

## 펄스 자기장을 이용한 잔류 응력 완화 연구

오주숙\* · 양원준\*\*† · 이종훈\*\* · 박용호\*

\*부산대학교 재료공학과 재료연구소, \*\*한국기계연구원부설 재료연구소 첨단재료연구본부

### A Study on the Stress Relief by Pulse Magnetic Treatment

Ju Suk Oh\*, Won Jon Yang\*\*†, Jong Hoon Lee\*\*, Yong Ho Park\*

\*Material Science and Engineering, Pusan National Univ., Busan, 609-735, Korea

\*\*Korea Institute of Materials Science (KIMS), Changwon, 642-831, Korea

**Abstract** Residual stress relief by pulse magnetic treatment is attractive because the process is carried out at room temperature and magnetic fields that are easy to produce and control can be used. This study shows that strong pulse magnetic treatment can lead to stress relaxation of structural steels instead of a conventional heat treatment process. And it makes a comparative study about pulse magnetic treatment and tempering by using Larson-Miller equation. When the specimen was subjected to a pulse magnetic treatment process the residual stress in the specimen was reduced by about 13.8%. It could be compared with tempering at 200°C for 2 hours by using thermal effect of Larson-Miller equation. As a result, it is considered that the pulsed magnetic treatment have an effect of the stress relation by tempering at 200°C for 2 hours.

(Received February 7, 2011; Revised March 11, 2011; Accepted April 20, 2011)

**Key Words** : Pulse Magnetic Treatment, Stress Relief, Tempering Parameter

### 1. 서 론

금속재료의 펄스자기장처리(PMT, Pulse Magnetic Treatment) 기술은 펄스 형태의 강력한 자기장을 이용하므로 기존의 열적/기계적 공정과는 확연히 다른 형태의 공정으로 이를 이용한 다양한 형태의 연구가 진행 중이다[1, 2]. Yusef Fahmy는 항복 강도의 0.63배, 0.74배에 해당하는 응력 진폭으로 주기적인 하중이 가해지는 저탄소강에 PMT를 하면 균열 발생이 지연되어 피로 수명이 향상되었음을 밝혔고[3], Omar Bataineh는 드릴에 PMT를 하면 수명은 35.5% 증가하고, 마모율은 10% 감소하는 것으로 보고한바 있다[4]. 이러한 PMT에 의한 특성 변화는 부품 및 소재의 표면 특성의 변화에 기인한 것으로 특히 표면의 잔류 응력과 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다[3, 4].

일반적으로 잔류 응력은 인장압축 응력의 종류와 사용 목적에 따라 소재 및 정밀 기계 부품의 특성에 많은 영향을 미치므로 이에 관한 관리가 매우

중요하다. 그 중에서도 정밀 기계 부품의 시효 변형 문제에 있어서는 공정 중에 생성되는 잔류 응력의 제거가 중요한 공정으로 관심의 대상이 되고 있다. 하지만 기존의 잔류 응력 제거 방법 중 하나인 열처리 공정을 이용하여 응력을 제거하는 경우에 초정밀 부품에서는 표면의 변색이나 미세한 산화층의 생성 우려가 있고, 용점이 낮은 이종 금속이 접합되어 있는 경우에도 응력 제거 온도 설정에 어려움이 있을 수 있다. 또한 공정 시간이 길고 많은 에너지를 소모하며 공정이 복잡하다는 단점이 있어 적용에 어려움이 따른다[5]. 하지만 열처리를 이용한 잔류 응력 제거 공정을 대체할 만한 새로운 공정은 거의 전무한 실정이다.

PMT는 공정 시간이 짧고, 상온에서 이루어지는 공정으로 열처리에 따른 문제점이 없으므로 향후 열처리 공정을 대신 할 수 있다는 장점이 있다[6, 7]. 그러나 PMT를 이용한 재료의 표면 잔류 응력에 대한 정량적 평가 및 기존의 열처리 공정인 템퍼링과의 상관관계에 대한 연구가 부족하여 실제 응용에 어려움이 있다.

†E-mail : wjyang@kims.re.kr

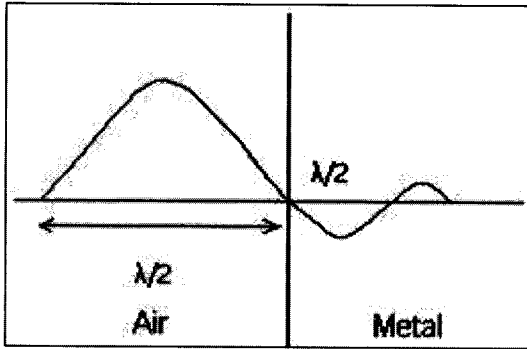


Fig. 1. The schematic penetration of flat electromagnetic wave into metal [8].

따라서 본 연구에서는 PMT에 의한 구조용 소재의 잔류 응력을 측정하고, 열처리시의 잔류 응력 거동과 비교 평가하여 실질적인 펄스 자기장 처리의 적용 가능성을 검토하고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 재료의 표면 특성에 영향을 미치는 펄스 자기장의 특성

모든 재료는 작업 온도에서 완전한 전도체가 아니므로, 재료에 PMT를 하면 전자기파가 재료 내부로 침투 할 때 금속 고유의 저항에 의해 재료의 표면이 예열(warm-up)되며, 특히 강자성 재료는 PMT로 재료의 미세구조 및 특성을 변화 시킬 수 있다.

Fig. 1은 전자기파가 공기 중에서 금속 내부로 침투하게 될 때의 형태를 도시한 것이다. 전자기파는 사인 곡선의 형태로 침투하며 진폭은 감소하여 금속 내부로 흡수되는 정량적인 에너지는 감소하게 된다.

금속으로 침투한 전자기파는 총 에너지의 87% 정도가 두께(skin depth, d)의 층(layer)에 흡수되어 재료의 기계적 특성에 영향을 주게 된다.

$$\frac{4\pi}{\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}} = \frac{2}{d} \tag{1}$$

- d: skin depth
- μ: magnetic conductivity
- ρ: resistivity
- f: oscillation frequency

Table 1. The depth of radiation penetration in copper as frequency of magnetic field[8]

Frequency, Hz	Depth of penetration in copper, mm
10 <sup>8</sup>	0.007
10 <sup>6</sup>	0.67
10 <sup>5</sup>	0.21
10 <sup>4</sup>	0.67
2 × 10 <sup>3</sup>	1.5
0.5 × 10 <sup>2</sup>	9.5

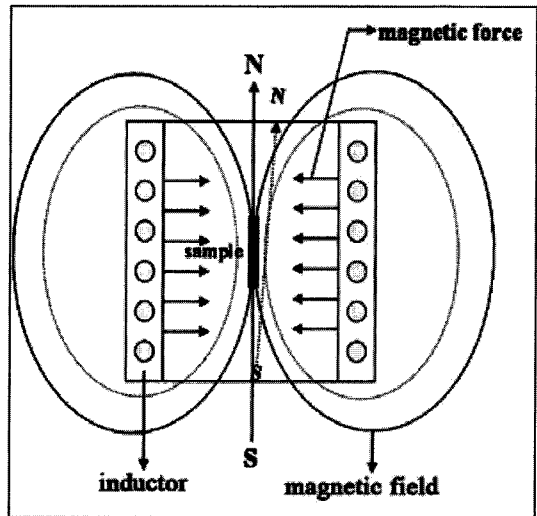


Fig. 2. Schematic diagram of device of pulse magnetic field.

식 (1)은 전자기파가 금속 내부로 침투하는 두께(d)와 전류의 진동 주파수(f)와의 관계이며, 전자기파가 침투하는 두께는 재료 및 진동 주파수에 의해 결정된다[8]. Table 1은 진동 주파수에 따라 copper 내부로 침투하는 자기장의 깊이를 계산하여 나타낸 것으로 식 (1)과 Table 1에서와 같이 진동 주파수와 두께는 반비례하므로 진동주파수가 커지면 펄스 자기장이 재료의 표면으로 침투하는 두께는 알아진다.

### 2.2 PMT를 위한 개략도

Fig. 2는 PMT를 적용하기 위한 장치 개략도이며, Fig. 3은 실제 시편이 인덕터에 장착 된 모습으로 시편은 자기장의 흐름에 영향을 미치지 않는 절연체를 이용하여 자기장이 집중되는 인덕터 중심에 위치할 수 있도록 장착하였다.

펄스 자기장은 축전기를 고전압으로 충전 시킨 후

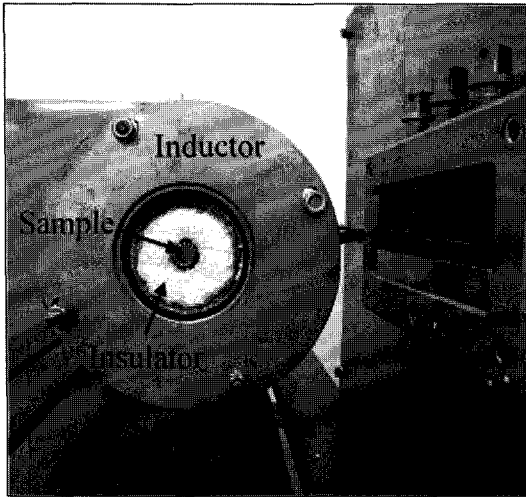


Fig. 3. Set-up for pulse magnetic treatment.

안정성 등이 있다. 그 중에서도 열처리 시간 및 온도는 잔류 응력 완화와 직접적으로 관련이 있으며, 잔류 응력 완화시의 열처리 온도와 시간은 일반적으로 Larson-Miller 식을 이용하여 식 (2)과 같이 표현된다.

$$\text{Thermal effect} = T(\log t + 20) \times 10^{-3} \quad (2)$$

T: temperature

t: time in hours

Fig. 4는 열처리 조건에 따른 잔류 응력 완화 거동을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 동일한 잔류 응력 완화 효과를 얻기 위해서는 열처리 온도가 높을수록 열처리 시간은 상대적으로 짧아진다[9].

### 3. 실험방법

#### 3.1 시편 제작

시험 소재는 기계 구조용 강으로 사용되는 S20C, 열간 금형 공구강으로 사용되는 SKD61, 항공기 부품 및 석유 화학 부품용 소재로 사용되는 17-4PH 그리고 기계 구조용 강으로 사용되는 S50C를 다양한 조건으로 가공하여 사용하였으며, 시편의 치수와 열처리 및 가공방법은 Table 2에 나타내었다. 또한 일부 시편에 응력을 가해주기 위해 임의로 압축 응력을 부과하여 응력 완화 효과를 확인하였다.

그리고 일반적으로 표면 잔류 응력 제거를 위해 실시하는 열처리 공정인 템퍼링 공정과 PMT 공정에 의한 잔류 응력 완화 효과를 직접적으로 비교해 보기 위하여 S40C 시편을 100°C, 200°C, 300°C에서 각각 1, 2, 4, 8시간 템퍼링 하였다.

#### 3.2 PMT 및 표면 잔류 응력 측정

PMT는 Fig. 2에서와 같이 펄스 자기장이 시편에 집중 될 수 있도록 인덕터 코일의 중심에 시편을 장착하여 시편의 두께 방향으로 자기장이 흐르게 하였다. 펄스 자기장 처리 조건은 3A의 전류 값에서 1wb의 자기선속과 50 Hz의 주파수로 10초 동안 처리하였으며, 50 Hz의 주파수에서 철강 재료에 자기장이 침투하는 깊이(skin depth)는 약 0.9mm 정도이다. PMT 횟수가 잔류 응력에 미치는 영향은

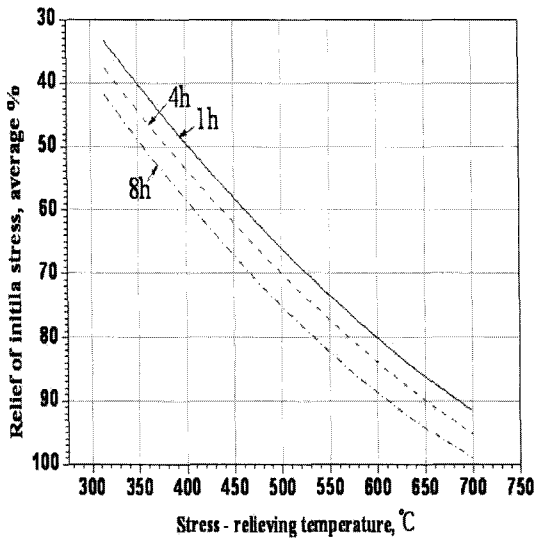


Fig. 4. Relationship between time and temperature in the relief of residual stresses in steel [9].

순간적으로 방전 시킬 때 인덕터에 큰 전류가 흐르면서 발생하는 것으로, 축전기의 충전과 방전에 의해 인덕터 코일 중심으로 형성된 강력한 자기장을 이용하여 시편의 기계적 특성을 변화시킬 수 있다.

#### 2.3 잔류 응력 완화에 영향을 미치는 열처리 공정

잔류 응력 완화에 영향을 미치는 변수는 초기 응력 값, 응력 완화 처리 시간, 열처리 온도, 금속학적

**Table 2.** Tested specimens on various conditions

Materials	Dimensions (mm)	Manufacturing process
S20C	20 × 105 × 3.4	30% compressed
SKD61	20 × 105 × 3.4	1025°C/1 h - water quenching, 600°C/2 h - tempering
17-4PH	20 × 105 × 3.4	-
S50C	20 × 105 × 3.4	740°C/8 h, 700°C/8 h, spheroidizing, forging
S40C	Ø 15 × 100	Tempering-12 conditions (100, 200, 300°C/1, 2, 4, 8 h)

알아볼 때에는 PMT 후 잔류 응력을 측정하고 다시 PMT를 하였다.

S20C는 1, 2, 4회 PMT하여 처리 전과 후에 잔류 응력을 측정하였고, SKD61, 17-4PH, S40C는 4~6회 연속적으로 PMT 하여 잔류 응력 거동을 살펴보았다.

잔류 응력 측정은 PMT 전과 후에 시편 표면부의 동일한 위치에서 Stress-Tech사의 Stress-X3000 장비로 X-ray 회절을 이용하여 29.2 kV, 6.66 mA의 조건에서 측정하였다.

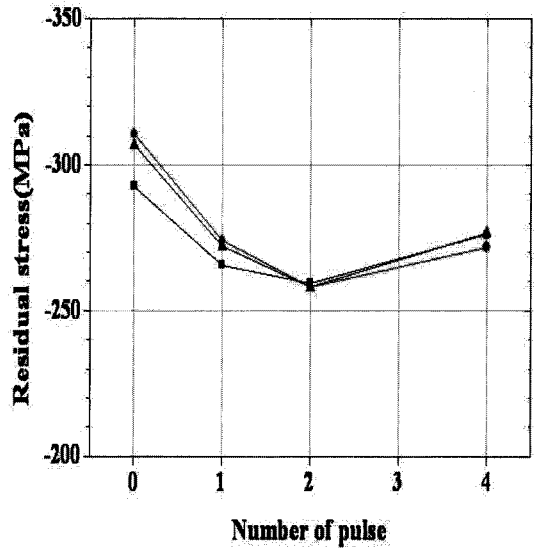
#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 펄스 자기장 처리에 따른 표면 잔류 응력 거동

먼저 PMT가 압축된 시편의 표면 잔류 응력 거동에 미치는 영향을 관찰하기 위해 S20C를 1, 2, 4회 펄스 자기장 처리하여 3곳의 잔류 응력을 측정하여 Fig. 5에 도시하였다.

S20C는 30% 압축에 의해 -293 ~ 310 MPa 정도의 압축 응력 값을 나타내고 있으며, PMT를 함으로써 표면의 잔류 응력이 감소하였다는 것을 나타낸다. S20C의 초기 잔류 응력 값과 PMT를 한 경우의 잔류 응력 값을 비교 해 보면 1회 펄스 자기장 처리로 11% 정도의 잔류 응력이 감소하였으며 2, 4회 처리를 하여도 대략 10~15% 정도의 잔류 응력이 감소한 것으로 보아 PMT 횟수에 따른 잔류 응력 거동은 크게 변화가 없으므로 PMT 횟수는 잔류 응력 거동에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 1~2회의 PMT로도 표면 잔류 응력 완화에 효과가 있는 것으로 판단된다.

PMT에 의한 표면 잔류 응력 완화 공정을 다양한 구조용 강재에 적용 해 보고자 구조용 강재로 널리



**Fig. 5.** Residual stress behaviors of the 30% compressed S20C steel by PMT process.

사용되는 SKD61, 17-4PH, S50C를 실험하였다. 그리고 S20C의 결과로부터 PMT 횟수가 표면의 잔류 응력 완화에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 나타나므로 SKD61, 17-4PH, S50C는 4~6회 연속적으로 PMT를 한 후 표면 잔류 응력 거동을 나타내었다. 그 결과는 Fig. 6에 도시하였다. 각각의 시편은 열처리 및 가공에 의해 모두 압축 응력 값을 나타내고 있으며, PMT 후에 초기 잔류 응력 값과 비교 하면 각각 34%, 23%, 29% 정도의 응력이 감소하였다.

따라서 잔류 응력 감소량에는 차이가 있지만 S20C의 결과와 같이 일반적인 구조용 강재에 PMT를 하면 잔류 응력 완화에 효과가 있는 것으로 판단된다.

이러한 자기장에 의한 잔류 응력 완화 메커니즘은 전위의 유동성과 관련이 있는 것으로 보인다. 결정립

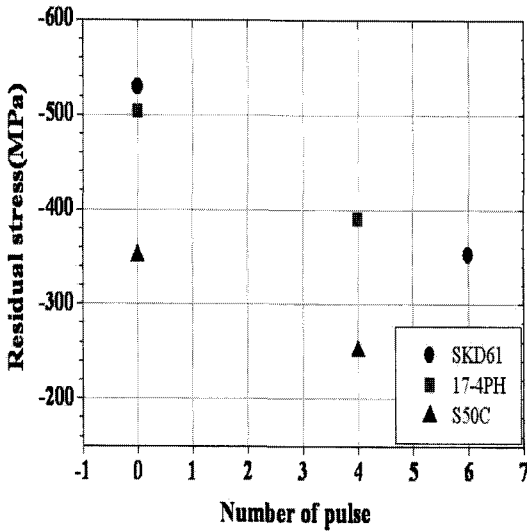


Fig. 6. Relationship between residual stress and number of pulses of PMT on the various steels.

게나 탄화물 주위는 전위가 집적되어 전위 밀도가 증가하므로 전위의 유동성을 감소시키게 되고[10], PMT를 하게 되면 전위와 탄화물의 결합 에너지를 감소시켜 전위와 탄화물의 분리 가속화로 표면 잔류 응력 거동에 영향을 주는 것으로 판단된다[11-12]. 또한 전위의 유동성이 증가하면 전위의 재배열에 의해 국부적인 소성 변형이 재료 전반에 걸쳐 산발적으로 일어나므로 재료 전반에 걸쳐 잔류 응력이 감소하는 것으로 사료되며, 이것은 열처리에 의한 응력 완화 메커니즘과는 다르다는 것을 의미 한다[13-16].

#### 4.2 PMT 와 템퍼링의 잔류 응력 완화 효과 비교 분석

PMT에 의한 잔류 응력 완화 효과와 일반적인 잔류 응력 완화 공정인 템퍼링에 의한 잔류 응력 완화 효과를 비교 분석 하기 위해 앞서 언급한 Larson-Miller 식을 이용하여 S40C의 템퍼링과 PMT에 따른 표면 잔류 응력 값과 thermal-effect 값을 Table 3에 나타내었다.

Fig. 7에 Table 3의 thermal-effect 값에 따른 잔류 응력 거동을 나타내었으며, PMT 시의 thermal-effect 값은 PMT 에 의한 잔류 응력 감소율을 구하여 Fig. 7의 템퍼링에 의한 잔류 응력 완화 곡선에 대입하여 구하였다. S40C를 펄스 자기장 처리하

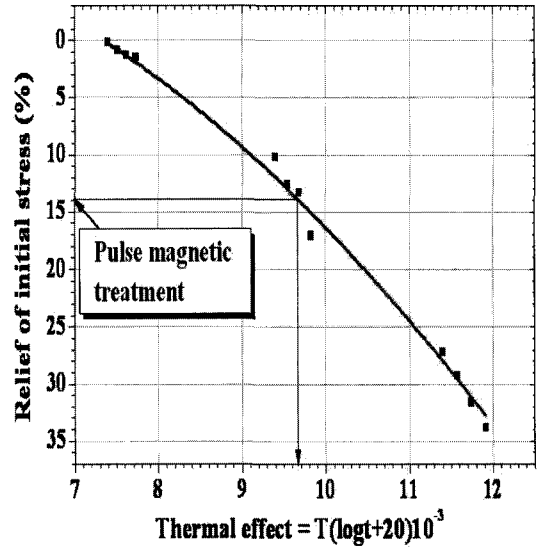


Fig. 7. Relationship between relief of initial stress and thermal effect.

여 처리 전과 후에 표면의 잔류 응력을 측정된 결과 대략 13.8%의 응력이 감소하였다. 이때 Fig. 7의 템퍼링 시의 잔류 응력 거동과 PMT에 의한 응력 감소율인 13.8%를 비교하면 PMT에 의한 응력 감소율의 thermal-effect 값은 약 9.6이 된다.

실제로 thermal-effect 값이 9.5와 9.7인 200°C에서 2, 4시간 템퍼링한 경우의 잔류 응력은 약 12.6%와 13.3% 감소하였으며, PMT로 13.8%의 응력이 감소하였으므로 PMT로 200°C에서 템퍼링 한 경우와 비슷한 응력 감소율을 나타내고 있다.

또한 PMT에 의한 응력 감소율로 구한 thermal-effect 값인 9.6과 200°C의 온도 값을 Larson-Miller 식에 대입하면 PMT로 200°C에서 2시간 템퍼링 했을 때와 같은 응력 완화 효과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

따라서 S40C를 PMT 한 경우 200°C에서 2시간 템퍼링 했을 때와 같은 응력 완화 효과를 볼 수 있으므로, 잔류 응력 완화는 PMT 기술을 이용하면 기존의 응력 완화 열처리 공정을 대체 할 수 있다는 가능성을 보여 주었다. 또한 정밀도가 중요하여 기존의 열처리 공정을 적용하는 것이 어려운 정밀 부품 및 코팅 층에도 PMT에 의한 잔류 응력 완화 공정의 적용 등 다양한 분야에 응용이 가능할 것으로 판단된다.

**Table 3.** Residual stress behaviors of S40C after and before PMT

Temp. (°C)	Time (hour)	Residual stress (MPa)			Thermal effect
		Before treatment	After treatment	Reduction of stress (%)	
100	1	-339.2	-338.9	0.1	7.4
100	2	-349.6	-346.4	0.9	7.5
100	4	-340.7	-336.4	1.3	7.6
100	8	-349.5	-344.3	1.5	7.7
200	1	-334.6	-300.6	10.2	9.4
200	2	-355.3	-310.5	12.6	9.5
200	4	-335.8	-291.2	13.3	9.7
200	8	-354.2	-293.6	17.1	9.8
300	1	-357.3	-260.1	27.2	11.4
300	2	-344.5	-243.4	29.3	11.6
300	4	-348.6	-238.5	31.6	11.7
300	8	-373.7	-247.3	33.8	11.9
PMT		-374.5	-322.8	13.8	9.6

## 5. 결 론

PMT를 이용한 잔류 응력 완화 연구에 대한 결론은 아래와 같다.

1. S20C는 PMT로 대략 10~15% 정도의 응력이 감소하였으며, PMT의 횟수는 잔류 응력 거동에 크게 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 따라서 1~2회의 PMT로도 잔류 응력 완화 효과가 있는 것으로 판단된다.

2. 다양한 조건으로 가공된 구조용 강재도 PMT가 잔류 응력의 완화에 효과가 있는 것으로 나타났다.

3. S40C를 PMT 및 기존 열처리 공정인 템퍼링에 따른 응력 완화 곡선과 비교하면 약 14% 정도의 응력이 감소하였으며, thermal-effect 값은 대략 9.6으로 200°C에서 2시간 템퍼링 했을 때와 같은 응력 완화 효과가 있음을 확인하였다. 따라서 PMT를 이용한 잔류 응력 완화 공정은 기존의 응력 완화 열처리 공정을 대체 할 수 있는 공정이라는 가능성을 보여주었다.

## 참고문헌

1. N. V. Kurlayer : Reduction of structural heterogeneities of materials of details at shock

- loading, Forging and Stamping, **26(7)** (2003) 35-40.
- G. Zdor, A. Anisovich and A. Yaskovich : Application of pulse magnetic field for increase of mechanical properties of alloys of nonferrous metals, Problem of mechanical engineering and reliability of machines (2004) 65-69.
- Y. Fahmy, T. Hare, R. Tooke and H. Conrad : Effects of a pulsed magnetic treatment on the fatigue and low carbon steel, Scripta Mater, **38(9)** (1998) 1355-1358.
- O. Bataineh, B. Klamecki and B. G. Koepke : Effect of pulsed magnetic treatment on the drill wear, J. Materials Processing Technology, **134** (2003) 190-196.
- X. J. Luo : Research on residual stress relieving in welded structure with magnetic field, M.Sc. Dissertation, Tsing Hua University, Beijing (1995).
- F. Tang, A. L. Lu, J. F. Mei, H. Z. Fang and X. J. Luo : Research on residual stress reduction by a low frequency alternating magnetic field, J. Materials Processing Technology, **74** (1998) 255-258.
- E. Barney and Klamecki : Residual stress reduction by pulsed magnetic treatment, J. Materials Processing Technology, **141** (2003) 385-394.
- E. I. Marukovich : Pulsed magnetic application for novel non-ferrous metals, Technical report of ITM at Belarus (2008) 13-15.
- Heat treatment, ASM Metals handbook, **4** (1991) 81-84.
- G. Tang, Z. Xu, M. Tang, X. Chen, H. Zhou and A. Lu : Effect of a pulsed magnetic treatment on the

- dislocation substructure of a commercial high strength steel, *Materials Science and Engineering A*, **398** (2005) 108-112.
11. M. I. Molotskii, R. E. Kris and V. Fleurov : *Phys. Rev.*, **B51** (1995) 2531.
  12. M. I. Molotskii and V. Fleurov : *Phys. Rev.*, **B52** (1995) 15829.
  13. C. Zhipeng, Z. Haiyan, L. Jian and L. Anli : Plastic deformation caused by pulsed magnetic treatment of mid-carbon steel, *Materials Science and Engineering A*, **458** (2007) 262-267.
  14. A. L. Lu, F. Tang, X. J. Luo, J. F. Mei and H. Z. Fang : Research on residual - stress reduction by strong pulsed magnetic treatment, *J. Materials Processing Technology*, **74** (1998) 259-262.
  15. A. F. sprecher, S. L. mannant and H. conrad : On the mechanisms for the electroplastic effect in metals, *Acta metal*, **34**(7) (1986) 1145-1162.
  16. S. Wu, A. Lu, H. Zhao, H. Fang and F. Tang : Micromechanism of residual stress reduction by low frequency alternating magnetic field treatment, *Materials Science and Engineering A*, **328** (2002) 133-136.