

## 신선 가공된 이상 조직강의 냉간 성형성에 대한 연구

박경수\* · 최상우\*\* · 이덕락\*\* · 이종수\*

(2003년 10월 9일 접수)

## A Study on the Cold Formability of Drawn Dual-Phase Steels

K. S. Park, S. W. Choi, D. L. Lee and C. S. Lee

### Abstract

There is a growing interest to replace the commercial steels with non-heat treated steels, which does not involve the spheroidization and quenching-tempering treatment. However, Non-heat treated steels should satisfy high strength and good formability without performing heat treatment. Therefore, it is important to investigate optimum materials showing a good combination of strength and formability after the drawing process. In this study, Dual-Phase Steels were studied as candidate materials for non-heat treated steels, which have different martensite morphologies and volume fractions obtained through heat-treatment of intercritical quenching (IcQ), intermediate quenching (ImQ) and step quenching (SQ). The mechanical properties of DP steels were measured by tension and compression tests. Also, the cold formability of three DP steels which have similar tensile strength value was investigated by estimating the deformation resistance and the forming limit. The deformation resistance which is important factor in determining die life was estimated by calculating the deformation energy. And the forming limit was estimated by measuring the critical strain revealing crack initiation at the notch tip of the specimens.

**Key Words** : Non-heat Treated Steel, Dual-Phase Steel, Drawing, Intercritical Quenching, Intermediate Quenching, Step Quenching, Cold Formability, Deformation Resistance, Forming Limit

### 1. 서론

철강 산업에서는 생산성 향상을 위한 노력이 다방면으로 진행되고 있는데, 특히 가공 공정 단축을 통한 열처리 생략강에 대한 관심이 집중되고 있다. 이에 따라 성형 전의 구상화 열처리와 성형 후의 소입소려 열처리를 생략할 수 있는 열처리 생략강이 1970 년대에 개발되어 최근 에너지 절감을 통한 생산성 향상 및 환경 친화형 철강으로 각광 받고 있다.<sup>(1-2)</sup> 이러한 열처리 생략강은

전 열처리 없이도 성형성이 우수해 다이스의 수명을 떨어뜨리지 않으면서 성형이 잘 되어야 하고, 후 열처리 없이도 요구되는 기계적 특성을 만족시켜야 한다.<sup>(3)</sup>

열처리 생략강의 냉간 성형성은 소재가 다이스에 미치는 영향을 고려한 변형 저항성의 평가와 성형에 따른 재료 표면의 균열 발생 여부를 조사한 한계 성형율로 평가할 수 있다.<sup>(4-5)</sup> 이러한 열처리 생략강은 신선 후 열처리 공정을 거치지 않고 바로 성형을 하기 때문에 신선 공정이 기계적

\* 포항공과대학교 신소재공학과

\*\* 포스코 기술연구소

성질에 미치는 영향을 고려하는 것이 중요하다. 신선으로 인한 냉간 가공이 가공 경화 현상을 일으켜 냉간 성형성에 영향을 미치기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 높은 가공 경화율로 우수한 성형성을 보이는 DP 강을 열처리 조건에 따라 마르텐사이트의 형태와 분율을 변화 시켜 기계적 성질 및 냉간 성형성을 평가하였다. 또한 최종 성형 전 신선 공정이 기계적 성질 및 냉간 성형성에 미치는 영향을 살펴보았다.

## 2. 실험 방법

Table 1과 같은 성분의 강종을 진공 유도 용해로에서 제조하여 1250°C에서 120분 동안 용체화 처리한 후, 주조 조직의 파괴를 위하여 사이징 압연을 통해 두께 100mm의 슬라브로 제조하였다. 이를 가지고 서로 다른 형태를 가지는 마르텐사이트와 페라이트의 이상 조직을 형성시키기 위하여 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 intercritical quenching (IcQ)과 intermediate quenching(ImQ), 그리고 step quenching(SQ)의 열처리를 수행하였다.

이 때, 마르텐사이트의 분율을 변화시키기 위해 2 상( $\alpha + \gamma$ ) 영역에서의 열처리를 통해 마르텐사이트의 형태와 분율을 달리하는 이상 조직강을 얻었다. 이렇게 얻어진 각각의 이상 조직강으로 draw bench를 이용하여 신선 가공을 수행하였다. 신선 가공 시 윤활재로는 MoS<sub>2</sub>를 주 성분으로 한 Molycote D-321 R을 사용하였고, 다이스는  $\phi 11.32\text{mm}$  크기의 초경 다이스를 사용하였으며, 가공 시 발열에 기인한 aging을 억제하기 위하여 50mm/s의 속도로 신선하였다.

이와 같이 가공된 이상 조직강으로 기계적 성질 및 냉간 성형성을 평가하기 위해 인장 및 압축 시험을 수행하였다. 이때 인장 시험은 게이지 길이 20mm의 ASTM small-size 봉형 시편을 사용하였고, 압축 시험은  $\phi 10\text{mm}$ 의 봉형 시편과 다이와의 마찰을 줄이기 위해 테프론 막을 사용하였다.

한편, 냉간 성형성 평가는 다이스의 수명에 영향을 미치는 변형 저항성과 소재의 균열 발생 여부를 조사한 한계 성형율을 통해 평가하였다. 변형 저항성은 압축 곡선을 통해 평가하였고, 한계 성형율은 노치 압축 시편의 압축량에 따른 표면 균열 발생 여부를 조사하여 평가하였다.

Table 1 Chemical compositions (wt. %)

Alloys	C	Si	Mn
DP steels	0.07	0.83	1.51

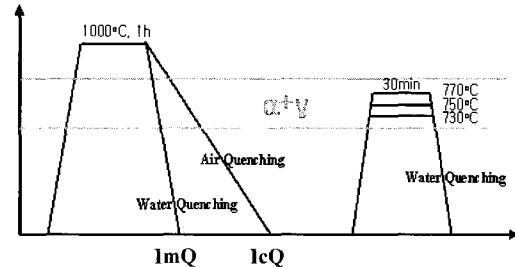


Fig. 1(a) The diagram for heat treatment of ImQ-DP steel and IcQ-DP steel

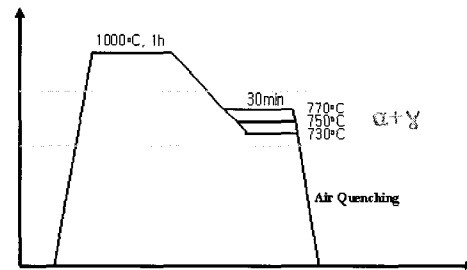


Fig. 1(b) The diagram for heat treatment of SQ-DP steel

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 열처리 조건에 따른 미세 조직

열간 압연 후 용체화 처리를 거친 as-received 조직은 페라이트와 퍼얼라이트로 구성된다. 이를 Fig. 1에서의 열처리 경로(최종 열처리 온도 750°C)에 따라 가공하면 Fig. 2와 같이 약 15% 분율의 마르텐사이트를 갖는 서로 다른 형태의 이상 조직강을 형성한다.

IcQ 열처리를 통한 이상 조직강은 Fig. 2(a)와 같이 페라이트의 결정립을 따라 미량의 마르텐사이트가 형성된다. 이는 페라이트와 퍼얼라이트로부터 오스테나이트의 핵 생성이 계면 또는 입계에서 일어나고 이상 영역에서의 평형 오스테나이트의 부피 분율 및 조성에 도달할 때까지 오스테나이트가 페라이트 쪽으로 성장하기 때문이다.<sup>(6)</sup> 이렇게 성장한 오스테나이트를 퀴칭하게 되면 마르

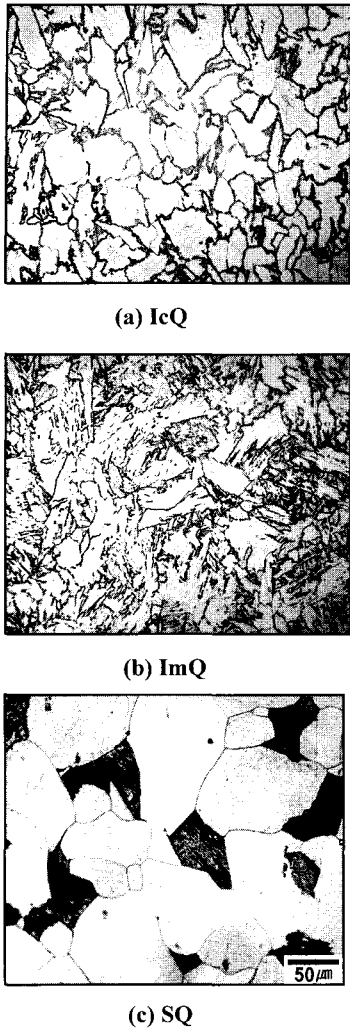


Fig. 2 Optical Micrographs for DP steels(Nital etching)

텐사이트를 형성하게 된다.

Fig. 2(b)는 ImQ 열처리를 통한 이상 조직강으로, 미세한 침상의 마르텐사이트가 페라이트 기지 내에 균일하게 분포되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 이는 이상 영역 전의 조직이 마르텐 사이트로 이를 다시 이상 영역으로 재가열하면 오스테나이트가 구 마르텐사이트의 래스 경계에서 핵생성되어 래스 경계를 따라 성장함으로써 오스테나이트를 형성하게 되고 이를 퀴칭하게 되면 미세한 침상의 마르텐사이트가 형성되는 것이다.

한편 SQ 열처리를 통한 미세 조직은 Fig. 2(c)에서와 같이 페라이트 결정립과 거의 비슷한 크기를 가진 조대한 괴상의 마르텐사이트를 형성하게

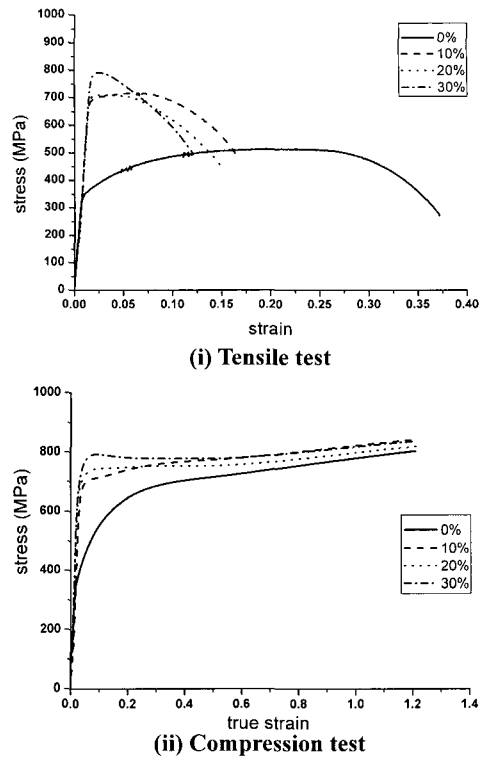
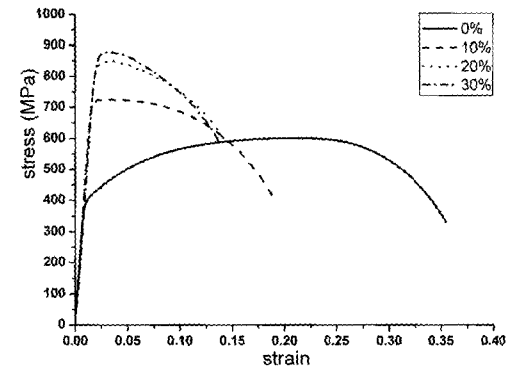


Fig. 3 (a) Stress-strain curves of IcQ-DP steel

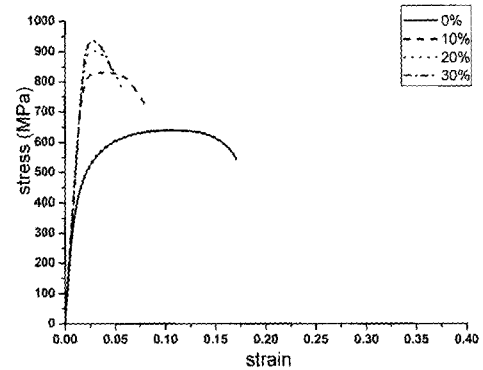
된다. 이는 이상 영역 어닐링 이전의 조직이 오스테나이트이며, 이상 영역으로 온도가 낮아짐에 따라 오스테나이트 결정립계에서 페라이트가 형성되고 이것이 오스테나이트 결정립내로 성장하기 때문이다. 따라서 페라이트로 변태하지 않은 오스테나이트가 퀴칭시 마르텐사이트를 형성하게 된다.

### 3.2 기계적 성질

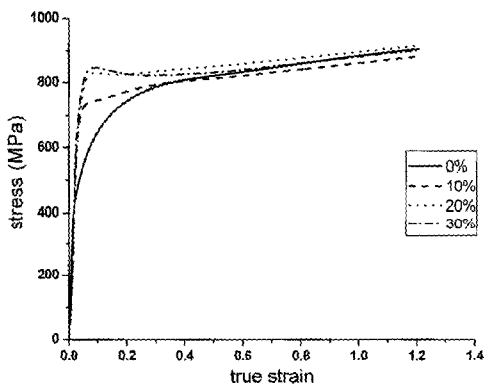
열처리(최종 열처리 온도 750℃)를 통해 제어된 이상 조직강의 인장 및 압축 시험 결과는 Fig 3과 같이 나타난다. 이상 조직강의 인장 특성은 연속 항복 거동을 보이는데, 이는 마르텐사이트 입자 주변에 축적되어 있는 가동 전위의 밀도가 높고, 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태되는 동안 3~5%의 체적 팽창을 일으키기 때문에 페라이트 내부에 압축 잔류 응력이 존재하게 되고 이로 인한 Bauschinger 효과로 항복점이 소실되기 때문으로 알려져 있다.<sup>(7)</sup> 한편 각 이상 조직강의 인장 성질을 비교하여 살펴보면 SQ의 경우 강도는 매우 높으나 낮은 연신율을 나타내고 있어 상당히 취약함으로 알 수 있다.<sup>(8)</sup> 이는 조대한 마



(i) Tensile test

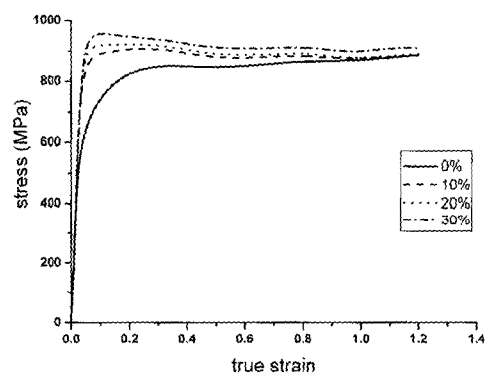


(i) Tensile test



(ii) Compression test

Fig. 3(b) Stress-strain curves of ImQ-DP steel



(ii) Compression test

Fig. 3(c) Stress-strain curves of SQ-DP steel

르텐사이트의 형성 시 생긴 미세 균열 등으로 인해 인장 취약한 연성을 나타내고 있는 것이다. 이에 반해 마르텐사이트의 분율이 작고 미세한 IcQ의 경우는 마르텐사이트의 분율이 매우 낮아 강도가 낮고 연성이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

또한 이상 조직강을 신선으로 냉간 가공할 경우 강도가 증가하고 연신율이 감소하는 것을 알 수 있다.<sup>(9)</sup> 이러한 강도 증가는 가공 경화율이 큰 이상 조직강에서는 상당히 큰 비율로 증가하게 된다. 하지만 이러한 강도의 증가는 이상 조직강의 특징인 가공 경화 현상과 상쇄되어 항복 강도가 인장 강도와 거의 비슷할 정도로 증가한다. 그러나 Fig. 3에서의 압축 성질을 살펴 보면, 초기 강도의 증가와는 달리 변형률이 증가함에 따라 강도의 증가 효과가 줄어드는 것을 살펴볼 수 있다. 이는 초기 강도의 증가는 냉간 가공에 따른 가공 경화 현상에 의한 것인데 반해, 일정

변형률 이상에서는 가공 경화 현상의 영향이 사라지고 Bauschinger 효과나 균열에 의해 강도가 비슷해 지거나 오히려 감소하는 경향을 나타내게 되는 것이다.<sup>(10-11)</sup>

### 3.3 냉간 성형성 평가

다이스의 수명에 영향을 미치는 변형 저항성은 압축 곡선이 나타내는 면적을 통해 비교할 수 있는데, 열처리 생략강은 신선 후 열처리를 하지 않은 강이기 때문에 신선을 거친 각 강도의 압축 곡선을 비교하여 변형 저항성을 평가하는 것이 의미가 있다. 따라서 10% 신선 가공된 각각의 강이 비슷한 인장 강도를 갖도록 최종 열처리 온도를 변화시켜 제어하였고, 이 때의 압축 곡선 면적을 계산하여 변형 저항성을 비교하였다. 770℃에서 열처리한 IcQ 강과 ImQ 강, 그리고 750℃에서 열처리한 SQ 강이 10% 신선 가공 후 약 810MPa 정도의 비슷한 인장 강도를 나타내었다. 이와 같

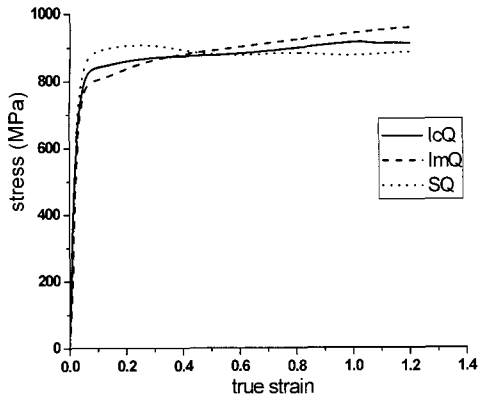


Fig. 4 Compressive stress-strain curves of DP steels after 10% drawing

Table 2 The comparison of the areas for the deformation resistance after 10% drawing

IcQ	ImQ	SQ
1044	1064	1054

이 제어된 각 강도의 압축 곡선을 비교해 보면 (Fig. 4) 초기 강도는 SQ 강이 가장 높고 다른 두 강은 낮은 것을 볼 수 있으나 일정 변형량 이상에서는 오히려 SQ 강이 가장 낮고 ImQ 강이 가장 높은 강도를 나타냄을 확인할 수 있다. 따라서 Table 2와 같이 곡선이 나타내는 면적의 비교를 통해 변형 저항성을 살펴보면 IcQ 강이 가장 작은 변형 저항성을 나타냄으로 다이소의 수명에 가장 적게 영향을 미칠 것으로 예측할 수 있다.

한계 성형율은 압축에 따른 표면 균열 발생 여부로 평가하였는데, Table 3과 같이 SQ 강도의 경우 50%의 성형율에서 균열이 발생하기 시작하여 한계 성형율이 가장 나쁜 것으로 나타났고, IcQ 강도의 경우 85%의 성형율에서부터 균열이 발생하기 시작하여 한계 성형율이 우수한 것으로 나타났다. 이는 인장 시험에서의 연신율 결과와도 잘 일치하고 있다. 또한 신선량의 증가에 따라 한계 성형율은 감소함을 살펴볼 수 있는데, 특히 IcQ 강에서 두드러지게 감소하는 경향을 보이고 있다. 하지만 신선량이 증가함에 따른 한계 성형율의 감소량은 그리 크지 않았다.

이러한 이상 조직강의 한계 성형율은 Fig. 5와 같이 마르텐사이트와 페라이트의 계면에서 공동

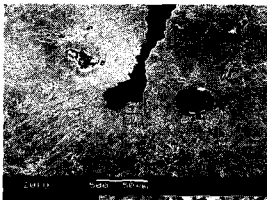
Table 3 The fracture limit for the drawn steels in upset test

Materials	Drawing Reduction	Upsetting Ratio					
		40%	50%	60%	70%	80%	90%
IcQ (750℃)	0%	→ X (85%)					
	10%	→ X (65%)					
	20%	→ X (62.5%)					
	30%	→ X (62.5%)					
ImQ (750℃)	0%	→ X (65%)					
	10%	→ X (60%)					
	20%	→ X (60%)					
	30%	→ X (55%)					
SQ (750℃)	0%	→ X (50%)					
	10%	→ X (40%)					
	20%	→ X (40%)					
	30%	→ X (37.5%)					

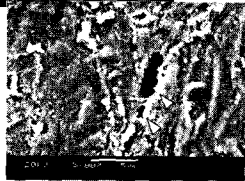
또는 미세 균열이 생성됨을 관찰함으로써 확인할 수 있다. IcQ 강도의 경우 마르텐사이트와 페라이트의 계면에서 많은 미세 균열을 발견할 수 있다. 즉, 이러한 계면에서 시작된 미세 균열들이 서로 연결되면서 균열로 진행되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 이러한 미세 균열이 연결되기에는 마르텐사이트의 분율이 적어 페라이트 내부로도 균열이 전파하기 때문에 균열의 발생이 느리게 진행된다. ImQ 강에서의 균열도 마르텐사이트와 페라이트 사이의 계면에서 미세 균열이 발생하나, 침상의 마르텐사이트가 시편 전체에 걸쳐 고르게 분포되어 있기 때문에 형성된 미세 균열들이 다소 쉽게 연결될 수 있다. 따라서 ImQ 강도의 한계 성형율이 더 빠른 미세 균열의 연결로 인한 균열 발생으로 IcQ 강도보다 좋지 않다. 한편 SQ 강도는 마르텐사이트와 페라이트 사이의 계면에서 미세 균열이 발생하기도 하고, 조대한 마르텐사이트가 깨지면서 균열이 발생하기도 한다. 이러한 조대한 마르텐사이트는 오스테나이트로부터의 변태 과정에서 계면의 소성 변형 차이로 인한 큰 변형율 차이를 보이게 된다. 따라서 침상의 마르텐사이트와는 달리 페라이트 조직과의 계면부가 취약해 미세 균열이 쉽게 형성되고 다소 큰 미세 균열들이 연결되면서 균열을 성장시키게 된다. 따라서 SQ 강도의 경우가 가장 낮은 한계 성형율을 갖게 되는 것이다.



(a) IcQ



(b) ImQ



(c) SQ

Fig. 5 SEM micrographs at crack tip of DP steels

#### 4. 결론

열처리 조건을 달리한 DP 강을 마르텐사이트의 형태와 분율이 다른 IcQ 강, ImQ 강, 그리고 SQ

강으로 제어하였고, 신선 공정을 거친 후 인장 및 압축 실험으로부터 기계적 성질 및 냉간 성형성을 평가하였다.

(1) 10% 신선 후 인장 강도는 가공 경화 현상으로 인해 크게 증가하나, 20% 이상에서는 인장 강도의 증가량이 줄어들었다. 한편 압축 강도는 가공 경화와 Bauschinger effect 로 인해 일정 변형을 이상에서는 비슷하거나 약간 감소하였다.

(2) 변형 저항성 측면에서의 냉간 성형성은 IcQ 강이 가장 우수하였고, 신선량이 증가함에 따라 변형 저항성이 감소하였다.

(3) 한계 성형을 측면에서의 냉간 성형성은 IcQ 강이 가장 우수하였고, 신선량이 증가함에 따라 한계 성형율이 감소하였다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 2003 년 국가지정연구실 사업과 포스코의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) G. Krauss and S.K. Banerji, 1987, "Fundamentals of Micro alloying Forging Steels", AIME, Warrendale.
- (2) D. J. Naylor, 1989, *Ironmaking & Steelmaking*, 16, p. 246.
- (3) 박경수, 박용규, 이덕락, 이종수, 2003, 한국소성가공학회지, 제 12 권, 제 4 호, p. 364.
- (4) B.P.P.A. Gouveia, J.M.L. Rodrigues and P.A.F. Martins, 2000, *J. Mater. Pro. Tech.*, 101, p. 52.
- (5) 이영선, 이정환, 이상용, 강종훈, 김주현, 1998, 소성가공학회, 춘계학술대회논문집, p. 224.
- (6) G. R. Speich, V.A. Demarest and R.L. Miller, 1981, *Metall. Trans.* 12A, p. 1419.
- (7) R. G. Davies, 1978, *Metall. Trans.*, 9A, p. 41.
- (8) N. J. Kim and G. Thomas, 1981, *Metall. Trans.*, 12A, p. 483.
- (9) C. Biselli and D. G. Morris, 1996, *Acta Metall.*, 44, p. 493.
- (10) S. N. Buckley and K. M. Entwistle, 1956, *Acta Metall.*, 4, p. 352
- (11) J. X. Dong, P. A. Karnezis, G. Durrant and B. Cantor, 1999, *Metall. Trans.*, 30A, p. 1341.