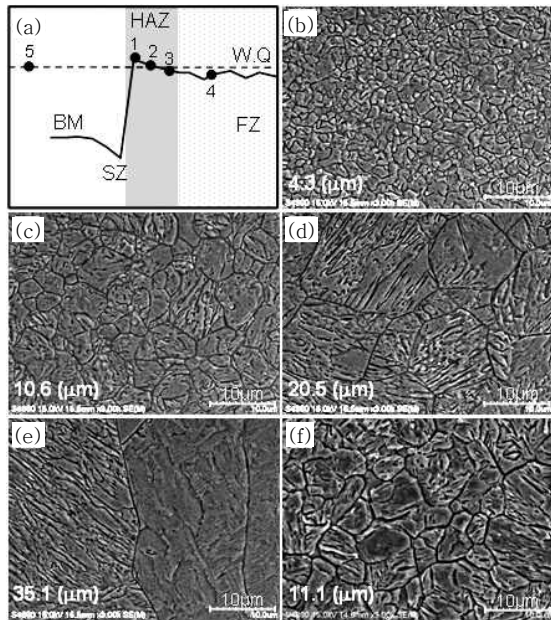


Fig. 8 Schematic graphs typical hardness distribution (a) and SEM micrographs (b~f) of spot welds and prior austenite (P.A) size. (b) 1 (Fine HAZ), (c) 2 (Corase HAZ 1), (d) 3 (Corase HAZ 2), (e) 3 (Fusion zone), (f) 5 (water quenching of raw material) [Welding current : 7.4 (kA)]

것을 알 수 있다.

이 결과로부터 같은 마르텐사이트 조직임에도 불구하고 경도 차이가 나는 것은 구오스테나이트 크기가 다르므로, 냉각에 의해 형성된 마르텐사이트 크기가 다르기 때문인 것으로 생각된다¹⁴⁾. 특히 결정립이 가장 미세하고 최고경도를 나타내는 곳은 가열온도가 이 강의 A_{C3} 직상 온도로 가열된 곳으로 사료된다.

특히 결정립이 가장 미세하고 최고경도를 나타내는

곳은 가열온도가 이 강의 A_{C3} 직상 온도로 가열된 곳으로 생각된다. 용융부의 위치에 따라 경도 편차가 발생하는 이유를 파악하기 위해서 Fig. 9와 같이 경도를 측정된 부위 근처의 미세조직을 비교하여 보았다.

Fig. 9의 (a)는 용융부의 대표적인 광학현미경 조직이고, (b)는 (a)의 □로 표시된 부분을 확대한 것이고, (c), (d)는 각 X, Y와 Z로 표시된 부분을 확대한 SEM조직이다. 여기서 X, Y와 Z 영역의 경도는 각각 382.9, 376.8과 394.3이고, 3영역의 최소와 최대의 경도차는 약 17.3 정도이다. 광학현미경상으로 백색으로 보이는 조직(Z)이 경도가 가장 높다. 미세조직으로부터 경도가 낮은 조직은 마르텐사이트 래스(lath)가 넓고, 경도가 높은 흰색 조직은 lath가 아주 미세한 것을 알 수 있다. 이것은 용융부의 특성 상 성분의 미세한 편차로 인하여 마르텐사이트 래스 크기가 다른 조직들이 불규칙적으로 존재하므로, 측정된 압자 위치에 따라 경도 차가 발생하는 것으로 생각된다.

HAZ에 인접한 모재에서 연화가 발생하는 원인을 파악하기 위하여 원모재 조직과 연화영역의 미세조직을 비교하였다.

Fig. 10의 (a)는 연화부의 SEM조직이고, (b)는 (a) 확대한 사진을 나타낸 것이다. Fig. 5의 모재 조직과 연화부의 조직을 비교하여 보면, 연화부 조직은 마르텐사이트가 분해된 모습을 나타내고 있다. 이것은 용접열에 의해 $A1$ 변태 직하 온도로 가열되어 마르텐사이트가 템퍼링(tempering)되었음을 의미한다. 즉 준열영향부에 해당하는 영역이다. 또한 용접점류의 증가함에 따라 입열량이 증가함으로써, HAZ에 유입되는 열량도 증가하므로, 템퍼링되는 영역도 넓어지고, 짧지만 유지 시간도 길어지는 효과가 있기 때문에 연화부의 경도가

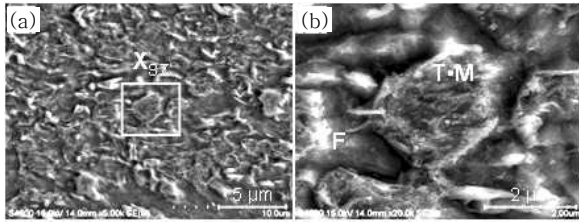


Fig. 10 SEM micrographs of softening zone and (b) enlarged SEM micrographs of the area marked XSZ in (a). (F : Ferrite, T·M : Tempered Martensite) [Welding current : 7.4 (kA)]

더욱 감소하는 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 1 GPa급 냉연 DP강의 전기저항용접부 경도특성과 미세조직과의 상관관계를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용접부의 경도분포는 용접전류가 변화하여도 동일한 분포를 가졌고, HAZ와 용융부의 경도가 모재보다 높았으며, 용융부 내의 경도가 부위에 따라 편차가 있었다. 특히 모재에 가까운 HAZ에서 최고경도를 나타내고, HAZ 근방의 모재에서 연화부가 존재하였다. 용접 전류의 증가하여도 최고경도와 용융부의 평균경도는 거의 변화하지 않았지만, 연화부 경도는 조금 감소하였다.

2) 전기저항용접 시 냉각속도가 수냉보다 빠르고, 용융부와 HAZ는 모두 마르텐사이트조직으로 구성되었다. 또한 HAZ 내의 위치에 따라 경도값이 다른 것은 각 위치에 따라 가열온도가 다르기 때문에 구오스테나이트 결정립이 다르기 때문이고, 용융부의 위치에 따라 경도 편차가 생기는 것은 마르텐사이트 라스의 크기가 다르기 때문인 것으로 사료된다.

3) 모재부에서 연화부가 발생하는 것은 모재의 마르텐사이트가 용접열에 의해 템퍼링되기 때문이고, 용접전류가 증가할수록 HAZ에 부여되는 입열량이 많아 A1 온도 이하로 가열되는 폭도 넓어지고, 유지시간도 길어지기 때문에 연화부 경도가 더욱 감소하는 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 (주)POSCO와 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 선도연구센터육성사업 학제간융합분야(NCRC)로부터 지원받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다 (2007-0161-004).

참 고 문 헌

1. J. Zrnik, I.Manuzic and S. V. Dobatkin : Recent

progress in high strength low carbon steels, *Metallurgija*, 45, (2006), 323-331

2. R. G. Davies : Influence of silicon and phosphorous on the mechanical properties of both ferrite and dual-phase steels, *Metallurgical and Materials Transactions*, 10A (1979), 113-118
3. R. KUZIAK, R. KAWALLA, S. WAENGLER: Advanced high strength steels for automotive industry, *ARCHIVES OF CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING*, 2 (2008), 104-105
4. Tae-Kyo Han, Kyoo-Young Lee and Jong-Sang Kim: Recent Developments and Weldability of Advanced High Strength Steels for Automotive Applications, *J. KWS*, 27 (2008), 131-132 (in Korean)
5. P. Marashi, M. Pouranvari, S. Amirabdollahian, A. Abedi and M. Goodarzi, Microstructure and failure behavior of dissimilar resistance spot welds between low carbon galvanized & austenitic stainless steels, *Mater Sci Eng A*, 480 (2008), 175
6. M. Pouranvari, S. P. H. Marashib and D. S. Safanamab : Failure mode transition in AHSS resistance spot welds. Part II: Experimental investigation and model validation, *Materials Science and Engineering A*, 528 (2011), 8347-8349
7. V. H. B. Hernandez, S. K. Panda, M. L. Kuntz and Y. Zhou : Nanoindentation and microstructure analysis of resistance spot welded dual phase steel, *Materials Letters*, 64 (2010), 207-210
8. V. H. B. Hernandez, M. L. Kuntz, M. I. Khan and Y. Zhou : Influence of microstructure and weld size on the mechanical behaviour of dissimilar AHSS resistance spot welds, *Science and Technology of Welding & Joining*, 13 (2008), 775
9. M. I. Khan, M. L. Kuntz and Y. Zhou : Effects of weld microstructure on static and impact performance of resistance spot welded joints in advanced high strength steels, *Science and Technology of Welding & Joining*, 13 (2008), 301-302
10. ISO standard : ISO 18278-2, Resistance welding Weldability Part 2: Alternative Procedures for the Assessment of Sheet Steels for Spot Welding, (2004)
11. AWS D8.9-97 : Recommended Practices for Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steels, American Welding Society
12. M. Li, D. Niebuhr, L. Meekisho and D. Atteridge : A Computational Model for the Prediction of Steel Hardenability, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 29B(6) (2008), 661-672
13. C. Maa, D. L. Chena, S. D. Bhole and G. Boudreau : Microstructure and fracture characteristics of spot-welded DP600 steel, *Materials Science and Engineering A*, 485 (2008), 338
14. Jorge Otibo, Fabiana C.Nascimento, Paulo R.Mei, Lisandro P.Cardoso and Michael J.Kaufman : *Materials Transactions*. Vol.43, (2002) 916-919