

고온에서 용접부 균열의 수명평가에 관한 연구

백운봉*, 이진상**, 윤기봉**

* 한국표준과학연구원 산업측정표준부 강도연구그룹

** 중앙대학교 기계공학부

A Study of Life Assessment Technology for Weld Interface Crack at High Temperature

Un Bong Baek*, Jin Sang Lee** and Kee Bong Yoon**

1. 서론

장기간 사용된 고온 플랜트의 후육부에 균열이 발생하여 균열성장에 따른 잔여수명을 평가할 필요가 있는 경우의 대부분은 용접 열영향부에 균열이 발생하여 성장하는 Type IV 균열⁽¹⁾이다. 이러한 균열에 대한 정하중 조건에서의 크리프균열성장(CCG, Creep Crack Growth) 거동에 대한 연구는 CrMo 저합금강의 사용재와 신재에 대한 CCG의 실험적 연구⁽²⁾ 결과와 재료 구성방정식의 차이에 따른 CCG 모델링에 대한 연구⁽¹⁾가 보고되었다. 그러나 최근 많은 고온 플랜트들이 잦은 기동정지에 따른 크리프-피로 하중을 받고 있으므로 용접 열영향부의 계면균열에 대해서도 정하중이 아닌 피로하중 조건에서의 크리프-피로 균열성장(CFCG, Creep-Fatigue Crack Growth) 거동에 대한 연구가 필요하다. 이러한 이유로 최근에는 CrMo강 용접 계면균열에 대한 크리프-피로 균열성장율의 실험적 측정 연구^(3,4)와, 용접부를 구성하는 모재, 용접재 및 열영향부 재료에 대한 고온 물성 측정 연구⁽⁵⁾가 수행되었다. 이들의 연구로부터 측정된 크리프-피로 균열성장율은 모재부의 재료물성 값을 사용하여 계산된 C_r 변수 값으로 특성화되었다. 그러나 용접부 계면균열의 C_r 변수 값은 계면 양쪽을 구성하는 모재 및 용접재 모두의 재료물성 값의 영향을 받을 것이며, 이에 대한 수치해석 연구 결과^(6,7)에서도 이점이 확인되고 있다.

본 논문에서는 실험적으로 측정된 용접계면균열의 크리프-피로 균열성장율을 모재부의 재료물성값만을 사용하여 계산한 C_r 변수 값 대신, 수치해석 연구결과 제시된⁽⁶⁾ 모재 및 용접재 모두의 재료물성 값을 사용한 C_r 변수 값으로 특성화하여 얻은 결과에 대해 논하였다. 이때 필요한 재료 물성은 이전 연구⁽⁵⁾에서 측정된 값을 사용하였으며 CrMo강의 경우 균열선단의 소성효과가 중요하다고 알려져⁽⁸⁾ 있으므로 균열선단 소성을 고려한 경우도 검토하였다.

2. 실험

2.1 재료 및 고온 물성

본 연구에 사용된 재료는 1Cr-0.5Mo 강으로서 화학성분은 Table 1과 같다. 용접부 각 부위인 모재 및 용접재의 재료물성 평가를 위한 인장 및 크리프 시편 채취를 위해 일반적인 용접 절차를 사용하여 용접블록을 제작하였다. 용접은 GTAW와 SMAW로 수동 용접하였으며 용접 절차는 Table 2에 보인 바와 같다. 최저 예열온도는 165℃, 최대 패스간 온도는 315℃로 제한하였으며, 670℃까지 가열하여 2시간 유지한 후 용접 후열처리를 실시하였다. 이때 가열은 250℃에서부터 110℃/hr로 가열하여 670℃에 도달하였으며 92℃/hr로 냉각하였다. SMAW 용접에 사용된 용착금속의 성분은 Table 3에 나타난 것과 같다. 이상의 용접 절차로 제작된 용접블록의 용접재 부위와 모재 부위에서 인장 및 크리프 시편을 채취 가공하였다. 이때, HAZ는 대략 2~3 mm 정도의 폭을 갖는 띠 형태로 형성되므로 용접블록으로부터 직접 열영향부의 인장 및 크리프 시편을 가공하기는 불가능하다. 따라서 시편가공이 용이하도록 충분한 두께를 갖는 부재가 열영향부와 유사한 조직을 가질 수 있게 하기 위하여, HAZ의 금속조직을 모사시킨 HAZ조직 모사재를 열처리에 의해 제작하였다. HAZ를 모사하기 위해서는 모재 블록을 시편 크기보다 약간 크게 절단한 다음에, 먼저 1,300℃에서 5분간만 유지시킨 후 유냉하여 HAZ 재현 열처리를 실시한 후, 응력 제거 열처리에 해당하는 열처리 공정인 720℃에서 6시간 유지하여 공냉으로 냉각하였다. 이상의 모사 열처리에 의해서는 HAZ부의 대부분을 차지하는 CGHAZ(Coarse Grain HAZ)를 얻을 수 있다⁽⁹⁾.

Table 1. Chemical composition of the 1Cr-0.5Mo steel.

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Fe
wt. %	0.18	0.27	0.68	0.016	0.014	0.095	0.94	0.44	0.12	0.008	bal.

Table 2. Welding process specification for the tested 1Cr-0.5Mo block.

Process	Filler Metal		Current/Polarity		Voltage Range (V)	Travel Speed (cm/min)
	AWS Class	Size(mm)	Type	Amp. Range		
GTAW	ER80S-B2	φ 2.4	DCSP	100-180	12-16	8-15
SMAW	E8016-B2	φ 3.2	DCRP	80-130	22-28	8-15
		φ 4.0		110-180		

Table 3. Chemical composition of filler metal (AWS E8016-B2).

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	Fe
wt. %	0.06	0.47	0.65	1.31	0.52	bal.

2.2 크리프-피로 균열성장 시험

크리프-피로 균열 성장시험을 위한 C(T) 시험편은 균열성장 방향이 열영향부를 따라서 성장하도록 Fig. 1과 같이 가공하였다. 기계가공을 한 시험편은 예비균열을 만든 다음 시편 측면을

연마하여 부식한 후 균열선단이 열영향부에 놓여 있음을 확인하였다. 예비 피로균열 형성 후 측면 홈을 가공하였으며 균열길이를 연속적으로 측정하기 위해 직류 전위차법을 사용하였다. 본 실험에서 사용한 직류 전위차법의 전류입력단자 및 전위차 출력단자의 최적위치는 문헌에 나타난 것을 채택하였다⁽¹⁰⁾.

하중유지시간이 없는 삼각파형으로 부터 균열성장율을 측정하여 주기의존 균열 성장율을 결정하기 위해, [하중증가시간]/[하중감소시간]이 1/1(단위:초)인 삼각파형에서 4개의 시험편을 사용하여 피로시험을 실시하였다. 또한 하중유지시간 동안의 시간의존 균열성장율을 측정하기 위해 30초, 300초, 3,600초의 하중 유지시간을 갖는 사다리꼴 파형 조건에서 피로균열성장시험을 실시하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 용접부의 고온 재료물성

모사 열처리한 용접 열영향부 Fig. 2는 입도(grain)가 큰 CGHAZ의 조직을 보여주고 있으므로 본 연구에서 측정한 열영향부의 재료물성은 CGHAZ의 물성이다. HAZ 균열은 CGHAZ부를 따라 성장하기도 하지만 많은 경우 입도가 작은 FGHAZ(Fine Grain HAZ) 부위를 따라 성장하거나 모재와 FGHAZ 사이의 경계지역인 ICHAZ(Inter-Critical HAZ)를 따라 성장한다. 본 연구에서는 HAZ 부위의 폭이 작으므로 HAZ에 균열이 있는 경우 모두를 균열의 정확한 위치에 관계없이 모재와 용접재 사이의 계면 균열로 가정하고 파괴 변수를 계산하였다.

크리프 시험으로 얻은 크리프 변형율-시간 관계 데이터를 $\epsilon_{sc} = A \sigma^n$ 의 2차 크리프 관계식으로 모델링 했을 때의 재료 상수를 Table 4에 나타내었다. 본 연구 재료의 경우 용접재가 크리프 저항성이 가장 높으며 모재가 크리프 저항성이 가장 낮았으므로, 동일 하중조건에서는 모재가 용접재나 HAZ 재료보다 크리프 변형이 가장 쉽게 발생할 것이다. 즉, 본 연구에서와 같이 C(T)시험에 용접부 계면 균열을 형성하여 CFCG시험을 수행하는 경우 하중점 변위속도는 용접재 쪽의 크리프 변형 때문에 발생하는 변위보다는 모재 쪽의 크리프 변형 때문에 발생하는 변위가 훨씬 크게되므로 C_c 를 계산할 때에도 모재 물성의 기여도가 클 것이다. Fig. 3에 초기 응력이 약 180 MPa인 경우의(모재-182 MPa, HAZ 재료-178 MPa, 용접재-184 MPa) 크리프 시험데이터와 2차 크리프 모델 식에 대입하여 계산된 크리프 변형률 데이터를 함께 나타내었다. Fig 3를 관찰해보면, 시험 초기에 변형률이 빨리 증가하는 1차 크리프변형이 우세한 영역 외에는 실험 데이터와 모델링 데이터가 비교적 잘 맞으므로 2차 크리프 모델링의 유효성을 검토해 볼 수 있다. 고온에서의 인장물성 데이터도 Table 5에 나타내었다.

Table 4 Creep properties of the 1Cr-0.5Mo steel at 538°C.

Material	Creep Constant A ($MPa^n \cdot hr^{-1}$)	n
Parent	1.235E-24	9.18
HAZ	1.787E-17	5.52
Weld	3.358E-30	10.70

Table 5 Tensile properties of the 1Cr-0.5Mo steel at 538°C.

Material	Yield Stress (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	Young's Modulus (GPa)	D (MPa ^m)	m
Parent	214	344	32.9	78.9	127.92	3.207E-17	5.96
HAZ	323	461	28.0	75.5	147.27	1.091E-22	7.73
Weld	408	461	30.0	81.1	151.92	5.310E-46	16.29

3.2 크리프-피로 균열성장거동의 특성화

C_t 의 평가시 재료의 크리프 거동을 2차 크리프만 가정하여 이전 연구⁽⁶⁾에서 제안된 탄성-2차 크리프 거동 재료에서의 C_t 식을 사용하여 $(da/dt)_{avg}$ 와 $(C_t)_{avg}$ 관계를 구하면 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서는 C_t 값 계산시 모재의 크리프 상수만을 사용하였다. 동일한 시험 데이터를 용접재의 크리프 상수를 사용하여 C_t 를 계산하면 Fig. 5에 보인 바와 같은 관계를 갖는다. 용접재의 크리프 상수를 사용하는 경우 크리프 변형이 작게 예측되므로 계산된 C_t 값은 모재의 크리프 상수를 사용한 경우보다 작게 된다. 따라서 Fig. 5의 C_t 값은 Fig. 4의 C_t 값보다 매우 작게 나타나며, $(da/dt)_{avg}$ 와 $(C_t)_{avg}$ 관계의 산포도도 더욱 크게 나타났다.

Fig. 4 및 Fig. 5 모두 계면 균열의 한쪽 재료의 물성만을 사용하므로 계산 방법이 편리하여 실용적이기는 하나 정확한 C_t 값 계산을 위해서는 모재와 용접재 모두의 물성을 사용하여야 한다. 모재와 용접부 계면균열에 대하여 유한요소 해석으로 얻은 C_t 값을 근사적으로 얻기 위한 식으로서 정상상태 크리프 조건(extensive creep condition)에서는 두 재료 C_t 값의 대수 평균값이 제안되었으므로⁽¹¹⁾ 이 식을 사용하여 C_t 값을 다시 계산하여 Fig. 6에 나타내었다. 실제 실험데이터의 상당 부분은 정상상태 크리프 조건 이전의 소규모 크리프 조건이지만 이 경우에도 두 재료 C_t 값의 대수 평균값을 계면균열의 C_t 근사 값으로 가정하여 사용하였다. Fig. 6의 C_t 값은 Fig. 4와 Fig. 5 C_t 값의 평균값이므로 Fig. 4에 비해서 C_t 값은 다소 감소하였으나 데이터 산포는 개선된 점을 발견할 수 없었다.

CrMo강의 경우 고온에서 하중이 유지된 초기에 균열선단의 소성역 발생에 의한 응력완화를 고려해야 하기 때문에⁽¹²⁾ 용접재와 모재의 t_{pl} 값을 계산하여 소성을 고려한 C_t 식을 사용하여 다시 C_t 값을 평가하여 Fig. 7에 나타내었다. 계산된 t_{pl} 값은 모재의 경우 0.449 시간, 용접재의 경우 0.292 시간이었다. 이때에도 재료의 소성 및 크리프 물성은 용접재와 모재의 값을 모두 고려하였다. 소성의 영향을 고려하지 않은 Fig. 6의 결과와 균열선단 소성을 고려한 Fig. 7의 데이터를 보면 후자의 경우 데이터의 산포도가 다소 개선되기는 하였지만 기존의 실험데이터 산포의 원인을 균열선단 소성역을 고려하여 설명하였다고 말하기는 어렵다.

3.3 용접 열영향부 내의 균열성장 경로에 대한 고찰

본 연구에서 C_t 값의 계산을 위해서 용접 열영향부의 폭을 무시하고 단지 용접재와 모재사이의 경계면에서 균열이 성장한다고 단순화하여 가정하였다. 그러나 실제의 HAZ는 2-3 mm의 폭을 갖고 있으므로 HAZ 내의 균열의 정확한 위치 변동에 따라 균열 성장 속도가 달라질 수도 있을 것이다. HAZ는 크게 용접재와의 경계인 용융선(fusion line)부근의 CGHAZ와 모재와의 경계부 부근의 FGHAZ로 나눌 수 있다. Fig. 8은 하중유지 시간이 300초인 경우의 균열 성장 경로를 보여주고 있다. 피로 예비균열의 균열선단은 처음에 CGHAZ에 위치하였다. 처음

4.6 mm까지 균열이 성장할 때까지는 CGHAZ내에서 균열이 성장하다가, 균열 성장 경로가 휘어서 약 5.2 mm부터는 FGHAZ를 따라 균열이 성장하게 된다. Fig. 9에 보인 하중유지 시간이 3600초인 경우에는 시험 초기부터 균열이 CGHAZ 부위에서 FGHAZ 부위로 휘어서 FGHAZ를 따라 성장하므로 시험 중 얻은 거의 모든 균열성장 데이터가 FGHAZ부에 균열이 있는 경우의 균열 성장 거동을 나타내고 있다. 이러한 경향은 다른 시편의 경우에도 마찬가지이다. 즉, 크리프 변형이 우세해지면 균열성장 경로는 결국은 FGHAZ를 따라 형성되게 됨을 알 수 있었다. 이는 실기에서 장시간 사용되어 크리프 변형이 누적되었을 때, FGHAZ를 따라 Type IV 균열이 형성되는 관찰 결과와 일치하는 것이다.

Fig. 7의 크리프-피로 균열성장 실험데이터를 하중유지 시간과 관계없이 CGHAZ 내에서 성장하는 경우에는 Δ , \circ , \square 표시로 FGHAZ를 따라 성장한 때에 측정된 데이터를 \bullet , \blacksquare 표시로 나타내어 Fig. 10에 도시하였다. Fig. 10에서 알 수 있는 것과 같이 HAZ 내에서도 균열이 FGHAZ를 따라 성장할 때의 균열성장율이 CGHAZ 내에서 성장할 때 보다 더 높은 경향을 보임을 알 수 있다. 따라서 실기의 크리프-피로 균열성장 거동을 예측하기 위해서는 FGHAZ를 따라 성장한 경우의 데이터인 \bullet , \blacksquare 표시 데이터를 모델링한 식(1)을 사용하여야 할 것이다.

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{avg} = 7.05 \times 10^{-4} (C_t)_{avg}^{0.519} \quad (1)$$

4. 결 론

CrMo강 HAZ에 존재하는 균열이 크리프-피로 하중을 받을 때의 균열성장율, $(da/dt)_{avg}$, 와 $(C_t)_{avg}$ 의 관계를 실험적으로 측정하여 다음의 결론을 얻었다.

본 연구조건에서 1Cr-0.5Mo 강인 경우 크리프 저항성은 용접재가 가장 높고 모재가 가장 낮았다. 따라서 HAZ를 따라 성장하는 크리프-피로 균열성장율을 특성화하는 C_t 변수의 계산은 용접재와 모재의 크리프 물성 모두를 사용하여 계산하여야 하지만 용접재의 재료물성을 얻기 어려운 경우에는 모재의 크리프 물성만을 사용하여 계산하여도 균열성장율 예측모델의 오차는 크지 않다.

HAZ에서 크리프 변형이 우세한 조건에서 균열성장이 발생할 때에는 균열은 FGHAZ 부위를 따라 성장하는 경향이 있으며 CGHAZ 부위를 따라 균열이 성장할 때의 균열성장율보다 FGHAZ 부위의 균열성장율이 높다. 따라서 수명평가를 위한 균열성장율 모델은 FGHAZ 부위의 균열성장율을 사용하여 정립하여야 한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 산하 산업설비 안전성평가 연구센터(SAFE) 및 한국표준과학연구원 산업측정표준부 방재기술연구센터의 1999년도 출연연구 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사 드립니다.

5. 참고 문헌

- (1) 윤기봉, 김광웅, 백운봉 : 저합금강 용접부의 크리프 균열성장거동 모델링, 대한기계학회 논문집 A권, 제22권 제12호, (1998) pp. 2153-2162
- (2) 윤기봉, 김광웅, 정용근 : 용접 계면균열의 크리프 균열성장 거동에 관한 연구, 대한용접학회지, 제16권 제4호, (1998) pp. 339-347
- (3) 백운봉, 윤기봉, 이해무, 서창민 : CrMo강 용접계면균열의 크리프-피로 균열성장거동, 대한기계학회 논문집 투고중 (2000)
- (4) P. S. Grover : Creep-Fatigue Crack Growth in Cr-Mo-V Base Metal and Weldment, Ph. D Thesis, Georgia Institute of Technology (1996)
- (5) 백운봉, 윤기봉, 이해무, 서창민 : 용접부 고온 재료물성에 대한 실험적 연구, 대한기계학회 논문집 투고중 (2000)
- (6) 윤기봉, 심현우, 신영의 : 고온 크리프 조건에서 용접계면 균열의 C_t 매개변수에 대한 수치 해석적 연구, 대한기계학회 논문집 A권, 제22권 제12호, (1998) pp. 2239-2246
- (7) 윤기봉, 이진상 : 재료의 소성거동을 고려한 용접계면균열의 C_t 매개변수의 평가, 대한기계학회 논문집 A권, 제24권 제3호, (2000) pp. 676-684
- (8) K. B. Yoon, A. Saxena and D. L. McDowell, : Influence of Crack-Tip Plasticity on Creep-Fatigue Crack Growth, Fracture Mechanics, ASTM STP 1131, (1992), pp. 367~392
- (9) M. S. Shamms : Metallographic methods for predicting the remanent life ferritic coarse-grained weld heat affected zones subject to creep cavitation, Int. Conf. on Life Assessment and Extension, Hauge, Netherlands, 13-15 June, (1988)
- (10) ASTM Standard, E 1457-92, Standard Test Method for Measurement of Creep Crack Growth Rates in Metals, (1994)
- (11) K. B. Yoon and K. Y. Kim : High Temperature Fracture Parameter C_t for a Weld Interface Crack, Theoretical and Applied Fracture Mechanics Journal, Vol 32, (1999) pp. 27-35,
- (12) K. B. Yoon, A. Saxena and P. K. Liaw : Characterization of Creep-Fatigue Crack Growth Behavior under Trapezoidal Waveshape Using C_t -parameter, Int. J of Fracture, Vol 59 No.2 (1993) pp. 95-114

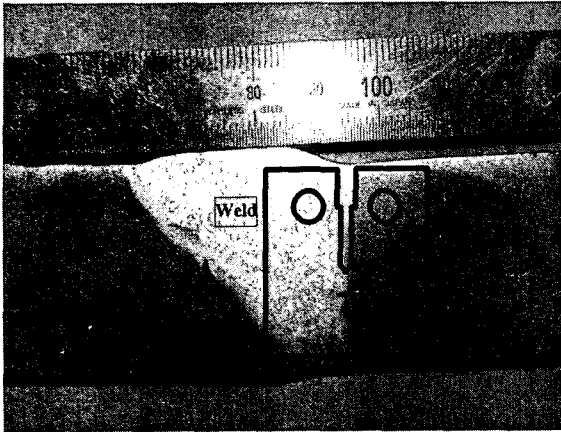


Fig. 1 Specimen location in welded block.



Fig. 2 Microstructure of 1Cr0.5Mo simulated CGHAZ.

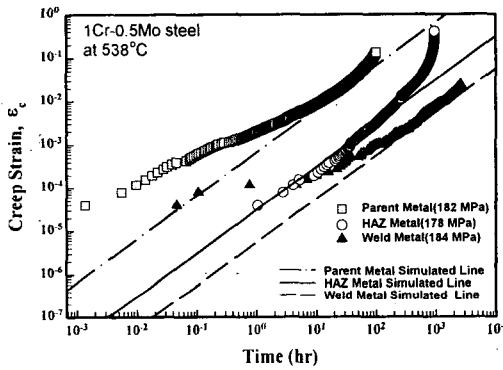


Fig. 3 Creep curves of parent, HAZ and weld metals.

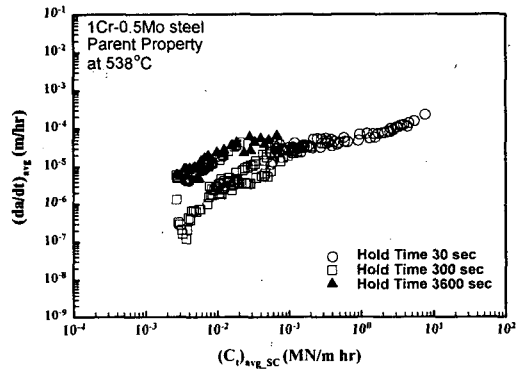


Fig. 4 Creep-fatigue crack growth rates related with C_I estimated from parent metal creep properties.

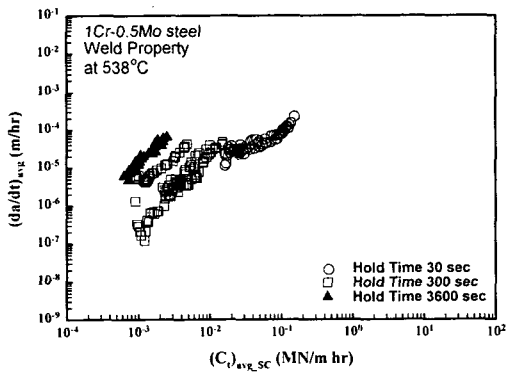


Fig. 5 Creep-fatigue crack growth rates related with C_I estimated from weld metal creep properties.

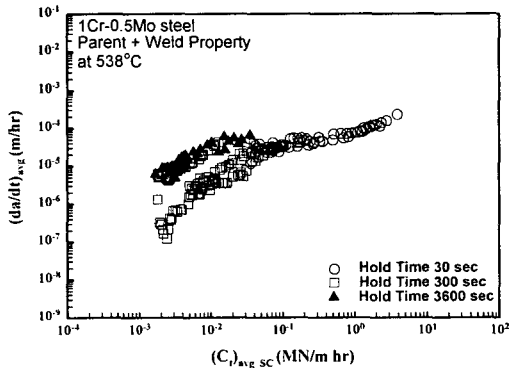


Fig. 6 Creep-fatigue crack growth rates related with C_I estimated from both of parent and weld metal properties.

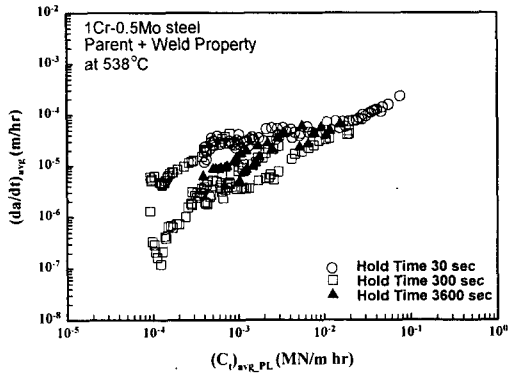


Fig. 7 Creep-fatigue crack growth rates related with C_t considering crack tip plasticity.

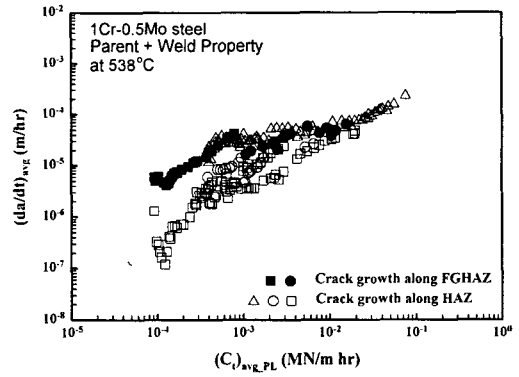


Fig. 10 Creep-fatigue crack growth data when crack growth along fine grain heat affected zone.

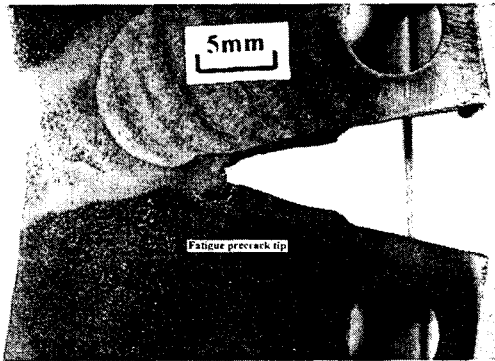
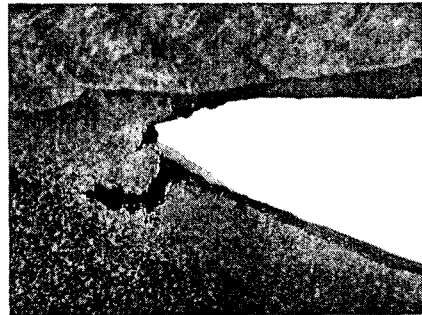


Fig. 8 Crack path for test with 300 second.



enlarged view

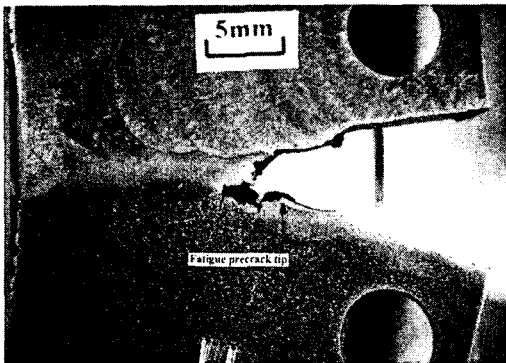
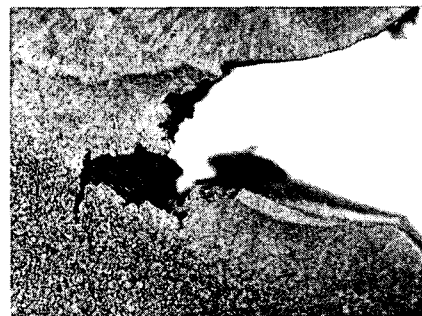


Fig. 9 Crack path for test with 3,600 second.



enlarged view