

화력발전소 증기터빈용 12Cr 강의 저주기 피로거동

강명수*

Low Cycle Fatigue Behavior of 12Cr Steel for Thermal Power Plant Steam Turbine

Myung Soo Kang*

ABSTRACT

In this study low cycle fatigue (LCF) behavior of 12Cr steel at high temperature are described. Secondly, comparisons between predicted lives and experimental lives are made for the several sample life prediction models. Two minute hold period in either tension or compression reduce the number of cycles to failure by about a factor of two. Twenty minute hold periods in compression lead to shorter lives than 2 minute hold periods in compression. Experiments showed that life predictions from classical phenomenological models have limitations. More LCF experiments should be pursued to gain understanding of the physical damage mechanisms and to allow the development of physically-based models which can enhance the accuracy of the predictions of components. From a design point-of-view, life prediction has been judged acceptable for these particular loading conditions but extrapolations to thermo-mechanical fatigue loading, for example, require more sophisticated models including physical damage mechanisms.

Key Words : Low cycle fatigue(저주기피로), Life prediction(수명예측), Hold period(하중 유지시간), Damage mechanism(손상기구), Life prediction model(수명예측 모델)

1. 서론

최근 계속되는 전력수요의 증가에 따라 신규 전원 개발이 요구되고 있으나 발전소 건설비의 상승과 투자재원의 부족, 입지, 환경 문제 등으로 어려움이 있어 발전소의 장수명화가 절실히 요구된다. 선진 공업국에서는 대부분의 발전소 및 석유화학 공장들의 사용 기간이 오래되어 설계수명을 넘겨서 사용되고 있으며, 설비의 운전 기간을 연장하는 장

수명화 및 고온피로거동에 대한 많은 연구가 수행되었으며, 국내에서도 활발한 연구가 진행되고 있다.^{(1)~(6)} 이러한 설비의 수명을 연장하는 장수명화에서는 정확한 손상기구를 평가하고, 주요한 손상거동에 대한 평가 및 대책 수립이 매우 중요하다. 그리고, 고온고압에서 운전되고 있는 화력발전소의 운전조건이 점점 가혹한 상황에 놓여 있는 실정이고, 이러한 가혹 환경에 있는 화력발전소에서는 터빈 로터, 터빈 블레이드, 터빈 케이싱 등과

** 2001년 12월 24일 접수

* 한국전력공사 전력연구원

같은 핵심설비에서 피로, 크리프, 열피로 손상 등을 초래하게 된다. 1970년대 이래로 터빈의 중요 부품에서 발생한 파손사고가 보고되어 왔는데, 이들 파손 사고는 주로 저주기피로(low cycle fatigue)와 소성변형(plastic bending)에 의한 사고이었다.

따라서 본 연구에서는 증기터빈용으로 주로 사용되고 있는 12Cr 강을 사용하여 재료가 받을 수 있는 조건과 유사한 조건에서 저주기 피로시험을 수행하여 12Cr 강의 기초적 피로거동을 규명하고 장차 터빈 주요부품의 수명을 평가·예측하는데 도움이 되고자 한다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험재료

12Cr 강은 일반적으로 석유화학 플랜트, 증기터빈 블레이드, 터빈 로타, 터빈 디스크, 항공기 구조용 재료로 널리 사용되고 있는 재질로 고온에서의 강도가 우수한 재질이다. 12Cr 강은 고온에서 강도와 연성, 인성 등의 복합적 조건에 있어서 우수한 재질로 인정을 받아 사용 중에 있다.

Table 1 Chemical composition of the 12Cr steel

C	Cr	Mn	Si	Ni	Mo	Ti	V	S	Cu	Fe
0.18	11.1	0.71	0.47	0.39	0.75	0.01	0.17	0.01	0.01	bal

Table 2 Mechanical properties of the test material

Mechanical properties	524 °C
Elastic modulus (GPa)	150
Yield strength(0.2% offset) (MPa)	571
Ultimate strength (MPa)	650
Hardness, Rockwell B scale (HR)	108

본 연구에 사용된 12Cr 강은 기존 화력발전소 증기터빈용으로 사용하던 1Cr-1Mo-1/4V 강 보다 고온에서의 항복강도를 비롯한 각종 기계적 성질이 뛰어나고 장시간 크리프 강도가 향상되도록 제작된 증기터빈용 재질을 사용하였다. 그 화학적 조성 및 기계적 성질은 Table 1, 2와 같다.

2.2 실험방법

실험에 사용된 시험편의 형상은 표점거리가 0.5inch(12.7mm)이고 직경이 0.3inch(7.62mm)인 봉상(cylindrical specimen)이다. 실험장치는 10kip MTS 시험기로서 TestStar control 프로그램을 사용하여 변형률제어 피로시험을 수행하였다. 시험편의 가열을 위하여 2.5kW 용량의 유도가열기(induction heater)를 사용하였고, 강제 냉각장치는 사용하지 않았다. 총변형은 수정봉(quartz rods)을 이용한 변형률 측정기(extensometer)를 사용하여 표점거리(0.5inch)내의 변형을 측정하였다.

모든 저주기 피로시험 온도는 975°F(524°C)로 변형률제어 하에서 수행하였으며, 5가지 실험종류를 선정하였다: (1) 일정 유지시간이 없는 연속 피로시험(continuous cycling with no hold time, CC type), (2) 최대 인장응력에서 2분 유지시간을 가해준 경우(with 2 minute hold at tension, HT type), (3) 최대 압축응력에서 2분 유지시간을 가해준 경우(with 2 minute hold at compression, HC type), (4) 최대 인장응력과 압축응력에서 각각 2분 유지시간을 가해준 경우(with 2 minute hold periods in both tension and compression, HTC type), (5) 최대 압축응력에서 20분 유지시간을 가해준 경우(with 20 minute hold at compression, HC20 type).

모든 실험에서 변형률비(strain ratio, $R = -1$)를 동일하게 하였고, 변형률속도(strain rate)는 $\dot{\epsilon} = 0.005 \text{ s}^{-1}$ 로 일정하게 유지하였다. 변형률진폭(strain amplitude)은 1%, 0.5%, 0.4%에서 각각 수행하였고, 응력, 변형률, 변위 등은 컴퓨터에 연속적으로 기록되었다. 12Cr 강에 대한 저주기피로 실험조건은 Table 3에 표시하였다.

3. 실험결과

3.1 하중조건별 피로수명

각 작용하중별 저주기 피로실험 결과를 피로

Table 3 LCF test conditions for 12Cr steel

Specimen No.	Strain amplitude	Hold time	Strain ratio	Strain rate
CC10	1.0 %	None	-1	0.005s ⁻¹
CC05	0.5 %			
CC04	0.4 %			
HT10	1.0 %	2 min at Tension		
HT05	0.5 %			
HT04	0.4 %			
HC10	1.0 %	2 min at Compression		
HC05	0.5 %			
HC04	0.4 %			
HTC10	1.0 %	2 min at Tension and Compression		
HTC05	0.5 %			
HC2010	1.0 %	20 min at Compression		

수명과 총변형률 범위의 향으로 Fig. 1에 표시하였다. 저주기 피로시험 과정에서 최대 인장응력이 연속적으로 강하하는 현상이 발생하여 피로수명을 정의하는데 어려움이 있었으므로 히스테리시스 루프의 최대 인장응력이 준 안정상태에서의 최대 인장응력의 70 퍼센트를 나타낼 때까지의 반복수를 피로수명으로 정의하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 최대 인장응력과 최대 압축응력에서의 일정 유지시간은 피로수명에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 즉, HT 하중조건과 HC 하중조건의 피로수명은 CC 하중조건에서의 피로수명보다 짧음을 알 수 있다. HT 형의 경우 변형률 범위가 높은(0.02%) 곳에서의 피로수명은 CC 형의 수명과 거의 동일하지만, 변형률 범위가 낮은(0.01%, 0.008%) 곳에서의 피로수명은 CC 형의 수명보다 29~40% 짧게 나타났다. HC 형의 경우 변형률 범위가 낮은(0.01%, 0.008%) 곳에서의 피로수명은 CC 형의 피로수명 보다 44~55% 짧았다. 최대 인장응력과 최대 압축응력에서 모두 2분간 유지시간을 가해준 HTC 형의 경우는 HT 형과 CT 형의 수명보다 더 짧게 나타났다. 또한, 최대 압축응력에서 20분간 유지시간을 가해준 HC20 형의 경우도 HC 형의 수명보다 짧게 나타났다.

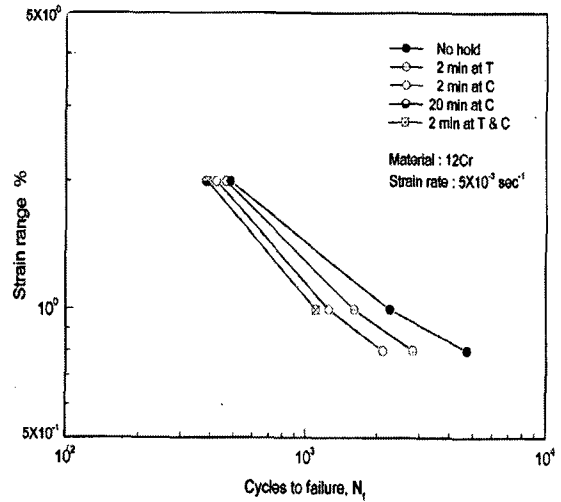


Fig. 1 Comparison of the LCF life with hold and no hold in a strain range versus cycles to failure diagram

실험결과가 충분하지 않아서 전반적인 경향을 정확하게 파악하기는 어렵지만, 이러한 실험결과로부터 유지시간은 피로수명에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 즉, 최대 인장응력이나 최대 압축응력에서의 일정 유지시간을 가해준 경우 유지시간이 없는 경우보다 피로수명이 짧았고, 최대 압축응력에서 20분 유지시간을 가해준 경우의 피로수명은 2분 유지시간을 가해준 경우의 수명보다 짧음을 알 수 있었다.

3.2 파단면 상태의 분석

하중의 작용형태에 따른 피로파단면의 형상과 특성을 관찰하기 위하여 주사전자현미경을 이용하여 파면을 고찰하였다.

Fig. 2에 나타나 있는 사진은 500배의 배율로 촬영한 파단면 사진으로 저주기 피로균열 전파시 자주 관찰되는 파단면에 관한 미세조직 사진이다. Fig. 2 (a) 사진은 유지시간이 없는 CC형의 경우에 대한 사진인데, 반복적인 사이클에 의한 피로파면의 전형적인 형상인 줄무늬의 스트라이에이션(striation)을 관찰할 수 있으며, 입내형의 파괴 양상이 지배적임을 알 수 있다. 이것은 반복수에 의존하는 피로의 특성을 말해주는 것으로 CC형은 반복수에 의존하는 피로파괴라고 생각된다.

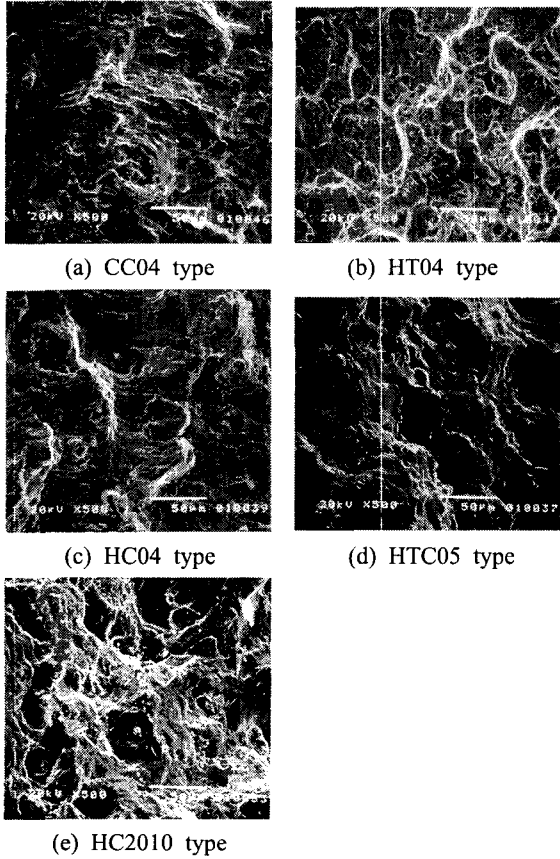


Fig. 2 SEM photographs showing typical fracture surface with different loading conditions (X500)

Fig. 2 (a) 사진은 유지시간이 없는 CC형의 경우에 대한 사진인데, 반복적인 사이클에 의한 피로파면의 전형적인 형상인 줄무늬의 스트라이에이션(striation)을 관찰할 수 있으며, 입내형의 파괴 양상이 지배적임을 알 수 있다. 이것은 반복수에 의존하는 피로의 특성을 말해주는 것으로 CC형은 반복수에 의존하는 피로파괴라고 생각된다.

Fig. 2 (b) 사진은 최대 인장응력에서 2분간 유지시간을 준 HT형에 대한 사진인데, 피로파괴의 파면형태인 스트라이에이션은 발견할 수 없으나 부분적으로 입자가 뜯겨져 나간 흔적을 볼 수 있고, 입자사이의 경사면에 입계균열이 일부 존재하고 있어 균열이 입계로 성장하여 파단되었음을 알 수 있다. Fig. 2 (c) 사진은 최대 압축응력에서 2분간 유지시간을 준 HC형에 대한 사진인데, 부분적으로 평탄

한 파면위에 연성 스트라이에이션을 관찰할 수 있으며, 입내형의 파괴 양상이 우세함을 알 수 있다. Fig. 2 (d) 사진은 최대 인장응력과 최대 압축응력에서 각각 2분간 유지시간을 준 HTC형에 대한 사진인데, 입자가 뜯겨져 나간 흔적을 볼 수 있으며, 입자사이의 경사면에 스트라이에이션과 함께 입계균열이 일부 존재하고 있어 균열이 입계로 성장하여 파단되었음을 알 수 있다. Fig. 2 (e)는 최대 압축응력에서 20분간 유지시간을 준 HC2010형에 대한 사진인데, 입자가 뜯겨져 나간 흔적과 입자사이의 경사면에 입계균열이 존재하며, HT형이나 HTC형의 파단면 보다 더욱 뚜렷한 입계파괴의 양상을 볼 수 있다.

따라서 이들 파단면 사진으로부터 저주기 피로균열의 전파특성도 파괴되는 양식과 깊은 관계를 가지고 있음을 알 수가 있다.

3.3 저주기 피로수명 예측

고온 저주기 피로수명 거동에 대한 수명예측 방법은 현상학적 모델(phenomenological model)에 의한 방법과 물리적 현상에 근거한 모델(physically-based model)에 의한 방법으로 분류할 수 있다. 현상학적 모델은 매개변수 관계식이나 피로와 크리프에 의한 손상정도를 평가한다. 현상학적 모델은 손상에 대한 물리적인 의미는 없지만, 피로수명 예측 모델에 있어서 일반적이고 적용하기가 쉬운 모델이다. 본 논문에서는 다음과 같은 3가지 고전적인 현상학적 수명예측 모델을 사용하여 피로수명을 비교·검토하고자 한다:

- Coffin frequency modified life,
- Ostergren damage function,
- Taira equivalent temperature concept(essentially Coffin-Manson Law)

(1) The Coffin frequency modified fatigue life

이 모델은 고온 피로손상은 주로 환경적인 요소에 기인한다는 가정에 기초하고 있다(Coffin, 1976).⁽⁷⁾ 따라서, 반복수와 파단시간 사이의 관계식을 도입하여 Manson-Coffin 법칙을 수정하였으며, 몇 가지의 가정을 추가하여 최종적으로 다음과 같은 식을 얻었다:

$$1/N_f = (\Delta\epsilon_{in}/C_1)^{1/\beta} (\nu_i/2)^{k-1} \quad (1)$$

여기서 N_f 는 파단반복수, $\Delta\epsilon_{in}$ 는 비탄성 변형률 범위(inelastic strain range), k , β and C_1 는 온도에 의존하는 재료상수, 그리고 ν_i 는 유효주파수(effective frequency)이다.

$$\nu_i = \frac{1}{\tau_o + \tau_T + \tau_C}$$

여기서 τ_o 는 연속사이클에서의 반복수당 시간이고, τ_T 는 인장 유지시간, τ_C 는 압축 유지시간이다.

(2) The Ostergren damage function

초합금과 같은 고강도강의 하중이력에 중요한 영향을 미치는 평균응력(mean stress)을 설명하기 위하여 Ostergren(1976)은 식(1)을 수정하여 다음 식을 제안하였다.⁽⁸⁾

$$\sigma_{max} \Delta\epsilon_{in} = C_2 (N_f \nu_i^{k-1})^{-\beta} \quad (2)$$

여기서 σ_{max} 는 최대 응력(maximum stress)이고, $\Delta\epsilon_{in}$ 는 비탄성 변형률 범위, k , β , C_2 는 온도에 의존하는 재료상수, 그리고 ν_i 는 유효주파수이다. 이 식은 변형률과 온도의 위상차로 인하여 평균응력 수준이 변화하는 열피로(thermo-mechanical fatigue) 하중조건과 같이 복잡한 온도-변형률 이력에 대한 모델로서 적합하다.

(3) The Taira equivalent temperature concept

열적인 효과(thermal effect)를 설명하기 위하여 Taira(1973)는 Manson-Coffin 법칙에서 유효온도에 의존하는 손상계수(damage factor), $\lambda(\bar{T})$ 를 도입하였다.⁽⁹⁾

$$1/N_f = C_3 \lambda(\bar{T}) (\Delta\epsilon_{in})^n \quad (3)$$

주어진 비탄성 변형률범위($\Delta\epsilon_{in}$)에 대하여 온도 \bar{T} 에서 수행한 등온 피로수명 결과는 열피로 실험에서 수행한 피로수명과 같다는 이론이다.

Fig. 3, 4, 5는 위에서 언급한 3가지 수명예측 모델을 이용하여 평가한 실험값과 예측값의 비교 선도이다. Taira의 모델에 의한 예측값은 실험값 보다 다소 큰 경향이 있으나, Coffin의 주파수 수정 모델과 Ostergren의 모델은 예측값이 실험값 보다 대체적으로 작게 나타났다. Fig. 3, 4, 5에서 보는 바와 같이 3가지 예측 모델 모두 실험값과 예측 값이 상

당히 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

이와 같은 수명예측 방법은 간편하고, 쉽기 때문에 잘 적용되고 있지만, 좀더 복잡한 실험조건에서는 사용되기가 쉽지 않다. 수명예측 식의 정확도를 향상시키는데 가장 중요한 것은 물리적인 손상 기구(physical damage mechanisms)를 이용하는 것이

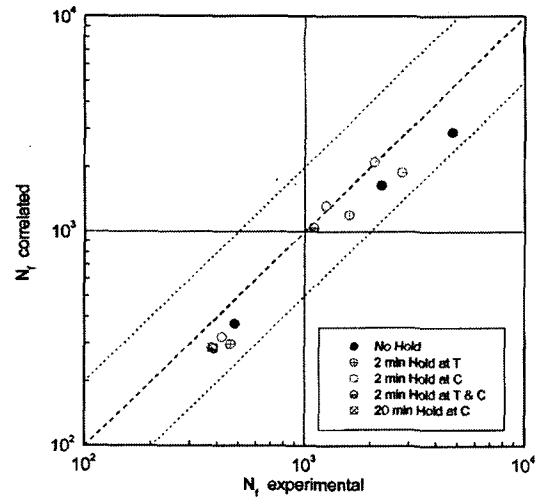


Fig. 3 Comparison between experimental and correlated lives from the Coffin frequency modified fatigue life method

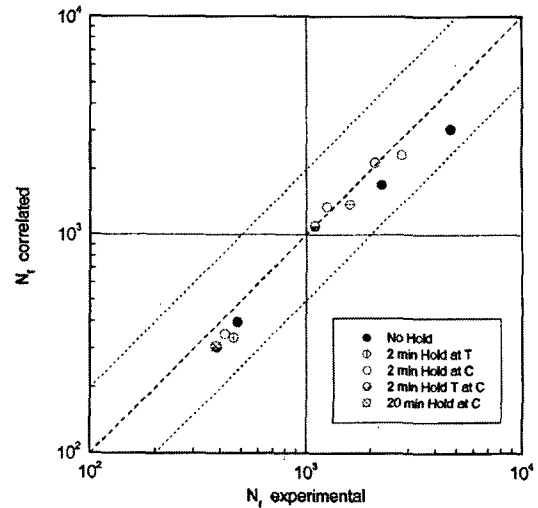


Fig. 4 Comparison between experimental and correlated lives from the Ostergren damage function

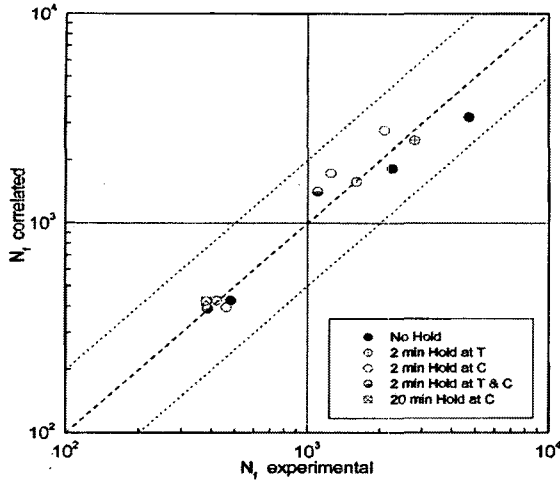


Fig. 5 Comparison between experimental and correlated lives from the Taira equivalent temperature

다. 물리적현상에 근거한 모델(physically-based model)은 열화과정(degradation process)에 대한 평가를 추가함으로써 개발시킬 수 있는데 이 부분에 대한 연구는 차후 계속될 것이다.

4. 결론

(1) 최대 인장응력에서 유지시간을 가해준 HT형의 경우 변형률 범위가 낮은(0.01%, 0.008%) 곳에서의 피로수명은 유지시간이 없는 CC형의 수명보다 29~40% 짧았고, 최대 압축응력에서 유지시간을 가해준 HC형의 경우 피로수명은 CC형의 수명보다 44~55% 짧았다.

(2) 최대 압축응력에서 20분간 유지시간을 가해준 HC20형의 피로수명은 변형률 범위 0.02%에서 2분 유지시간을 가해준 HC형의 수명보다 약 10% 짧았다.

(3) 하중의 작용형태별 피로파단면의 형상과 특성을 관찰한 결과 CC형과 HC형의 파단면은 입내형의 파괴 양상이 우세하였으며, HT형, HTC형 및 HC20형의 파단면은 입계형의 파괴 양상이 지배적이었다. 따라서 이들 파단면 사진으로부터 저주기피로 균열의 전파특성도 파괴되는 양식과 깊은 관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

(4) 3가지 수명예측 모델을 이용하여 실험값과

예측값을 비교한 결과 Coffin의 주파수 수정 모델과 Ostergren의 모델에 의한 결과는 예측값이 실험값보다 대체적으로 작게 나타났으며, 3가지 예측 모델 모두 실험값과 예측값이 잘 일치하였다.

후 기

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연구 지원비에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. 송삼홍, 강명수, "미소 원공결함을 갖는 Cr-Mo -V 강의 고온피로 크랙전파거동," 한국정밀공학회지, 제13권, 제12호, pp. 70-77, 1996.
2. 하정수, 김건영, 안희돈, "12Cr 강의 열피로 수명 예측에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제11권 제4호, pp. 114-125, 1994.
3. 오세종, 이현우, 전제춘, "이축 변동하중하에서의 피로수명 예측기법에 관한 연구," 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 666-671, 1994.
4. 송삼홍, 강명수, 하정수, "터빈 케이싱 볼트강재의 열피로 크랙전파 특성," 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 221-225, 1994.
5. 하정수, 웅장우, 고승기, "변형률분할법에 의한 12Cr 단조강의 열피로 수명예측," 대한기계학회 논문집, 제18권 제15호, pp. 1999-2010, 1994.
6. E. Fleury, 하정수, 강명수, "초내열합금강 IN738LC의 열기계 피로거동 및 수명예측에 관한 연구," 대한기계학회 추계학술대회논문집, pp. 1019~1023, 1999.
7. Coffin Jr L.F., "The Concept of Frequency Separation in Life Frequency for Time-dependent Fatigue," ASME-MPC-3 Symposium on Creep -Fatigue Interaction, New-York, pp. 349-364, 1976.
8. Ostergren W.J., "A Damage Function and Associated Failure Equations for Predicting Hold Time and Frequency Effects in Elevated Temperature Low Cycle Fatigue," *Journal of Testing and Evaluation*, pp. 327-337, 1976.
9. Taira S., "Relationship between Thermal Fatigue and Low Cycle Fatigue at Elevated Temperature," *ASTM STP 520*, pp. 80-101, 1973.