

研究論文

장기사용된 1Cr-0.5Mo 주증기관의 수명평가

백 수 곤* · 홍 성 인**

Life Evaluation of Long-time Used 1Cr-0.5Mo Main Steam Pipe

S. G. Baek* and S. I Hong**

Key Words : Life Evaluation(수명평가), Main Steam Pipe (주증기관), Condition Assessment (상태평가), Pipe Stress Analysis (배관 응력 해석)

Abstract

Most fossil power plants and many critical components will be approaching the end of their nominal design life. At the same time, utilities are finding it economically attractive to extend the use of these plants for several more years. Especially Main steam pipe that operated under high temperature and pressure, often under the more severe operating conditions associated with cycling duty, is most important pipe system and critical component in fossil power plant. To extend the viability of older pipe system and to improve the operation and maintenance reliability, some technologies of precise diagnosis and life management have evolved out of the necessity. The purpose of this study is to describe the related technologies and show the example of one power plants. The stress analysis was done using ANSYS FEM Code. The branch area from main steam to turbine was the high stressed zone. To evaluate the degradation of the pipe material, replica, visual check, magnetic test, hardness test were done at the welding spot. The degradation level of welding point was E/F, so the remaining life of the welded area was about 0-25%

1. 서 론

현재 국내에서 운전되고 있는 화력발전소의 65% 이상이 시운전 후 10년을 넘고 있으며, 15년 이상을 경과한 것도 55%를 상회하고 있는 실정이다. 또한, 1960년 이전에 건설된 석유화학공장 및

정유공장등 중공업 설비들이 사용기간이 20년이 넘어, 기계설비들이 당초의 설계수명을 넘기고 있는 실정이다. 이러한 노후 설비를 폐기하고 새로운 설비를 건설하려면 경제적 부담 외에도 Nimby 현상등에 따른 공장 부지선정등 어려움이 많으므로, 기존의 노후설비를 폐기하지 않고, 수명을 연장하여 사용하는 경우가 많게 되었다. 최근 설비

* 1997년 9월 23일 접수

* 정회원, 한전전력연구원 수화력발전연구실

** 비회원, 충남대학교

의 건전성을 평가하는 수명평가 기술의 발전으로 과거에 제시했던 설계수명을 당초 20년에서 30년 내지 60년정도까지 연장하는 방안을 연구중이다.

또한 현재 운전되고 있는 화력발전소 보일러는 대부분 기저부하용으로 개발되어 있어 보일러 본체 구조의 간소화와 고온배관의 저응력 설계가 요구되고 있는 형편이다. 발전용 배관의 경년열화를 발생시키는 요인은 기동정지, 장시간에 걸친 고온 고압 운전, 부하조건 변화, 부식 등을 들 수 있으며 대부분 여러 요인들이 복합적으로 작용하여 열화를 촉진시키게 된다.

화력발전소에서 주증기관은 보일러의 최종 과열기 출구로부터 터빈입구까지 연결된 고온 배관으로서 고압의 증기를 수송하는 역할을 한다. 주증기관 라인에는 두 개의 관이 한 개의 관으로 연결되는 Y-piece 관이나 각종 밸브 및 드레인 라인등이 연결되고 여러 부분들이 용접되어 연결되는 시스템으로 발전소 배관중에는 가장 길고 중요한 배관이다. 따라서 15년 이상 사용된 발전소의 정밀진단 시에는 필수적으로 상태를 평가하는 중요설비이다.

이에 본 연구에서는 1965년에 건설되어 운전중인 [가]석탄화력 발전소에 대하여 정밀진단을 수행, 주증기관의 잔여수명을 평가한 결과를 토대로 배관 내부에 작용하는 압력과 운전시 가해지는 열응력등이 배관 용접부에 어느정도의 수명 소비를 유발하는지를 해석함으로써 발전설비 교체 기준 설정에 참고하도록 하였다.

2. 설비현황 및 운전이력

본 논문의 대상발전소인 [가] 발전소는 독일 DIN 규격으로 13CrMo44 인 1Cr0.5Mo 강으로서 외경과 두께는 부위별로 약간 달라 세가지 종류로서 대부분은 218mm와 19mm이다. 전체적인 길이는 약 50m로서 현장 용접부위와 배관의 개략도는 Fig. 1과 같다.

설계온도는 515℃, 압력은 106kg/cm²로서 93년도 최초 수명평가를 위한 정밀진단 이전까지 1호기는 149,000시간의 운전시간과 345회의 기동정지 회수를 가지고 있으며, 그후 계속해서 관련 설비의 정확한 수명평가 기술을 개발하고 있다.

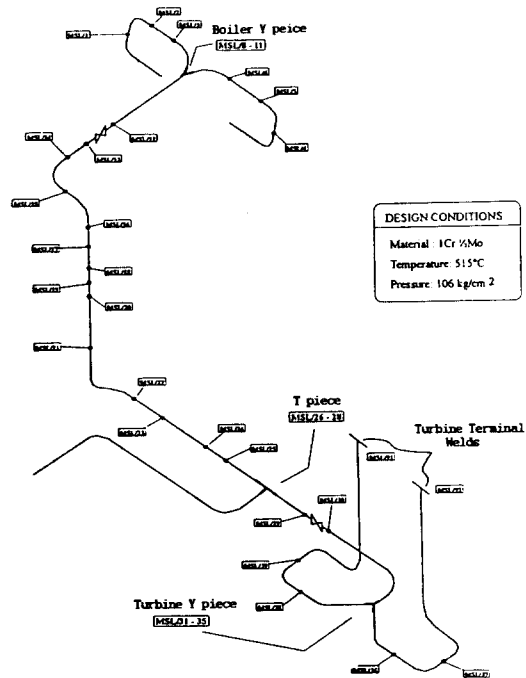


Fig. 1 Isometric Drawing of Main Steam Line.

3. 주증기관의 응력해석

3.1 주증기관의 허용응력

화력발전소 배관은 ANSI B31.1 Power Piping Code와 ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. I 을 따라 배관 자중, 온도효과 등에 기인하는 허용응력을 산출할 수 있다.

발전소의 기동·정지에 따른 배관계의 파괴는 저주기피로(Low-cycle fatigue)에 의한 것으로 생각할 수 있으며, 그러한 반복응력에 의한 피로강도의 경우, ANSI B31.1 Piping Code에서는 최대응력과 최소응력의 차, 즉 응력범위(Stress range) S_A 를 설정, 다음과 같이 기동·정지에 따른 사이클수에 의한 Table 1과 같은 보정계수 f 를 사용하여 허용응력범위 S_A 로 나타낸다.

$$S_A = f (1.25S_C + 0.25S_H) \quad (1)$$

여기서, S_C = 상온에 있어서 재료의 허용응력

Table 1. 응력감소 계수 f

기동정지 회수 (기동, 정지를 1회로 산정)	응력감소 계수 (f)
7,000회 이하	1.0
7,000~14,000 회	0.9
14,000~22,000 회	0.8
22,000~45,000 회	0.7
45,000~100,000 회	0.6
100,000 회 이상	0.5

S_H = 운전온도에 있어서의 재료의 허용응력

f = 운전 사이클수로 정해지는 보정계수

그러나, 식(1)은 열응력만을 대상으로한 식이며, 압력, 배관자중, 기타 외력에 의한 응력의 조합을 고려할때의 허용응력범위 S_A 는 다음식에 의한다.

$$S_A = 1.25 f (S_c + S_H) \tag{2}$$

배관해석에 의한 조합응력을 받는 배관요소내의

응력은 배관의 허용응력범위 S_A (여기서는 32.5ksi) 를 넘어서는 안된다.

3.2 주증기관의 모델링 및 경계조건

배관에 작용하는 응력을 해석하기 위하여 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 모델링하였다. 모델링 시작점을 보일러 노즐로 하고 끝점을 터빈노즐로 하여 고정점으로 설정한후 각 지지장치가 있거나 현장용접부위를 Nodal Point로 하고 지지장치가 있는 곳에 Spring hanger setting값을 일정하중으로 입력하며, Table 2와 같이 배관지지장치별로 경계조건을 설정하였다. 이때 온도와 압력은 상온과 운전온도를 기준으로 입력하여 해석하였다.

자중해석은 배관을 지지하고 있는 각 행거의 하중을 구하기 위하여 수행하였다. 배관이 운전되고 있지 않은 상태에서 순수하게 배관을 모델링하고 지지되고 있는 행거 하중을 구하기 위해서는 시뮬레이션에서 행거위치를 고정점으로 생각하고 그

Table 2. 배관 지지장치의 분류 및 ANSYS 경계조건 설정

구분	명칭	목적	용도	ANSYS 적용
Hanger 또는 Support	Rigid Hanger	배관 및 기기등의 중량을 지지하거나 또는 기기등에 과대한 응력, 변형을 방지	열변형에 의한 수직방향 변위가 극히 적은 개소에 사용	수직방향 변위를 완전구속
	Spring Hanger (Variable Hanger)		열변형에 의한 수직방향 변위가 적은 개소에 사용	스프링 계수를 구하여 행거하중에 삽입 $F = k / \delta$ (k : 스프링계수, δ : 변위)
	Constant Spring Hanger		열변형에 의한 수직방향 변위가 적은 개소에 사용	행거가 일정하중을 유지하므로 배관의 수직방향으로 행거하중을 적용
Restraint	Anchor	열팽창에 의한 배관계의 자유로운 움직임을 구속하거나 제한	완전히 배관계의 일부를 고정하는 경우에 사용	고정되는 방향의 변위만 구속
	Guide		배관이 축을 따라 회전하는 것을 방지하는 경우에 사용	배관의 회전방향(Rotx, Roty, Rotz) 만을 구속
	Restraint(Stop)		배관의 회전은 허용하지만 직선운동을 방지하는 경우에 사용	배관의 직선방향(U_x, U_y, U_z) 만을 구속

위치에서의 배관의 상방향의 반력을 구하였다.

상온 및 고온조건에서 변위 해석결과 현장 배관과 ANSYS 해석결과와는 서로 매우 일치하였으나, 배관에 설치된 Spring hanger setting값과는 다소 차이가 발생하였는데, 이러한 Spring hanger setting값과의 오차 원인은 Cold상태에서 배관을 당겨서 Hot상태에서 열팽창을 보정하기 위한 C. P. U(cold pull up) 때문이다. Spring hanger setting값은 C. P. U가 보정된, 배관의 길이가 그만큼 적은 상태에서의 각 Hanger의 반력값이라고 볼 수 있으며, 따라서 본 해석에서는 자중해석을 제외한 모든 Cold와 Hot상태의 해석은 현장에서의 Spring hanger setting 값을 기준으로 하여 배관을 모델링하고 해석하였다.

3.3 해석결과

응력해석결과 Fig. 2에서 보는바와 같이 터빈입구에서 배관이 분기되는 T-joint용접부에서 최대응력 11.676ksi가 발생하며, 터빈 근처 배관에서 전반적으로 높은 수준의 응력이 발생한다. 본 응력은 전절에서 설정한 배관의 허용응력범위내에 있으므로 열응력에 의하여 과도한 수명소비가 발생했다고는 볼 수 없다. 최대 변위는 Fig. 3에서 알 수 있는바와 같이 보일러와 터빈이 만나는 엘보우부위에서 가장 심하지만 이는 자유팽창이 허용되는 곳이므로 문제가 되지 않는다.

4. 주증기관 용접부의 잔여수명

주증기관의 용접부는 일반적인 다른 용접부와 같이 물성이 일정하지 않고 응력집중이 발생하며 열영향부 등의 취약부가 존재한다. 따라서 주증기관의 수명에 문제가 생기면 제일 먼저 용접부에 징후가 나타나게 된다. 본 발전소의 주증기관 용접부에 작용하는 최대 응력이 허용응력범위내에 있으므로 본 설비는 소요의 설계수명까지 운전하는데 무리가 없을 것이다. 그러므로, 지금까지 본 응력이 배관 수명에 얼마나 영향을 미쳤는지를 평가한다.

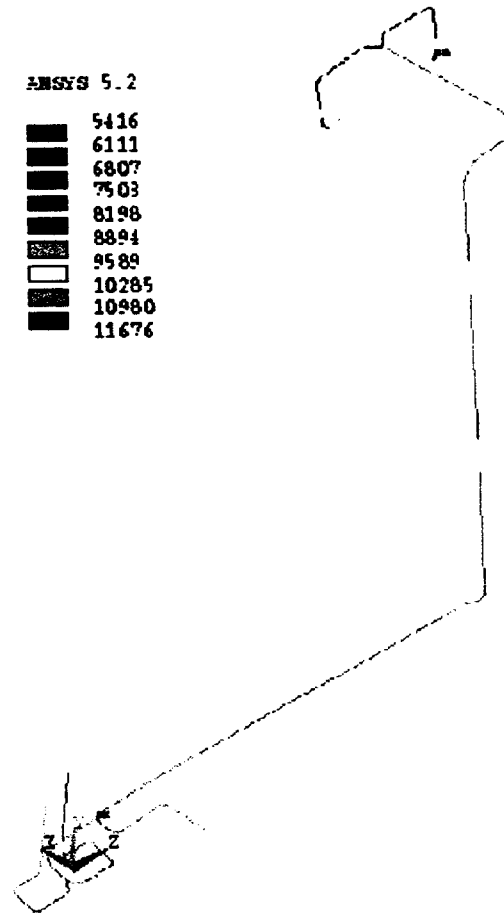


Fig. 2 Result of stress analysis (hot condition)

4.1 크리프 수명

크리프 수명을 평가하기 위하여 ANSYS해석으로부터 나온 최대 응력에 안전율을 0.25를 적용하여 Larson-Miller Parameter 중 안전한 하한치를 적용하여 구한 파단시간은 191,289시간이었다.

실제 본 배관의 운전시간은 149,000 시간으로 '93년 이후 약 5년의 잔여 수명이 남아있는 것으로 평가된다. 그러나, 재료 물성치를 상하한치의 평균이나 상한치를 적용할 경우에는 크리프수명이 각각 244,000시간과 423,000시간으로서 본 배관의 시운전후 최대 약 50년까지 사용할 수 있어 본 발전소의 경우 앞으로도 20년을 더 사용할 수 있어 수명해석에 대한 추가 자료를 필요로 하게 된다. 본 연구에

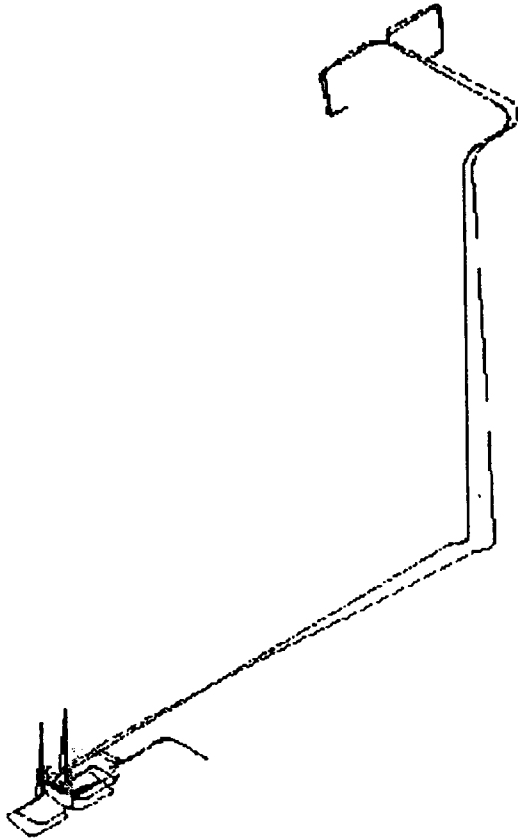


Fig. 3 Result of displacement analysis (hot condition)

서는 금속의 사용기간에 따른 열화도 평가자료로서 금속의 조직상태를 평가하여 비교하였다.

4. 2 금속의 조직변화에 따른 수명

일반적으로 고온 배관에 작용하는 금속조직의 손상형태는 크리프 기공 또는 크리프 기공 연결에 의한 미소균열 형태의 Intercritical 영역 또는 열영향부 Type IV 균열이 발생할 수 있다. 또한 기동정지가 심한 발전소의 경우 피로 손상과 크리프 손상이 혼합되어 나타날때도 있지만, 피로 손상은 크리프 손상 취약부와 무관하게 독립적으로 나타나기도 한다. 특히, 저합금강을 고온에서 오래 사용하면 금속 조직이 점차 과시효되어 열화현상이 나타난다. 이때 탄화물(carbide) 간격이 넓어지고 크기가 커져서 재료 강도의 저하를 유발한다.

이와같은 배관의 손상이나 조직변화를 관찰하기 위하여 그림 1에서 보이는 바와 같이 용접부나 응력이 많이 작용하는 보일러 Y-piece, 주증기관 안전밸브 및 스톱밸브, T-piece, 터빈 Y-piece, Girth weld 및 굴곡부등에 육안검사, 자분탐상(MPI), 칫수측정, 표면복제검사, 경도측정, 입계부식 특성 검사 등을 수행하였다.

4. 2. 1 육안검사

주증기관 용접부 주위의 단열재를 제거한 후 냉각 상태에서 육안 검사를 실시하였다. 파이프 지지부(support)는 모두 파손된 곳이 없었으며 행거도 모두 정상이었다. 다른 손상도 관찰된 것이 없었다.

4. 2. 2 자분탐상(MPI)

대부분의 용접부에 대하여 자분 탐상을 실시한 결과 많은 맞대기 용접부에서 길이방향의 균열이 발견되었다. 1호기에서 발견된 길이방향 균열은 2호기에서 발견한 균열과 동일하였다. 파이프 맞대기 용접부의 열영향부를 따라 발생한 파이프의 원주 방향 균열도 다수 발견되었다.

4. 2. 3 칫수 측정

주증기관의 많은 부위에서 외경과 두께에 대해 칫수 측정을 실시하였다. 두께측정 결과 두께는 설계 허용값 내에 있었다. 외경 측정 결과 외경은 설계 허용값 상한선보다 크게 나타났다. 주증기관의 외경 측정 결과 외경이 설계 상한값에 도달해 있으며, 균열이 발생한 부위들에서는 설계 상한값 이상으로 외경이 팽출되어 있었다.

4. 2. 4 표면복제 및 경도측정

맞대기 용접부의 많은 부위를 보수하였기 때문에 보일러와 터빈 Y-piece중에서 알아내지 않은 맞대기 용접부의 몇 곳을 선택하여 표면복제를 하였다.

길이방향 맞대기 용접균열에서 채취한 래프리카를 관찰한 결과 균열선단에서 크리프 기공손상이 발견되므로 입계에서 균열생성이 일어났음을 알 수 있었다. 열영향부나 모재부에서 크리프 기공손상이 발견되진 않았으나 균열표면이 산화되어 있었다. 모재부의 미세조직 관찰결과 탄화물의 구상

화와 응집정도가 중간 수준이었다(미세조직 분류 C). 주 증기관 용접부에서 측정된 경도값은 176에서 117 Hv로서 취약부위인 터빈 Y-piece부의 경도값은 117 Hv로서 나타났으며, 이는 고온에서의 경도변화와 수명관계를 규정한 다음 식(5)으로 표현할 수 있다.

$$Hvb = 595.453 - 1.2603 \times 10^{-2} P$$

여기서 Hvb는 열시료재의 경도이며, P는 Larson-Miller Parameter이다.

윗 식으로부터 열시료재와 측정 경도값의 변화 관계에 의해 구한 크리프 수명소비는 0.85-1정도로써 미세조직의 열화정도와 잘 일치하였다. 왼쪽편에 위치한 터빈 입구쪽 플랜지와 오른쪽편에 위치한 터빈 터미널 용접부 혹은 굴곡부에서 크리프 손상이 발견되지 않았으며, 과도한 연화나 미세조직 열화도 관찰되지 않았다. 보일러와 터빈 Y-piece의 갈라진 용접부에서 크리프 기공이 발견되었다. 모재의 미세조직과 경도로는 미세조직의 열화나 연화가 없는 것으로 판단되나, 터빈과 보일러 Y-piece의 용접부에 대한 경도값은 상당히 낮았다.

1차 정밀진단이 끝난 후 4년째인 97년에 실시한 표면복제 시험의 경우에도 터빈 입구 T-joint부위에서 Fig. 4와 같이 균열이 발견되었으며 금속 조직이 구상화되어 열화정도는 E/F등급으로 수명이 거의 소진된 것으로 평가되었다. 또한, 보일러와 터빈이 만나는 엘보우부위에서는 Fig. 5와 같이 크리프 기공이 발견되는 것으로 보아 크리프 수명소비가 컸음을 증명한다.

분기관 용접부의 주증기관측 HAZ에서 발생한 원주 방향 균열이 관찰되었다. 이 균열의 위치는 내압에 의한 원주방향 응력하에서의 용접부 파손과 잘 일치한다.

이상의 결과로 볼 때 주증기관의 균열 발생 부위 근처 모재에서 크리프 손상이 발견되지는 않았지만, 파이프 전체적으로 수명이 소진된 것으로 판단된다. 단지, 아직까지 모재에서 크리프 손상이나 균열이 관찰되지 않은 것은 용접부에 비해 모재의 연성이 크기 때문이다. 따라서, 비록 현재 주증기관 수명이 다하였더라도 아직 모재에서 관찰된 크리프 손상은 없으며 균열 발생 용접부를 모두 보

수한 상태이므로 다음 정기점검 전까지는 사용이 가능하다고 판단되지만, 주증기관 굴곡부에 대해서는 주의를 요하여야 한다. 본 발전소와 유사한 독일사 제작 주증기관의 운용 경험에 의하면, 1960년초 시공한 많은 발전소에서 굴곡부 파열이 보고되고 있고, 그중 한 경우는 1Cr0.5Mo강 굴곡부에서 발생한 대형 사고였다. 이 경우에는 크리프 손상이 굴곡부 두께 방향으로 진전되어 누수전갑작스런 파열로 나타났었다.

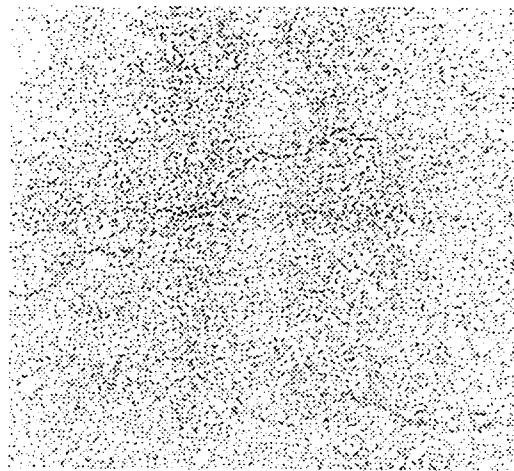


Fig. 4 Crack shape at Y-piece welded area

5. 결론

이상과 같이 장기사용된 화력발전소의 주증기 배관에 대하여 유한요소법에 의한 응력을 산출하고, 그에 따른 크리프 수명소비를 계산하였으며 본 잔여수명의 타당성을 확립하기 위하여 자기탐상검사등 비파괴적인 결함탐상방법과 표면복제법을 이용한 조직변화 상태를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻는다.

○ 주증기관의 잔여 크리프 수명은 재료물성의 하한치를 사용하여 계산한 경우 수명이 소진된 것으로 판단되지만, 실제 배관의 비파괴적 건전성 평가 결과 높은 응력을 받는 용접부는 수명소비 등급이 E/F로서 설계수명이 다 되었다 할 수 있으나, 기타부위는 건전한 조직상태를 유지하고 있다. 그러므로, CrMo 배관 용접부의 크리프 수명은

재료 물성의 하한치를 적용한 Larson-Miller Parameter가 잘 일치한다. 그러나, 용접부에서 떨어진 비용접부의 경우에는 모재가 건전한 상태를 유지하고 있으므로 재료물성의 평균치 또는 그 이상과 Larson-Miller Parameter를 적용하여야 한다.

○ 주중기관외의 맞대기 용접부에서 상당량의 길이 방향 용접부 균열 및 크리프 손상이 발견되었다. 이들의 형상, 방향, 갯수, 간격등으로부터 판단해 볼 때, 이는 크리프 연성의 소진으로 인하여 원주 방향 응력에 의해 용접부에서 파손이 일어날 위험이 있다.

참 고 문 헌

1. 김건영, 백수곤외 4인, 1993, "노후화력발전소 정밀진단 및 수명평가" 전력연구원 최종보고서, pp. 56 - 68.
2. Becker F.L. et al., 1987, "Industry Experience and overview of Steam Pipe Activities", Conference proceedings of Life extension, pp. 839-852.
3. 김건영, 백수곤 외 6인, 1991, "보일러 후육부 및 고온 배관계 수명예측에 관한 연구", 전력연구원 최종보고서, pp. 125- 153.
4. Eggeler G.F., Hurst R.C., 1994, "Development and Validation of Models for the Lifetime Assessment of Steam Power Plant Components", Conference of Materials for Power Engineering, pp. 109-132
5. Viswanathan R., 1989, "Damage Mechanics and Life Assessment of High Temperature Components", ASM