

쇼트피닝 가공한 스프링강의 고온 피로 파괴 특성에 관한 연구

박경동[†] · 신영진

부경대학교 기계공학부

(2005. 4. 7. 접수 / 2006. 5. 10. 채택)

Characteristics of High Temperature Fatigue Fracture in Spring Steels after Shot Peening

Keyung-Dong Park[†] · Yeong-Jin Shin

Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University

(Received April 7, 2005 / Accepted May 10, 2006)

Abstract : The lightness of components that was required in automobile and machinery industry requires high strength of components. In particular, manufacturing process and new materials development for solving the fatigue fracture problem attendant upon high strength of suspension of automobile are actively advanced. In this paper, the effect of compressive residual stress of spring steel(JISG SUP-9)by shot-peening on fatigue crack growth characteristics in high temperature(100℃, 150℃, 180℃)was investigated with considering fracture mechanics. So, we can obtain the followings.

(1) Compressive residual stress is decreased with increasing the test temperature.

(2) The effect of compressive residual stress on fatigue crack growth behavior in high temperature is increased below $\Delta K = 17 \sim 19 \text{MPa}\sqrt{m}$.

(3) It was investigated by SEM that the constraint of compress residual stress for plastic zone of fatigue crack tip was decreased in high temperature as compared with room temperature.

Key Words : compressive residual stress, fatigue crack propagation, spring steel, shot peened, striation

1. 서 론

실제 구조물이나 재료 내부에 존재하는 결함 부분에 반복하중이 작용하게 되면 피로로 축적되어 미세한 균열을 발생 또는 진전시켜 파괴로 이어지는 경우가 피로파괴의 일반적인 경우라 하겠다¹⁾. 쇼트피닝가공에 의해 금속 표면부에 형성된 압축잔류응력은 반복하중을 받는 금속표면부에서의 인장력과 상쇄되어 표면부에 걸리는 응력을 감소시키므로 표면부위의 피로균열의 개시를 지연시켜주고 균열의 안정성장을 지연시키는 역할을 한다. 이와 같은 피로수명을 향상하기 위한 연구가 최근 활발하게 이루어지고 있다^{2,3)}. 본 논문에서는 스프링강(JISG SUP-9)의 표면에 쇼트피닝 가공하여 형성된 압축잔류응력을 정성적으로 조사하고, 전기유압 서어보 피로시험기에서 고온 환경하의 피로균열진전거동에서의 피

로균열 안정성장구간과 피로균열진전이 정지되는 하한계응력확대계수를 측정하고 피로균열 진전 파면양상을 관찰하기로 한다.

2. 시험편 및 시험방법

2.1. 시험편

본 연구에서 사용된 시험편은 철도차량 및 자동차 현가장치에 주로 사용되어지고 있는 스프링강(JISG SUP-9)이며, 이 재료의 화학적 성분을 Table 1에 표시하였고, Table 2는 시험편 재료의 기계적 성질로서 Fig. 1과 같은 조건에서 열처리(Quenching & Tempering)한 후의 결과이다. 기계적 성질을 시험하기 위한 인장 시험편은 KSB-08의 규격4로 가공하였다.

피로균열 진전거동을 관찰하기 위한 CT시험편은 두께 12.5로 하였으며, 시험편의 채취는 열간 압연된 프랫바 상태에서 L-T방향으로 채취하였다. 한편 시험편의 열처리는 Fig. 1과 같은 조건으로 970℃에

[†] To whom correspondence should be addressed.
parkkd@pknu.ac.kr

서 20분간 가열한 후 유중에서 담금질하여 정상적인 마르텐사이트 조직이 형성되었고, 이 시험편을 다시 490℃에서 80분간 뜨임 하였으며, 정상적인 소르바이트 조직의 확인은 금속 현미경(Versmet-2)에서 400 배로 확대한 현미경 조직사진에 의하여 관찰되었다. 그리고 열처리된 시험편은 ASTM-95a 규정에 따라 가공하였고, 노치의 슬로터 가공은 와이어 커팅머신에 의하여 가공한 후 표면을 그라인딩 머신으로 연마하였다. 시험편의 형상과 치수는 Fig. 2와 같다.

Table 1. Chemical composition of specimen (wt%)

material	C	Si	Mn	P	S	Cr
JISG SUP-9	0.56	0.25	0.84	0.016	0.009	0.88

Table 2. Mechanical properties of specimen

material	Tensile strength (MPa)	Hardness(HrC)		Yield strength (MPa)
		After quenching	After tempering	
JISG SUP-9	1,226	55	47	1,079

Table 3. Condition of shot-peening

Impeller Diameter(mm)	Shot Velocity (m/sec)	Shot Diameter(mm)	Arc Height (mm)	Coverage(%)
490	70	0.85	0.49	0.95

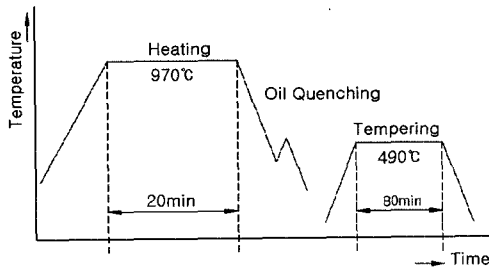


Fig. 1. Condition of heat-treatment.

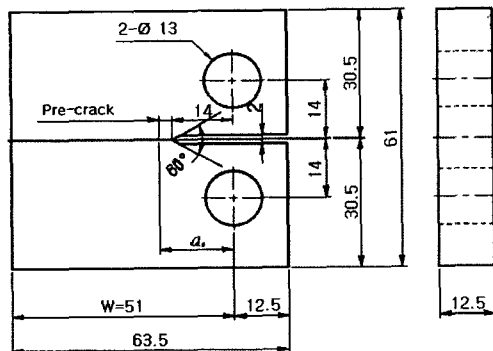


Fig. 2. Dimension of CT-specimen.

2.2. 시험방법

완성된 CT시험편의 피로진전실험은 전기유압서 어보 피로시험기(INSTRON 8501)에 의한 하중제어 방식으로 실험하였다. 적용하중파형은 정현파로 하고 적용 응력비는 R=0.3, 주파수는 10Hz로 하였으며 피로균열 길이측정은 크립게이지를 이용한 compliance법으로 ASTM E-647-95a 규정에 따라 상온환경(25℃)과 고온환경(100℃, 150℃, 180℃)에서 실험하였다.

시험편의 초기크랙은 초기응력확대계수범위 ΔK를 10MPa√m로 하여 초기 ΔK의 95% 범위 내에서 ΔK 증가법으로 진행하였고 초기크랙진전길이 3~5 mm 지점에서 다시 95%범위내의 ΔK 저감법으로 하여 피로균열 진전이 정지될 때까지 실험하였다. 본 실험에 적용된 응력확대계수 범위 ΔK의 계산식은 다음과 같다⁵⁾.

$$\Delta K = \frac{\Delta P \sqrt{a}}{BW} \left\{ 29.6 - 185.5 \left(\frac{a}{W} \right) + 655.7 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 1017.0 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 638.9 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right\} \quad (1)$$

여기서 ΔP는 하중중심에서의 균열길이, B는 시험편의 두께, W는 하중중심에서의 시험편 길이가 된다. 피로균열 진전과단면의 양상은 주사식 전자 현미경(SEM, HITACHI S-2150)으로 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 시험편의 압축잔류응력

시험편 표면에 형성된 압축잔류응력은 X-선 잔류응력측정장치(PIGAKU-MSF2M)를 이용하여 전해 연마기로 시험편의 측정 무위를 10~20μm단위로 연마하면서 2θ-Sin²φ 법으로 측정계산하여 Fig. 3에 나타내었다⁵⁾.

Fig. 3은 상온(25℃)에서의 압축잔류응력의 분포와 고온환경(100℃, 150℃, 180℃)에서 실험 후 변화된 압축잔류응력의 분포를 나타내고 있다. 여기서 압축잔류응력은 상온환경 735MPa에 비하여 100℃ 환경에서 41MPa(6%), 150℃ 환경에서 70MPa(10%), 180℃ 환경에서 85MPa(12%)가 소멸됨으로서 온도가 상승할수록 압축잔류응력은 소멸되는 것이 관찰되었다.

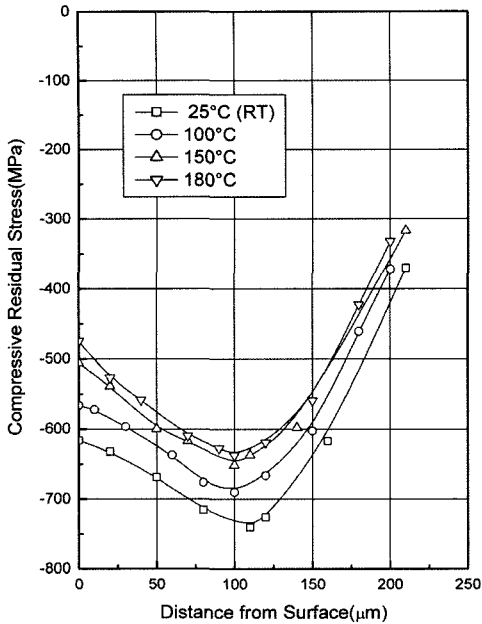


Fig. 3. Compressive residual stress distributions of specimen surface.

Table 4. da/dN at $\Delta K=10\text{MPa}\sqrt{m}$

Temp(°C)	Unpeening	Shot-peening
25°C	8.54×10^{-6}	4.11×10^{-6}
100°C	8.27×10^{-6}	5.82×10^{-6}
150°C	9.01×10^{-6}	6.14×10^{-6}
180°C	1.01×10^{-5}	6.30×10^{-6}

3.2. 피로크랙 진전거동

Fig. 4는 응력확대계수범위 ΔK 와 피로균열 진전 속도 da/dN 와의 관계이며, 여기서 응력비 $R(P_{min}/P_{max})$ 는 0.3이다.

피로균열 진전곡선에서 직선부분이 중간속도영역이며 피로균열진전이 정지되는 하한계응력확대계 범위는 수직선이 된다. 중간속도영역은 다음 식 (2)와 같다.

$$da / dN = C(\Delta K)^m \quad (2)$$

여기서 C 는 재료상수이며 m 은 피로균열진전지수가 된다⁶⁾. Table 4는 중간속도영역에서 응력확대계수범위 ΔK 와 피로균열 진전속도 da/dN 범위를 구하였다. $\Delta K=10\text{MPa}\sqrt{m}$ 일 때 언피닝 시편에 비하여 쇼트피닝 시편의 피로균열진전속도는 상온 25°C에서 52%, 100°C에서 30%, 150°C에서 32%, 180°C에서 38%가 감소되었다.

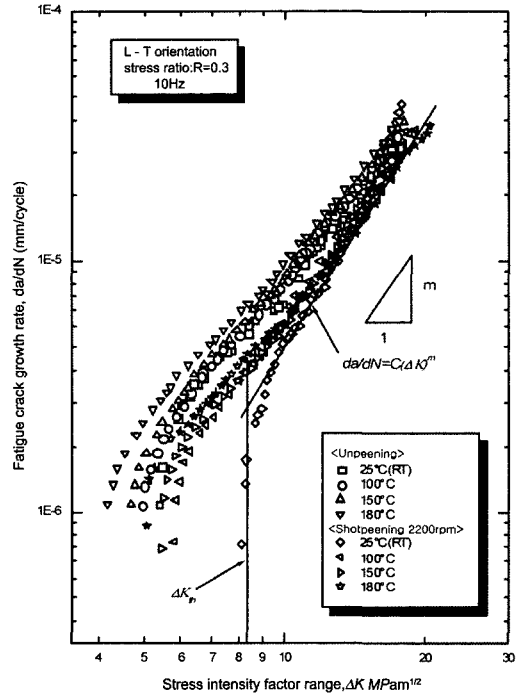


Fig. 4. Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range.

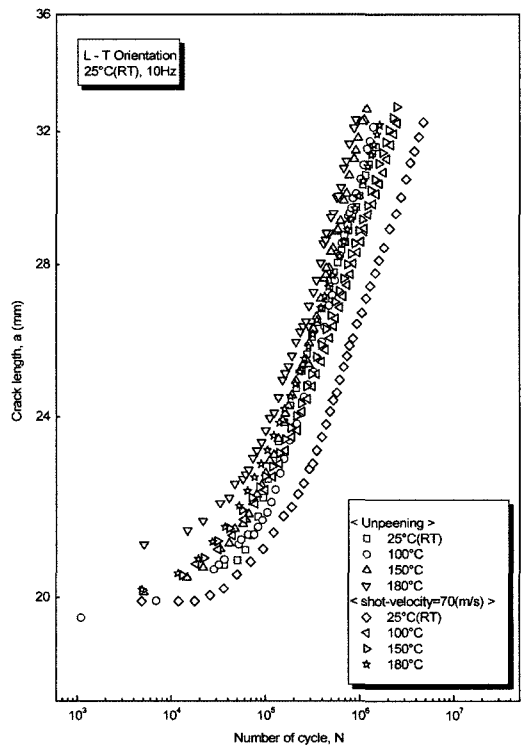


Fig. 5. Relation between crack length and number of cycles.

Table 5. Number cycle at the crack length of 28mm

Temp(°C)	Unpeening	Shot-peening
25°C	7.59×10^5	1.50×10^6
100°C	6.22×10^5	8.67×10^5
150°C	4.50×10^5	7.32×10^5
180°C	3.89×10^5	6.0×10^5

3.3. 고온에서 피로균열 길이와 사이클 수

Fig. 5는 균열진전길이 a와 하중가진 횟수 N과의 관계그래프이며, Table 5는 피로진전크랙길이 a=28mm에서 하중가진 횟수를 수치로 비교하였다. 피로수명은 쇼트피닝 시편이 언피닝재 시편보다 상온 25°C에서 98%, 100°C에서 39%, 150°C에서 63%, 180°C에서 54%가 증가되었다. 여기에 상온과 100°C사이에 압축잔류응력의 최대값이 급감하여 급속한 피로균열진전속도비를 보였으나 온도가 증가하는 구간에서는 균열진전 속도비가 완만한 감소현상과 피로균열선단 소성영역의 탄소성 변형기구의 작용으로 180°C의 수명이 100°C수명보다 동일 온도에서 증가된 것으로 판단된다.

3.4. c와 m의 온도에서의 의존성

Fig. 6은 C와 m의 관계그래프이다. Table 6에 고온에서의 C와 m값의 실측정치를 나타내었다. 100°C에서 온도에서의 의존성에 급격한 변화가 나타났다.

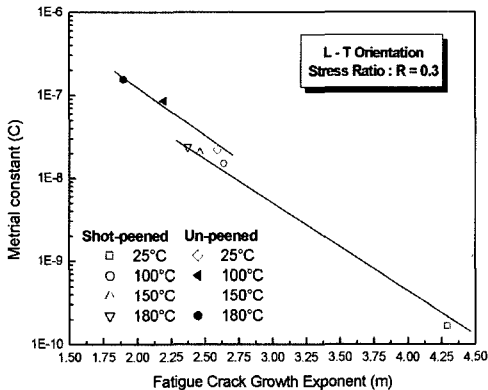


Fig. 6. Correlation between C and m in Paris Law $da/dN = C(\Delta K)^m$.

Table 6. A Material Constant and Fatigue crack growth exponent in high temperature

Temp(°C)	C	m
25°C	1.648×10^{-10}	4.289
100°C	1.501×10^{-8}	2.639
150°C	2.041×10^{-8}	2.462
180°C	2.371×10^{-8}	2.372

3.5. 피로균열진전파단면의 양상

CT 시험편의 피로균열진전 파면의 양상을 관찰하기 위해서 압축잔류응력이 부여되지 않은 언피닝 시편의 상온(25°C)실험 파단면과 본 실험의 쇼트피닝 가공된 시편에 대한 고온 환경 실험 파단면을 비교하였다. Fig. 7은 언피닝 시편의 상온환경 실험과 쇼트피닝 시편의 상온환경 실험 및 쇼트피닝 시편의 고온환경 실험에 대한 피로균열진전 파면의 실물사진과 균열선단표면부의 30배 확대 전자현미경 사진이다. 언피닝 시편의 파면과 쇼트피닝 시편의 파면 양상은 현저한 차이를 보이고 있으며, 이 현상은 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 피로균열진전 과정에서 균열선단 소성영역을 구속하므로 피로균열진전이 지연되는 현상을 관찰할 수 있으나 쇼트피닝 시편의 상온환경 피로균열진전 파면과 고온환경 피로균열진전 파면의 양상은 고온 환경 피로균열진전에서 균열선단 소성영역에 대한 구속력이 감소하고 있는 것이 균열선단 표면부에 관찰되었다⁷⁾. Fig. 8,

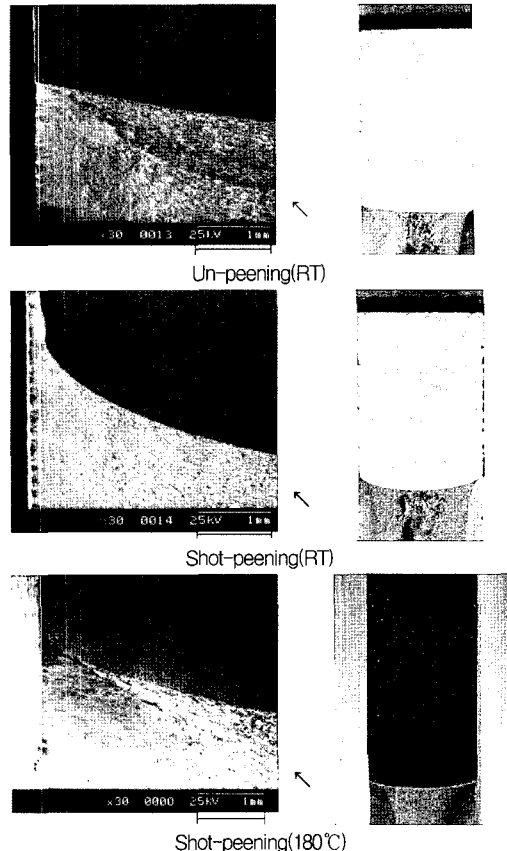


Fig. 7. Photographs and SEM Photographs of fracture surface.

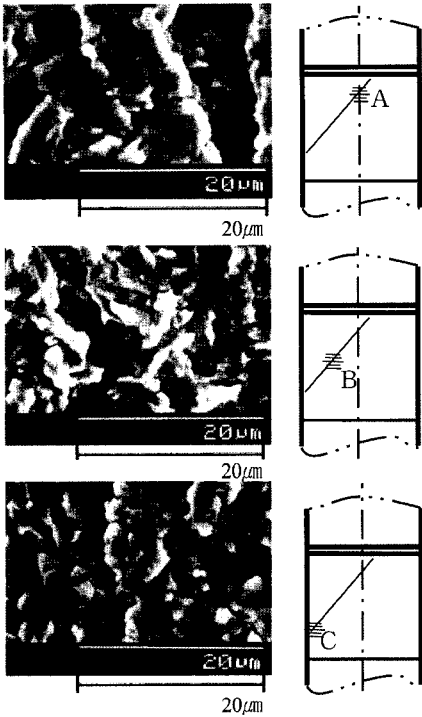


Fig. 8. Striation of fatigue crack propagation by SEM (Unpeening, RT).

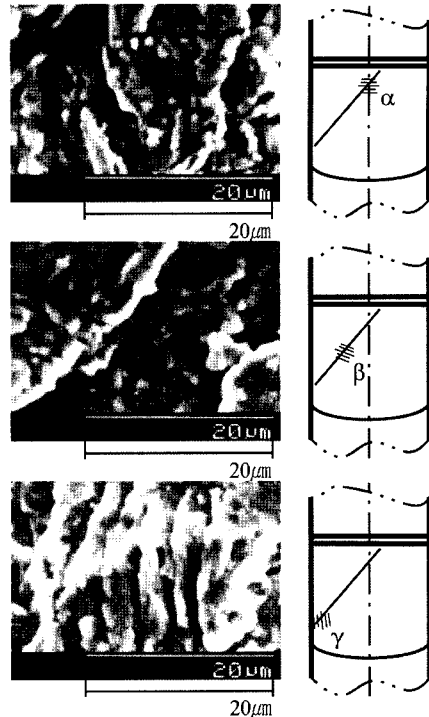


Fig. 10. Striation of fatigue crack propagation by SEM (Shot-peening, 180°C).

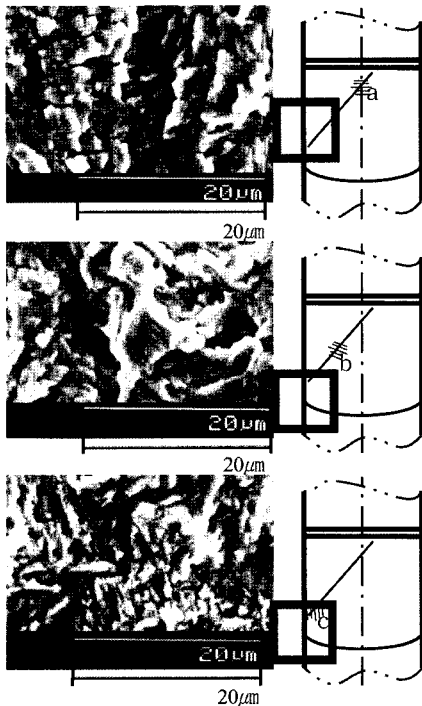


Fig. 9. Striation of fatigue crack propagation by SEM (Shot-peening, RT).

9, 10은 각 지점의 2000배 확대 사진으로서 각 지점의 파면양상을 미시적으로 관찰한 결과 시편표면부에 형성된 압축잔류응력은 피로균열진전 과정에서 균열선단 소성영역 중심부와 표면부의 스트라이에이션(Striation)방향형성에 현저한 차이가 있었다. 사진 옆의 그림들은 파단면을 미시적으로 관찰하기 위한 SEM사진의 촬영지점이다.

4. 결론

쇼트피닝 가공한 스프링강(JUSG SUP-9)의 압축 잔류응력이 고온환경에서 피로균열 진전거동에 미치는 영향을 조사하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1) 쇼트피닝재에서 압축잔류응력은 상온환경에서 735MPa, 100°C에서 694MPa, 150°C에서 665MPa, 180°C에서 650MPa로 고온환경에서 100°C에서 6%, 150°C에서 10%, 180°C에서 12%의 압축잔류응력이 소멸되었다.

2) 중간속도영역(Stage II)에서 $\Delta K=10\text{MPa}\sqrt{m}$ 일 때 언피닝재에 비하여 쇼트피닝재의 피로균열진전

속도는 상온 25℃에서 52%, 100℃에서 30%, 150℃에서 32%, 180℃에서 38%가 감소되었다.

3) 피로균열진전 표면을 주사식 전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과 피로균열 표면양상에서 상온환경에 비하여 고온환경 피로균열표면이 피로균열 선단의 소성영역에 대한 구속력을 감소시키는 양상이 관찰되었다.

4) 연피닝재에 비하여 쇼트피닝재의 피로수명이 상온 25℃에서 98%, 100℃ 39%, 150℃에서 63%, 180℃에서 54%가 증가되고 있다. 피로수명의 향상은 극 표면에 압축잔류응력이 생성되어 표면에서 균열선단을 구속하기 때문으로 판단된다.

참고문헌

- 1) O. Murakami, A Guide of Fracture Mechanics, pp. 121~127, O-Mu Company, 1979.
- 2) S. G. Jung, S. H. Lee, A guide of Shot peening Processing, pp. 6~12, Se-Hwa Pub., 2001.
- 3) R. D. Gillespie, "Its Effect on Process Consistency and Resultant Improvement in Fatigue Characteristics", Proc. of the 5th International Conference on Shot Peening, Vol. 1, Oxford, pp. 81~90, 1993.
- 4) H. Wohlfahrt, "The Influence of Peening Conditions on the Resulting Distribution of Residual Stress", Proc. of the 2nd International Conference on Shot Peening, Vol. 1, Chicago, pp. 316~331, 1984.
- 5) A. Tange, N. Takamura, "Relation Between Shot-peening Residual Stress Distribution and Fatigue Crack Propagation Life in Spring Steel", Proc. of the 4th International Conference on Shot-Peening, Vol. 1, Tokyo, pp. 243~253, 1990.
- 6) K. D. Park, "A Study of Crack tip Characteristics and Fatigue crack transition in High temperature in Low alloy steel for atomic reactor", Dong-a Uni. Thesis of doctorate, pp. 24~28, 1983.
- 7) J. Willenborg, R. M. Engle and H. A. Wood, "A Crack Growth Retardation Model Using and Effective Stress Concept", AFFDL-TM-71-1-FBR, 1971.