

펄라이트 함유강에서 연성에 영향을 미치는 미세조직 인자

심혜정* · 송형락* · 남원종*

(2004년 2월 11일 접수)

Microstructural Factors on Ductility in Steels containing Pearlite

H. J. Sim, H. L. Song and W. J. Nam

Abstract

The effect of transformation temperature on microstructural features and their effects on ductility in 0.55%C steels were investigated, compared with in 0.82%C eutectoid steel. The samples were austenitized at 1000°C for 30min. followed by quenching in a salt bath in the temperature range of 500 ~ 620°C. It was found that reduction of area(RA) increased with increasing transformation temperature and then, decreased after reaching its maximum value in steels containing pro-eutectoid ferrite less than 6%. The thickness of lamellar cementite was found to be the main factor controlling RA. Additionally, the presence of cementite thickness for the maximum ductility in all the tested steels was observed as about 0.015 μ m for tested steels.

Key Words : Cementite, Pearlite, Interlamellar Spacing, RA, Ductility

1. 서 론

최근 구조용 재료로 사용되고 있는 펄라이트 미세조직을 갖는 철강재료에 있어서, 친환경 재료의 개발 및 고강도화에 의한 경량화 등 산업환경의 변화에 따른 요구에 부응하기 위한 노력이 진행되고 있다. 고탄소 강선을 신선가공 하는 경우, 열간 압연한 선재로부터 최종 제품인 극세선을 제조하기 까지 신선 가공량이 매우 크므로 중간에 최소한 1-2회의 열처리(patenting)를 실시하여 신선된 소재에 연성을 부여하여야 지속적인 신선가공이 가능해진다. 한편 아공석강은 펄라이트로 구성된 공석강의 경우와는 달리, 미세조직이 페라이트와 펄라이트로 구성되어 있으며 연성이 뛰어난 페라이트의 역할로 연성이 공석강 보다 우수하

다 우수하다. 그러나, 신선가공과 같은 극심한 가공을 받는 경우에 있어서는 아공석강에 존재하는 페라이트와 펄라이트 계면이 크랙생성 장소로 작용하게 되어 파단의 원인이 될 수 있다. 이러한 경우 페라이트를 제거하고 미세조직이 펄라이트로 구성하게 되면 신선가공시 크랙생성 장소로 작용하는 페라이트/펄라이트 계면의 소멸로 신선가공 한계의 향상을 기대할 수 있다.

아공석강 중에서 탄소함량이 비교적 높은 경우는, 빠른 냉각속도 또는 낮은 온도에서의 항온변태를 이용하면 상변태 kinetics에 의해 전체가 펄라이트인 미세조직을 얻을 수 있다.⁽¹⁻⁷⁾ 일반적으로 공석 조성의 탄소량에서는 펄라이트 내의 층상 시멘타이트가 연속적으로 잘 발달하지만, 펄라이트 내의 탄소량이 적어지거나 비교적 저온에서

* 국민대학교 신소재공학부

상변태가 이루어지면 시멘타이트 형상이 불연속적인 형태를 나타내게 된다. 이러한 불연속적인 층상 구조를 갖는 펄라이트는 '유사 펄라이트 (degenerated pearlite)'라 불리우며 일반적으로 층상 펄라이트와 베이나이트의 중간 단계로 인식되고 있다. 이 미세조직은 탄소함량이 낮기 때문에 공석강에 비하여 펄라이트 내에 시멘타이트 분율의 감소로 강도 및 가공 경화율이 낮으나, 우수한 연성의 확보로 신선 중의 과단 발생이 지연되어 더 많은 신선 가공량의 확보가 가능하다. 이와 같은 장점을 갖는 유사 펄라이트를 아공석강에서 제조하기 위해서는, 연속냉각이나 항온변태 시 페라이트나 베이나이트의 생성 없이 모든 미세조직이 펄라이트로 구성되어야 하므로, 펄라이트가 형성되는 상변태 온도구간이 넓어야 한다. 따라서 소재의 경화능을 높이기 위해 가열온도를 높여 오스테나이트 입자경을 크게 하거나 합금원소 첨가에 의한 방법을 적용할 필요가 있다. 그러나, 소재의 경화능이 너무 커지면 베이나이트 발생이 용이하며 경화능이 작으면 페라이트가 잔존하게 되므로 적절한 화학성분과 열처리 온도의 선택이 요구된다.

본 연구에서는 0.55%C의 탄소함량을 갖는 아공석강을 기본 소재로 하여, 합금원소 및 상변태 온도 변화에 의한 소재의 페라이트 분율, 펄라이트의 층상간격 및 유사 펄라이트 발생 등 미세조직 변화를 분석하고, 이들 미세조직이 강도 및 연성 등 기계적 성질에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 실험 방법

본 실험에 사용된 소재는 Table 1과 같은 화학 조성을 갖는 소재로, 0.55%C를 함유한 탄소강을 기본재(steel A)로 하고, 합금성분 Cr를 첨가한 steel B, 비교재로서 공석강인 steel C의 3강종을 열간압연하여 냉각한 후, 절단하여 적절한 크기의 시편으로 가공하였다. 시편을 가열온도 1050°C로 30분 가열하였으며 상변태 온도를 500, 540, 580, 620°C로 변경하여 미세조직 변화와 기계적성질의 변화를 측정하였다.

기계적성질을 파악하기 위하여 인장 시험기를 이용하여 상온에서 3×10^{-3} /s의 초기 변형 속도로 인장 시험을 실시하였다. 한편 초석 페라이트의 분율 및 분포는 광학현미경 및 image analyzer를 이용하여 측정하였고, 펄라이트 층상간격은 주사

전자현미경(SEM) 하에서 시멘타이트가 수직으로 배열된 콜로니를 선택하여 linear intercept방법에 의하여 측정하였으며 시멘타이트의 두께는 아래의 O'Donnelly⁸⁾의 결과를 이용하여 계산하였다.

$t_c = (s_p / V_p) [(W_{cem} / \rho_{cem}) / (W_{cem} / \rho_{cem} + W_{fer} / \rho_{fer})]$
여기서, t_c 는 시멘타이트 두께, s_p 는 펄라이트 층상 간격, V_p 는 측정된 펄라이트 분율, W_{cem} 는 시멘타이트 무게분율이며 0.15*(wt%C)로 표현된다.

(wt%C)는 소재의 탄소함량을, ρ_{cem} 는 시멘타이트 밀도를 의미한다.

Table 1 Chemical compositions of steels

	(wt.%)					
	C	Mn	Si	Cr	S	P
Steel A	0.551	0.500	0.304	-	0.006	0.017
Steel B	0.550	0.496	0.303	0.198	0.006	0.010
Steel C	0.821	0.498	0.223	-	0.004	0.004

3. 결과 및 고찰

3.1 미세 조직

오스테나이트가 형성되는 온도인 1050°C로 가열한 후, 염욕에서 500, 540, 580, 620°C의 온도에서 항온변태를 실시한 소재의 미세조직은 소량의 초석 페라이트와 펄라이트로 구성되어 있다. Table 2에 측정된 합금원소 첨가에 따른 초석 페라이트 분율의 측정 결과를 나타내었다. 기본강인 steel A의 경우 상변태 온도의 증가에 따라 초석 페라이트의 분율이 1.4%로부터 5.2%로 증가하였고, 합금

Table 2 The volume fraction of pro-eutectoid ferrite

	(%)	
Trans. Temp	Steel A	Steel B
500°C	1.357	1.582
540°C	2.561	2.371
580°C	3.611	2.902
620°C	5.183	4.708

원소 Cr이 첨가된 steel B에서는 620° C의 높은 상변태 온도에서 초석 페라이트의 분율이 4.7%로 steel A에 비하여 작게 측정되었다. 이와 같은 합금원소 Cr 첨가에 의한 초석 페라이트 분율의 감소 경향은 Table 2에서와 같이 상변태 온도가 낮은 경우 현저히 관찰되지 않으나 상변태 온도가 높아지는 경우 뚜렷이 관찰된다. 이는 합금원소 Cr인 첨가된 강종인 steel B에서는, Cr의 오스테나이트로부터 상변태 지연 효과로 인하여 Cr이 첨가되지 않은 steel A에 비하여 경화능(hardenability)을 높이며 또한 합금원소 첨가에 의한 오스테나이트 입자 미세화 효과로 인하여 초석 페라이트 생성을 억제하는 경향이 크기 때문으로 사료된다.

한편 소재의 미세조직이 초석 페라이트와 펄라이트로 구성된 경우, Table 2에 나타낸 초석 페라이트에 탄소 고용량이 거의 없다고 보면 잔존하는 펄라이트에 함유 탄소량은 약 0.59%C가 된다. 따라서 오스테나이트로 가열 후 상변태에 의해 형성된 펄라이트의 대부분은 유사 펄라이트의 특성을 갖는다.

Fig. 1의 펄라이트 미세조직의 SEM 사진에서 볼 수 있듯이 일반적으로 잘 발달된 공석강의 펄라이트의 미세조직 사진과 유사한 형태를 가진다. 다만 관찰되는 펄라이트 내의 시멘타이트가 분절된 형태로 존재하는 것이 다를 뿐이다.

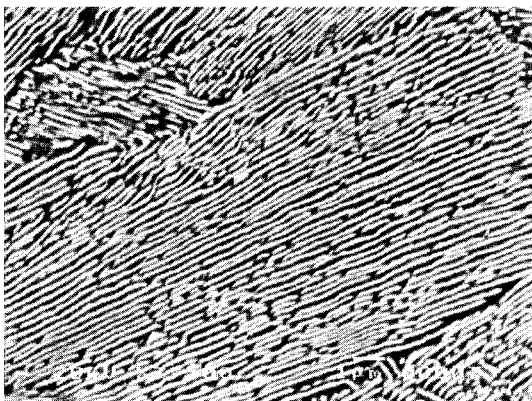


Fig. 1 SEM micrograph showing cementite lamellae of degenerated pearlite in steel B

Fig. 2에 상변태 온도에 따른 펄라이트 층상간격 변화를 나타내었다. 일반적으로 공석강에서는 아래의 식에서와 같이 펄라이트 층상간격이 과냉도

와 반비례하므로⁽⁹⁻¹¹⁾ 상변태 온도의 증가에 따라 펄라이트 층상간격이 증가한다.

$$s_p \propto 1/\Delta T$$

여기서 ΔT 는 상변태 온도와 공석온도의 차이를 의미한다.

아공석강에서는 상변태 온도의 증가에 따라 초석 페라이트 분율의 증가 및 펄라이트 분율의 감소가 발생한다. 따라서 초석 페라이트 분율의 증가 및 펄라이트 분율의 감소는 생성된 펄라이트 내의 탄소함량, 즉 시멘타이트 분율의 증가를 유도하여, 결과적으로 펄라이트 층상간격의 감소 효과를 유발한다. 이와 동시에 펄라이트에서는 상변태 온도의 상승에 따라 공석강에서와 같은 펄라이트 층상간격 증가 효과도 작용한다. Fig. 2에 나타난 결과는, 이 두 가지 상반된 효과 중 상변태 온도 상승에 의한 층상간격 조대화 효과가 펄라이트 탄소함량 증가에 의한 층상간격 미세화 효과 보다 더 크게 작용했음을 의미한다.

또한 Fig. 2로부터 합금원소 Cr의 첨가에 의한 ΔT 의 증가로 펄라이트 층상간격이 감소함을 알 수 있었다.

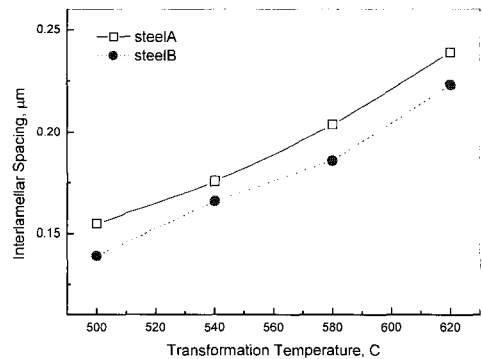


Fig. 2 The variation of interlamellar spacing with transformation temperature in hypo-eutectoid steels

신선 가공한 소재에 있어서 제조방법⁽¹²⁾ 초석 페라이트 분율 및 펄라이트 층상간격 이외에 소재의 기계적성질에 영향을 주는 소재의 미세조직 인자로서 펄라이트 내의 시멘타이트 두께를 들

수 있다. 시멘타이트 두께는 소재의 강도에는 크게 영향을 미치지 못하나 연성에는 직접적인 영향을 미치는 인자이다.

일반적으로 변형시 시멘타이트의 두께가 두꺼우면 파단이 발생하여 크랙의 생성 기점으로 작용하나, 시멘타이트의 두께가 얇은 경우는 변형시 시멘타이트가 상당히 소성변형하는 경향이 있다.⁽¹³⁾ 따라서 본 연구에서는 미세조직 인자 중 하나로서 시멘타이트 두께의 변화를 살펴보고자 한다.

시멘타이트의 두께는 나노급 사이즈로 직접적인 TEM 관찰에 의하여 두께를 측정하기에는 많은 오차가 발생한다. 따라서 시멘타이트 두께를 얻는 방법으로, 실험방법에 나타난 O'Donnely⁽⁸⁾의 식을 이용하면 펄라이트 내의 시멘타이트 두께를 계산할 수 있다. 이러한 방법으로 얻어진 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3 The lamellar spacing of the pearlite
(μm)

Trans. Temp	Steel A	Steel B
500°C	0.01298	0.01165
540°C	0.01492	0.01402
580°C	0.01748	0.01580
620°C	0.02082	0.01930

3.2 기계적성질

Fig. 3에 상변태 온도에 따른 인장강도 및 항복강도의 변화를 나타내었다. 인장강도와 항복강도 공히 상변태 온도의 증가에 따라 감소하는 일반적인 경향을 보이는데, 이는 상변태 온도 상승에 따른 초석 페라이트 분율의 증가와 펄라이트 층상간격의 조대화에 의한 것이다. 즉, 초석 페라이트와 펄라이트로 구성된 미세조직에서 강도가 낮은 미세조직적인 초석 페라이트 분율이 증가하게 되면 상대적으로 강도가 저하하게 된다.

또한 Hall-Petch식을 펄라이트 미세조직에 맞게 개조한 아래의 Embury-Fisher 식에 의하면, 층상간격의 증가는 소재 및 신선한 강선의 강도를 감소시킬 유발한다.

$$\sigma = \sigma_0 + [k / (2 s_p)^{1/2}] \cdot \exp(\varepsilon/4)$$

여기서, ε 는 신선 변형량을 k 는 Hall-Petch parameter를 의미한다. 이러한 복합적인 효과로 인하여 상변태 온도 상승에 따라 강도가 저하하는 현상이 발생하게 된다. 한편 강도에 미치는 합금 원소의 영향을 고찰하면, 인장강도의 경우 합금원소 Cr 첨가에 의한 펄라이트 층상간격 미세화로 강도 향상 효과가 뚜렷하게 관찰된다.

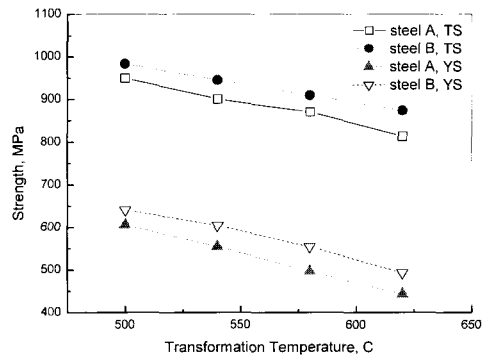


Fig. 3 The variations of tensile strength and yield strength with transformation temperature in hypo-eutectoid steels

일반적으로 펄라이트 강의 상온 연성은 오스테나이트 결정립도와⁽¹⁴⁻¹⁶⁾ 펄라이트 층상간격이 미세해지면 연성이 증가한다고 알려져 있다.⁽¹³⁻¹⁴⁾ 이때 펄라이트 층상간격은 균열 발생거동에 직접적으로 관련되며, 오스테나이트 결정립도는 균열 전파 거동에 영향을 미친다. 본 연구에서는 가열온도를 일정하게 유지하고 상변태 온도를 변화하였으므로 오스테나이트 결정립도의 연성에 대한 영향은 고려하지 않았다.

펄라이트 층상간격이 큰 소재에서는 전단에 의하여 시멘타이트에 공공(void)이 형성되나, 펄라이트 층상간격이 작은 소재에서는 시멘타이트의 소성변형 및 넉킹(necking)에 의해 공공이 형성되므로 소재의 연성 인자 중의 하나인 증가한다.⁽¹³⁻¹⁴⁾ 상변태 온도 변화에 따른 연성인 단면감소율(reduction of area, RA)의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 아공석강인 steel A와 steel B의 경우, 상변태 온도의 상승에 따라 단면감소율이 증가하여 특정 온도 구간에서 최대값을 보이며 그 이상의 상변

태 온도에서는 단면감소율이 감소하는 특이한 현상이 관찰되었다.

이러한 현상은 미세조직 인자 중, 소재의 연성을 증가시키는 초석 페라이트와 펄라이트의 층상간격의 영향 관점에서 분석할 수 있다. 상변태 온도가 상승하면, 초석 페라이트 분율의 증가에 따라 소재의 연성이 증가하는 경향을 보이는 반면 펄라이트의 층상간격이 조대화하면 소재의 연성이 감소하는 경향을 보인다. 이는 펄라이트 내의 시멘타이트 두께의 증가로 인한 시멘타이트의 소성가공 능력 저하로 크랙의 발생이 용이해지기 때문이다. 따라서 이 두 가지 인자의 복합 효과로 적정 상변태 온도 범위에서 단면감소율이 최대값을 나타낸다고 하겠다. 또한 합금원소가 단면감소율에 미치는 영향을 분석해보면, 합금원소 Cr이 첨가된 경우 단면감소율이 낮게 관찰되었으며 또한 단면감소율이 최대값을 나타내는 상변태 온도가 steel A에 비하여 상승하였다. 이 현상은 Cr을 첨가한 경우 상대적으로 초석 페라이트 분율이 작으므로 상변태 온도 변화에 따른 초석 페라이트 분율 변화가 단면감소율 변화에 크게 기여하지 못 했으며, 합금원소의 첨가에 의해 상변태시 형성된 펄라이트 내의 시멘타이트 두께의 변화에 의해 주로 영향을 받았기 때문으로 사료된다.

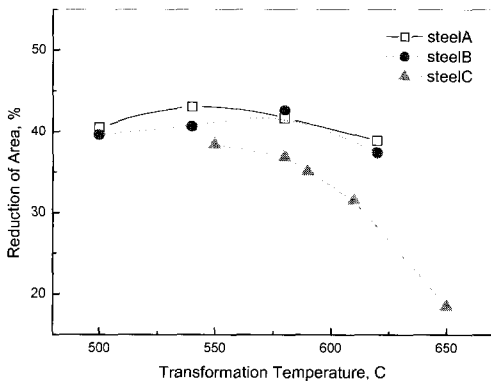


Fig. 4 The variations of RA with transformation temperature

공석강인 steel C의 경우, 상변태 온도의 감소에 따라 단면감소율이 일반적으로 증가하는 경향을 보인다. 따라서, 단면감소율과 상변태 온도와의 관계는 제조조건과 단면감소율의 관계를 잘 보여

주고는 있으나, 아공석강에서 초석 페라이트와 펄라이트 층상간격이 복합적으로 단면감소율에 영향을 주는 반면, 공석강에서는 펄라이트 층상간격만이 단면감소율을 지배하므로, 아공석강과 공석강에 공히 적용되는 단면감소율을 지배하는 미세조직 인자를 설명하기에는 다소 부족하다.

한편 초석 페라이트 분율이 5% 이하로 작은 경우, 펄라이트 층상간격이 소재의 연성과 직접적인 관련을 갖는다. 펄라이트 층상간격은 연성과의 관계에서 펄라이트 내의 시멘타이트 두께를 의미할 수도 있으며 또한 페라이트 두께를 의미할 수도 있다. 일반적으로 단면감소율에 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 미세조직 인자인 펄라이트 층상간격과 단면감소율의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 아공석강인 steel A와 steel B의 경우, 유사한 펄라이트 층상간격인 약 0.18 μ m에서 단면감소율의 최대값을 보이며 또한 각각의 층상간격 값에서 유사한 단면감소율을 보였다. 그러나 탄소함량이 다른 공석강인 steel C의 경우는 Fig. 4에서와 같이 아공석강의 경우와 다른 경향을 보였다.

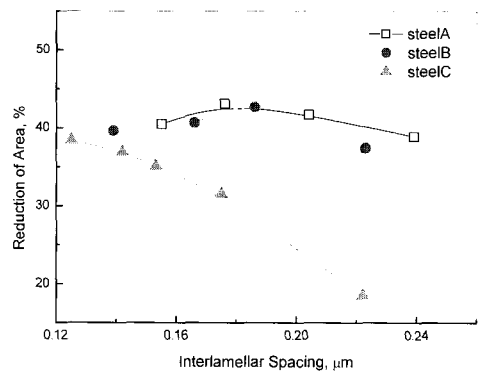


Fig. 5 The relationship between RA and interlamellar spacing in pearlite

미세조직 인자 중 펄라이트 내의 시멘타이트 두께와 단면감소율과의 관계를 고려해보면, Fig. 6에서 알 수 있듯이, 본 연구에서 사용된 아공석강 및 공석강의 모든 강이, 시멘타이트 두께의 증가에 따라 단면감소율이 증가하였다가 최대값을 보이고 다시 감소하는 경향을 보였다. 또한 각각의 시멘타이트 두께에서 유사한 단면감소율을 나타내었으며, 특히 단면감소율의 최대값을 나타내는

시멘타이트 두께는 약 $0.015\mu\text{m}$ 수준으로 Houin, et al⁽³⁾의 결과와도 잘 일치하였다.

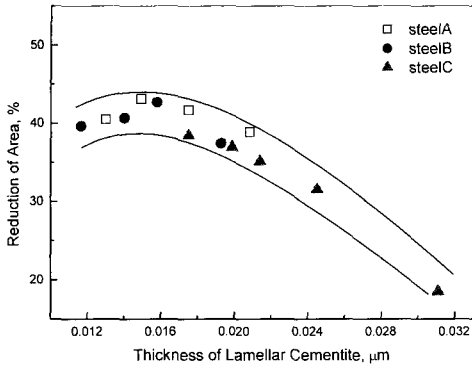


Fig. 6 The variations of RA as a function of the thickness of lamellar cementite in pearlite

따라서 펄라이트를 다량 함유한 강에서의 단면 감소율은 미세조직 인자 중 펄라이트 내의 시멘타이트 두께에 의해 가장 크게 영향을 받음을 알 수 있었다.

4. 결론

0.55%C의 탄소함량을 갖는 아공석강을 기본 소재로 하여, 합금원소 및 상변태 온도가 미세조직에 미치는 영향을 분석하고, 상변태 온도, 초석 페라이트 분율, 펄라이트 층상간격 및 시멘타이트의 두께 등 미세조직 인자가 소재의 단면감소율에 미치는 영향을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단면감소율은 상변태 온도 또는 펄라이트 층상간격이 증가함에 따라, 증가하다가 최대값을 형성하고 다시 감소하는 경향을 보였다. 그러나 미세조직 인자 중 초석 페라이트와 펄라이트 층상간격은 단면감소율과 직접적인 연관성을 보이지 못하였다.

(2) 미세조직 인자 중 펄라이트 내의 시멘타이트 두께는 아공석강과 공석강 범위에서 단면감소율에 직접적인 영향을 미치는 것이 관찰되었으며, 이때 최대 단면감소율을 보이는 시멘타이트 두께는 약 $0.015\mu\text{m}$ 로 관찰되었다.

후 기

본 연구는 에너지 관리공단의 학술진흥사업(2002-E-FM03-P-01)으로 지원되었으며, 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) E. C. Purcino and P. R. Cetlin., 1991, "Fracture mechanism of coarse pearlite/ferrite mixtures", Scripta Metall. Mater., Vol. 25, p. 167.
- (2) T. Inoue and S. Kinoshita., 1977, "Strain partitioning and void formation in ferrite-pearlite steels deformed in tension", Trans. ISIJ, Vol. 17, p. 245.
- (3) J. P. Houin, A. Simon and G. Beck., 1981, "Relationship between structure and mechanical properties of pearlite between 0.2% and 0.8%C", Trans. ISIJ, Vol. 21, p. 726.
- (4) C. M. Bae, C. S. Lee and W. J. Nam., 2002, "Effect of carbon content on mechanical properties of fully pearlitic steels", Mater. Sci. & Tech., Vol. 18, p. 1317.
- (5) E. V. Gregory and B. C. Muddle., 1995, Pro. Int. Conf. on Phase Transformations during the Thermal/Mechanical Processing of Steel, Vancouver, Canada, Aug., Canadian Inst. of mining, Metall. and Petroleum, Montreal, Canada, p. 81.
- (6) D. J. S. Cooksely, D. Munson, M. P. Wilkinson and A. Helliwell, 1964, Phil. Mag., Vol. 10, p. 745.
- (7) G. Birkbeck and T. C. Wells., 1968, Trans. AIME, Vol. 242, p. 2217.
- (8) O' Donnelly, B. E. Reuben, R. L. and T. N. Baker., 1984, "Quantitative assessment of strengthening parameters in ferrite-pearlite steels from microstructural measurements", Met. Tech., Vol. 11, p. 45.
- (9) J. W. Chan and W. C. Hagel., 1962, "Decomposition of Austenite by Diffusional Processes", edited by Zackay, V. F. and Aaronson, H. I., Interscience Publishers, NY, p. 131.
- (10) A. R. Marder and B. L. Bramfitt., 1975, Metall. Trans., Vol. 6A, p. 2009.
- (11) M. P. Puls and J. S. Kirkaldy., 1972, "The pearlite reaction", Metall. Trans., Vol. 3A, p. 2777.
- (12) J. W. Pilarczyk, H. Dyja., B. Golis and E. Tabuda., 1998, "Effect of roller die drawing on structure,

- texture and other properties of high carbon steel wires”, *Metals and Materials*, Vol. 4, p. 727.
- (13) L. E. Miller and G. C. Smith., 1970, “Tensile fracture in carbon steels”, *JISI*, Vol. 208, p. 998.
- (14) D. J. Alexander and I. M. Bernstein., 1982, “Cleavage fracture in pearlitic eutectoid steel”, *Metall. Trans.*, Vol. 13A, p. 1865.
- (15) J. J. Lewandowski and A. W. Thompson., 1986, “Effects of the prior austenite grain size on the ductility of fully pearlitic eutectoid steel”, *Metall. Trans.*, Vol. 17A, p. 462.
- (16) A. R. Rosenfield, G. T. Hahn and J. D. Embury., 1972, “Fracture of steels containing pearlite”, *Metall. Trans.*, Vol. 3A, p. 2797.