

잔류응력을 고려한 용접 이음부의 피로수명 평가 모델

구병춘[†], 양승용^{*}

Fatigue Life Evaluation of Welded Joints With Residual Stress

B. C. Goo, S. Y. Yang

Key Words: Fatigue Life (피로수명), Finite Element Analysis (유한요소해석), Nominal Stress (공칭응력), Residual Stress Relaxation (잔류응력 이완)

Abstract

According to our fatigue tests carried out at 20 Hz, $R=0.1$ on transversely butt-welded joints, fatigue strengths of as-welded specimens, that is, specimens having residual stress are higher than those of annealed specimens in short life range, but vice versa in long life range. This behavior seems to be concerned mainly with residual stress relaxation by applied loading. After analyzing the welding process, we conducted finite element analysis to quantify the degree of residual stress relaxation. By taking into account residual stress relaxation, modified Goodman diagram, and nominal stress, we evaluated the fatigue life of the welded joint from the S-N curve for the parent material. The estimated results are in a good agreement with the experimental results.

기호설명

E : 탄성계수

σ, ϵ : 국부 응력, 국부 변형률

S : 공칭응력

K_f : 피로노치계수

K_t : 응력집중계수

1. 서 론

잔류응력이 용접 이음부의 피로수명에 미치는 영향에 관한 많은 실험적, 해석적 연구에도 불구하고 아직 잔류응력의 효과가 명확히 설명되지 않고 있다. 어떤 연구에 의하면 잔류응력은 피로

수명을 연장하는 효과가 있고, 또 다른 연구는 피로수명을 단축하는 결과를 보여주거나 그 영향이 미미하다고 보고 되고 있다⁽¹⁾. 이러한 상반된 결론들은 작용하중에 의한 잔류응력의 완화 현상과 큰 관계가 있는 것으로 보인다. 용접에 의해 발생한 압축이나 인장 잔류응력이 작용하중, 균열의 진전 등에 의해 완화되거나 압축이 인장으로 혹은 인장이 압축으로 변화기도 하여 그 영향이 매우 복잡하다. Fig. 1은 SM 490 A 재료의 두께 10, 폭 25, 길이 100 mm인 두 판을 X형 맞대기 용접한 시편과 같은 사이즈의 모체에 대해 응력비 $R=0.1$ 에서 시험한 피로선도이다. Fig. 2는 X형 맞대기 용접시편에 대해 600°C에서 약 3시간 동안 용접후열처리를 한 시편과 하지 않은 시편에 대한 피로선도이다. Fig 2에서 보면 약 2×10^5 사이클 이하에서는 용접후열처리를 한 시편의 수명이 짧고 2×10^5 사이클 이상에서는 더 길다. 이와 같이 용접 잔류응력은 작용하는 외력의 크기에 따라 일정 사이클을 기준으로 피로강도를 증가시키거나 감소시키는 효과가 있다.

[†] 한국철도기술연구원 차량기계연구본부

E-mail : bcgoo@krri.re.kr

TEL : (031) 460-5243 FAX : (031) 460-5289

^{*} 한국철도기술연구원 차량기계연구본부

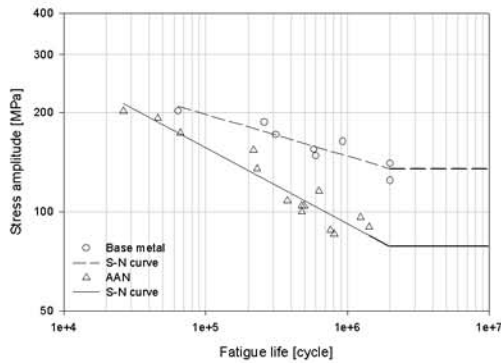


Fig. 1 Base material and as-welded

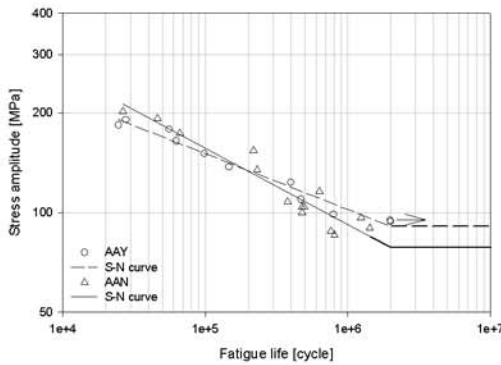


Fig. 2 Annealed and not annealed

잔류응력이 피로거동에 미치는 영향을 고려하기 위해서 국부변형률을 이용한 수명예측은 Reemsnyder⁽²⁾, Lawrence⁽³⁾, Seeger⁽⁴⁾ 등에 의해 각각 아래와 같은 식 (1), (2), (3)이 사용되었다.

$$\sigma_{\max} \epsilon_{\max} = \frac{1}{E} \left(\frac{K_f S_{\max}}{1 - \sigma_{r_{\text{res}}}/\sigma_{\max}} \right)^2 \quad (1)$$

$$\sigma_{\max} \epsilon_{\max} = \frac{(K_f S_{\max} + \sigma_{r_{\text{res}}})^2}{E} \quad (2)$$

$$\sigma_{\max} \epsilon_{\max} = \frac{(K_f S_{\max})^2}{E} + \frac{\sigma_{\max} \sigma_{r_{\text{res}}}}{E} \quad (3)$$

식 (1), (2), (3)은 외력이 작용하여 최대값 S_{\max} 에 도달할 때의 국부응력과 국부변형률을 계산하는데 필요한 식이다. 하중이 최대점에서 줄어드는 경우에는 최소 국부변형률 σ_{\min} 과 국부응력 ϵ_{\min} 은 아래 식 (4)를 이용하여 구할 수 있다.

$$\sigma_{\min} \epsilon_{\min} = \frac{(K_f \Delta S)^2}{E} \quad (4)$$

이러한 국부변형률을 이용한 수명예측은 설계자들이 사용하기에 매우 복잡하여 공칭응력을 사용한 수명예측에 잔류응력을 고려하는 방법의 개발이 요구되고 있다. 본 연구에서는 잔류응력을 고려하면서 공칭응력을 이용하는 간단한 수명평가 모델을 제시하고 이 모델을 이용하여 용접후열처리를 한 시편과 하지 않은 시편의 피로수명을 모재의 S-N 곡선으로부터 예측하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 잔류응력을 고려한 수명예측 방법

2.1 잔류응력, 노치 및 후열처리의 영향

Fig. 3은 잔류응력, 노치 및 용접후열처리가 피로거동에 미치는 영향을 도식적으로 표현한 그래프이다.

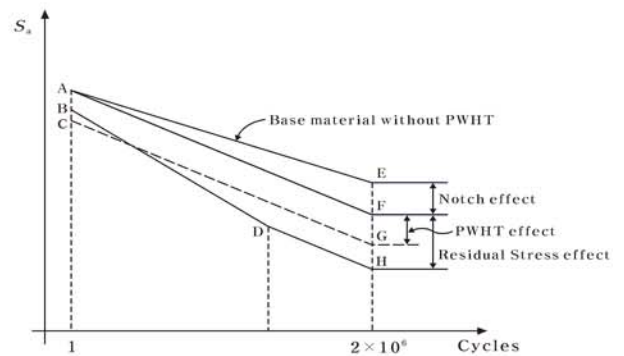


Fig. 3 Effect of residual stress and notch

피로 선도 AE는 후열처리를 하지 않은 모재의 S-N 선도이다. 2×10^6 사이클에서의 모재의 피로강도는 S_f 이다. 피로 선도 AF는 용접 이음부의 노치효과를 고려한 S-N 선도이다, 피로강도는 모재의 피로강도를 피로노치계수 K_f 로 나눈 S_f/K_f 이 되고 한 사이클에서의 피로강도는 모재와 동일하다고 가정하고 점 A와 F를 연결하여 피로선도를 얻는다. 선 CG는 용접 비드와 같은 노치를 갖는 모재를 후열처리 하는 경우의 피로 선도이다. 용접된 부품이나 부재의 잔류응력을 제거하기 위하여 후열처리를 하는 경우 조직의 경도, 항복강도, 인장강도는 낮아지고 피로강도도 낮아

진다. 후열처리를 하면 인장 잔류응력이 완화되어 피로강도가 증가할 수 있지만 선 CG에서는 개념상 잔류응력은 고려하지 않고 열처리에 의한 조직의 변화가 피로강도에 미치는 영향만 고려하고 잔류응력은 따로 고려한다. 선 BDH는 용접에 의한 잔류응력의 영향과 후열처리의 효과를 모두 고려한 S-N 선도이다. 용접에 의해 노치부에 인장 잔류응력이 작용하는 경우 노치효과를 고려한 S-N 선도 AF에서 추가로 잔류응력에 의해 피로강도는 FH만큼 낮아지고 S-N 선도는 BDH로 표현할 수 있다. 잔류응력이 피로에 미치는 영향은 D점을 기준으로 그 크기가 달라진다. D점은 작용응력의 최대값 S_{max} 와 잔류응력의 초기값 $\sigma_{r_{ini}}$ 의 합이 재료의 항복응력 S_y 와 같아지는 점이다. 작용응력의 최대값 S_{max} 와 잔류응력 $\sigma_{r_{ini}}$ 의 합이 재료의 항복응력보다 작은 DH 구간에서는 잔류응력은 평균응력으로 작용하여 피로강도를 낮추게 된다. BD 구간에서는 $(S_{max} + \sigma_{r_{ini}})$ 가 재료의 항복응력보다 크므로 국부적으로 재료는 소성변형을 하게 되고 초기 잔류응력 $\sigma_{r_{ini}}$ 은 이완되어 잔류응력의 크기가 감소한다.

2.2 피로수명 예측 절차

유한요소법을 적용하면 용접에 의한 잔류응력의 초기값과 외력에 의한 잔류응력의 완화를 쉽게 구할 수 있다. 용접 공정에 대한 온도해석을 수행하고 온도를 이용하여 탄소성 구조해석을 수행하면 용접에 의한 잔류응력을 구할 수 있다. 해석 기술이 상당히 진보되어 실험값에 근사한 예측값을 얻을 수 있다. 이렇게 얻은 잔류응력을 초기값으로 하여 일정 크기의 외력을 가하여 외력에 의한 잔류응력의 이완을 해석하면 외력의 크기에 대한 잔류응력의 이완정도를 정량적으로 평가할 수 있다. 잔류응력의 이완 정도는 작용 사이클에도 관계하나 첫 번째 사이클에서 대부분 감소하고 그 이후의 사이클에서는 매우 완만히 감소한다. 간단히 $(S_{max} + \sigma_{r_{ini}}) / S_y$ 의 크기에 대수 함수적으로 감소하고 작용 사이클의 수에는 지수 함수의 형태를 취한다고 가정하면 N 번째 사이클의 외력이 작용한 후 남은 잔류응력 σ_r 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_r = \sigma_{r_{ini}} [1 - k_1 \ln(\frac{S_{max} + \sigma_{r_{ini}}}{S_y})] e^{\frac{-N}{N+k_2}} \quad (5)$$

여기서 k_1, k_2, k_3 는 이완의 정도를 나타내는 상수이다.

모재의 피로선도는 아래와 같은 Basquin의 식으로 표현된다.

$$S_a = AN^m \quad (6)$$

잔류응력을 고려한 노치재의 수명예측은 유한요소 해석을 통하여 응력집중계수와 피로노치계수를 구하여 잔류응력을 고려하지 않은 노치재의 피로선도 (Fig. 1의 AF 선)를 구한다. 2백만 사이클에서의 피로한도는 식 (7)의 수정 Goodman 식으로 구하고 한 사이클에서의 피로강도는 모재와 같다고 가정한다

$$\frac{S_a}{S_f/K_f} + \frac{S_{mean}}{S_u} = 1 \quad (7)$$

용접부의 수명평가에서 피로노치계수 K_f 는 Peterson의 식과 Neuber의 식이 주로 활용되는데 두 값은 큰 차이가 없다. R=-1에서 얻어진 Neuber의 피로노치계수 K_f 는 다음과 같이 주어진다⁽⁵⁾.

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) = \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{\rho/r}} \quad (8)$$

여기서 노치 민감도 $q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} = \frac{1}{1 + \sqrt{\rho/r}}$, r =노치 뿌리에서의 반경, K_t =응력집중계수, ρ 는 재료에 의존하는 재료의 특성 길이로 그래프의 형태로 주어진다.

한편 Peterson의 피로노치계수 K_f 는 다음과 같이 주어진다⁽⁵⁾.

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) = \frac{K_t - 1}{1 + a/r} \quad (9)$$

여기서 $a = 0.0254 \left(\frac{2070}{S_u} \right)^{1.8}$ 는 재료에 의존하는 특성 길이로 경험적으로 얻어진 식이다.

위에서 구한 2백만 사이클에서의 피로한도와

모재에 대한 Basquin의 식으로부터 노치재에 대한 Basquin의 식을 구할 수 있다 (Fig. 3의 선 A-F).

$$S_a = A_1 N^{m_1} \quad (10)$$

응력집중계수를 구하기 위해 사용한 유한요소 모델을 이용하여 탄소성 해석을 수행하여 잔류응력의 완화량을 계산하고 수정 Goodman 식을 이용하여 남은 잔류응력 σ_r 을 평균응력으로 고려한다. Fig. 3의 점 F에 해당하는 공칭응력이 작용할 때 완화 후의 잔류응력 값을 σ_F 라 하면 2백만 사이클에서의 노치재의 피로한도 S_f'' (Fig. 3의 H)는 식 (11)의 수정 Goodman 식에 의해 계산된다.

$$\frac{S_f''}{S_f'} + \frac{(S_{mean} + \sigma_F)}{S_u} = 1 \quad (10)$$

여기서 S_f' (Fig. 3의 F)는 잔류응력을 고려하지 않은 노치재의 피로한도이다. 잔류응력을 고려한 노치재의 피로선도는 Fig. 3에서 피로한도인 점 H에서 시작하여 $(S_{max} + \sigma_{r_{inc}}) \leq \sigma_y$ 인 H-D 구간에서는 잔류응력을 고려하지 않은 노치재의 피로선도인 라인 A-F에 평행하게 되고, $(S_{max} + \sigma_{r_{inc}}) > \sigma_y$ 가 되는 구간 B-D에서는 임의의 S_a 에 해당하는 최대하중 S_{max} 에서 구한 남은 잔류응력을 σ_r' 라 하면 아래의 수정 Goodman 식 (12)를 이용하여 S_f''' 를 구한다.

$$\frac{S_f'''}{S_f'} + \frac{(S_{mean} + \sigma_r')}{S_u} = 1 \quad (12)$$

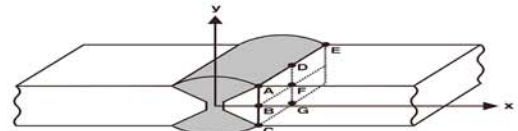
B-D 구간에서 수명 N 에서의 피로강도는 A-F 라인에서 $(S_f' - S_f''')$ 만큼 작은 값이 된다. 계산의 단순화를 위해 B-D 구간을 가장 간단한 직선으로 근사하는 경우 A점에서의 피로강도 S_B 를 구하여 S_B 와 S_D 를 직선으로 이어 잔류응력을 고려한 노치재의 피로선도 B-D-H를 간단히 구할 수도 있다.

한편 용접부의 조직변화에 기인하는 효과가 미미하지 않는 경우는 열처리 전후 피로 거동에 대한 데이터로부터 쉽게 고려할 수도 있다.

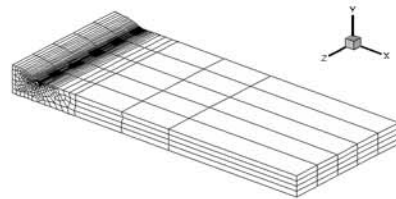
3. 맞대기 용접부 수명 예측

3.1 용접 공정 해석

Fig. 4는 100×30×10인 SM 490 A 두 개의 판을 X 형 맞대기 용접한 시편에 대해 용접에 의한 잔류응력을 해석하기 위한 유한요소 모델이다. 대칭성을 고려하여 1/4만 해석대상으로 취하였다. $r=2$ mm, $\theta=21^\circ$, $h=1.64$ mm이다. ABAQUS 코드를 이용하였으며 해석에 사용한 용접조건은 Table 1과 같고 각종 변수들의 값은 Fig. 5와 같다. $K_F=1.6$, $K_{F'}=1.46$ (Equ. 8), 1.52 (Equ. 9)가 얻어진다.



(a) Butt welded specimen

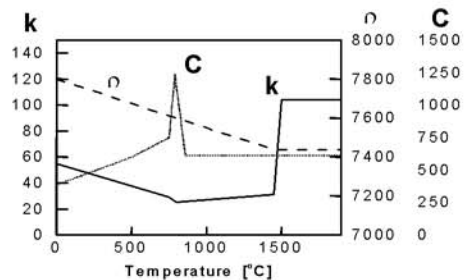


(b) Finite element model

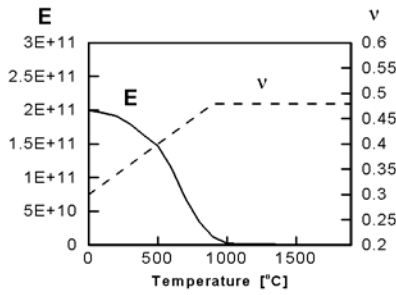
Fig 4. Finite element model for welding analysis

Table 1 Welding conditions

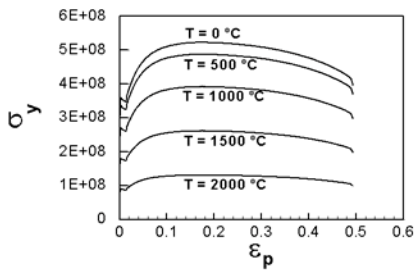
열 유입량	130x10 ⁶ J/m ³ s
용접 속도	4 mm/s
용접 비드 온도	2000 °C



(a) Conductivity k , density ρ , specific heat C



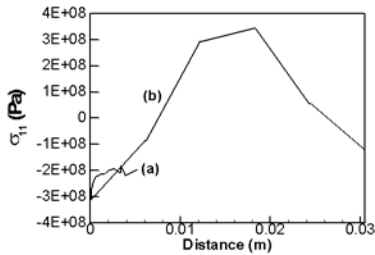
(b) Young's modulus E , Poisson's ratio ν



(c) Yield strength

Fig 5. Parameters used in the analyses

Fig. 6은 Fig. 4의 A-B 선과 A-E 선을 따라 그린 σ_{11} 의 분포이다.



(a) σ_{11} along line A-B (b) σ_{11} along line A-E

Fig 6. Residual stress σ_{11} along line A-B and A-E

A점에서는 $\sigma_{11}=-337$ MPa로 압축 잔류응력이, D 점에서 $\sigma_{11}=415$ MPa로 인장 잔류응력이 생성되었다.

3.2 잔류응력 이완 해석

앞 절에서 구한 용접에 의한 잔류응력과 변형률을 초기조건으로 하여 실제 피로시험에서와 같은 외력을 가하여 잔류응력의 완화현상을 탄소성

유한요소법을 적용하여 해석하였다. Fig. 7은 작용 외력에 따라 A 점과 D 점에서의 잔류응력의 완화를 보여준다. A 점의 압축 잔류응력은 작용 응력 $S_{max}=300$ MPa까지 그 절대 크기가 점점 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보인다. 한편 폭의 중심점 D에서는 거의 선형적으로 감소하고 있다.

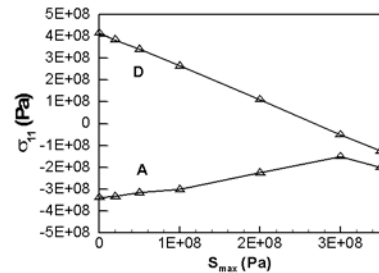
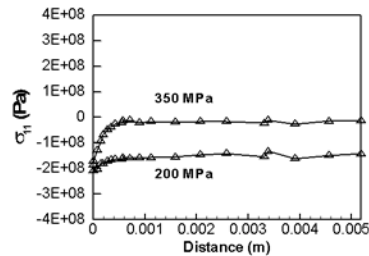
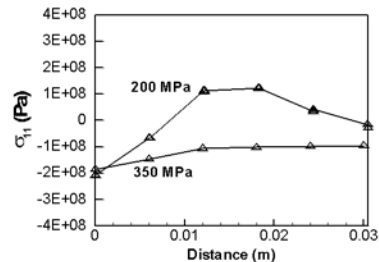


Fig. 7 Residual stress relaxation

Fig. 8은 외력 $S_{max}=200, 350$ MPa일 때 A-B 선과 A-E 선을 따라 재 분포된 σ_{11} 를 보여준다.



(a) σ_{11} along line A-B

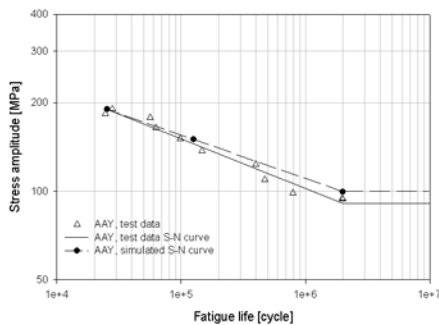


(b) σ_{11} along line A-E

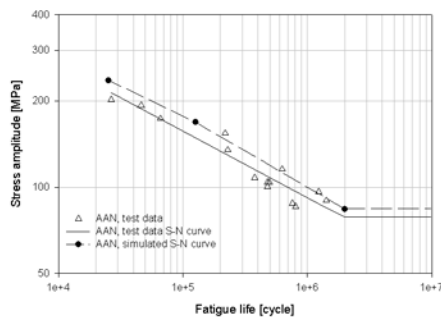
Fig. 8 Residual stress σ_{11} redistribution

3.2 맞대기 용접 이음부 수명 예측

2 절에서 기술한 수명평가 절차에 따라 용접후 열처리를 하지 않은 시편 (AAN 시편)과 후열처리를 한 시편 (AAY 시편)의 피로수명을 $K_f=1.52$ 를 이용하여 예측하여 실험값과 비교하였다 (fig. 9). 특별한 파라미터의 조작 없이도 시험수명을 잘 예측한다.



(a) AAY



(b) AAN

Fig. 9 Fatigue life evaluation

4. 결론

본 연구에서는 잔류응력과 노치효과를 고려하면서 공칭응력을 이용한 피로수명평가 방법을 제시하였다. 용접잔류응력과 잔류응력의 완화는 탄소성 유한요소해석을 통하여 구하였다. 모델을 적용하여 실제 실험결과와 비교하였다. 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

1) 용접에 의한 잔류응력은 시편 폭의 중심부 표면에서 최대로 415 MPa의 인장 잔류응력이 발생하였고 가장자리에서는 -337 MPa의 압축잔류응력이 발생하였다.

2) 용접에 의한 잔류응력과 변형률을 초기조건으로 하여 외력을 작용하는 경우 시편 폭의 중심부 표면의 최대 인장 잔류응력 415 MPa은 외력의 크기에 거의 선형적으로 비례하면서 감소하다가 압축 잔류응력으로 변화하였다.

3) 시편 폭의 가장자리 표면에서 발생한 압축 잔류응력은 그 절대값이 감소하다가 다시 커지는 경향이 있다. 압축 잔류응력이 인장 잔류응력으로 변화하지는 않았다.

4) 본 연구에서 제안한 방법으로 용접후열처리를 한 시편과 하지 않은 시편에 대해 수명예측을 하여 시험수명과 비교한 결과 그 경향이 잘 일치하고 수명도 매우 근접하여 본 방법의 유용성을 확인할 수 있었다.

5) 국부 변형률을 이용한 방법에 비해 공칭응력을 이용한 본 방법은 간단하여 향후 다른 유형의 용접 이음부의 수명평가에도 유용한 도구가 될 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업(NRL)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) M. Takashi, K. Iida, 2001, "Relaxation of welding residual stresses by reversed and repeated loadings," Japanese Welding Society, Vol. 19, No. 1, pp. 129-139.
- (2) H. Reemsnyder, 1981, "Experimentation and design in fatigue," pp. 273-295.
- (3) F. Lawrence, J. Burk, Y. Yung, 1982, "ASTM STP 776, pp. 33-43.
- (4) M. Vormwalt, T. Seeger, 1987, "Residual stresses in Science and Technology," pp. 743-750.
- (5) R. I. Stephens, A. fatemi, R. R. Stephens, H. O. Fuchs, 2001, John Wiley & Sons, Inc., pp. 196-205.