

Mod.9Cr-1Mo鋼の疲労特性

— 大気中低サイクル疲労試験結果 —

1993年2月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

Mod.9Cr-1Mo鋼の疲労特性

— 大気中低サイクル疲労試験結果 —

古川智弘* , 小峰龍司* , 吉田英一*
和田雄作*

要 旨

現在、FBR大型炉一体貫流型蒸気発生器に適用が予定されているMod.9Cr-1Mo 鋼について、基本材料特性を把握するために大気中高温低サイクル疲労試験を実施した。試験は、製品形状の異なる3鋼種（伝熱管相当板12mmt，鋼板25mmt，鍛鋼品250mmt）について、試験温度（450～650℃），ひずみ範囲（0.4～1.2%），試験片採取位置および方向をパラメータにした。

得られた試験結果は、以下の通りである。

- (1) Mod.9Cr-1Mo 鋼は、「もんじゅ」SGに適用された2.25Cr-1Mo鋼と同様、初期時に若干応力が增大するが繰返しに伴い応力が低下する傾向が認められ、いわゆる繰返し軟化挙動を示した。
 - (2) 低サイクル領域での疲労強度は、現行暫定基準が採用している「もんじゅ」材料強度基準の2.25Cr-1Mo鋼の最適疲労線図より、十分に優れた強度を有しており、SUS304に匹敵するものであった。また、同じ9Cr系鋼である9Cr-2Mo 鋼，低C-9Cr-1Mo-Nb-V鋼と比較しても、低ひずみ領域で優れた疲労強度を有していることがわかった。
 - (3) 鍛鋼品の寿命にばらつきが発生した。採取位置および採取方向の影響の有無を調べた結果、明瞭な特性の差異は認められず、バラツキの範囲として整理できるものであった。
- 以上、本試験によりMod.9Cr-1Mo 鋼の鋼板および鍛鋼品の大気中疲労特性を把握することができた。これらのデータは、平成4年度の暫定的な設計疲労線図の改定および強度評価手法の高度化に反映された。

* 大洗工学センター 機器構造開発部 材料開発室

Fatigue properties of Mod.9Cr-1Mo steel
—Result of low-cycle fatigue test in air—

Tomohiro Furukawa* , Ryuji Komine*
Eiichi Yoshida* , Yusaku Wada*

Abstract

Mod.9Cr-1Mo steel is a candidate material of once-through type steam generators for the Fast Breeder Reactors, and it is required to clarify low-cycle fatigue properties in air at high temperature on this material for structural design. So the tests were carried out for three heats (12mmt plate, 25mmt plate and 250mmt forged) on conditions that temperature is 450~650°C and strain range is 0.4~1.2%.

Results obtained are summarized as follows.

- (1) For cyclic stress-strain behavior of Mod.9Cr-1Mo steel cyclic hardening was observed in the early stage, and after that changed to softening to failure. The behavior was similar to normalized and tempered 2.25Cr-1Mo steel.
- (2) Low-cycle fatigue strength of Mod.9Cr-1Mo steel in air was remarkably higher than that of 2.25Cr-1Mo steel, and almost same as much as that of SUS304 steel. Moreover, fatigue life of Mod.9Cr-1Mo steel was longer than that of 9Cr-2Mo or Low C-9Cr-1Mo-Nb-V steel under low strain conditions.
- (3) In the case of Mod.9Cr-1Mo forged steel, the influence of the sampling position and direction of specimens was not effective.

These results were reflected to prepare of tentative material strength standard in 1992.

* Materials Development Section, Systems and Components Division, OEC/PNC

目 次

| | |
|---|----|
| 1. まえがき | 1 |
| 2. 試験方法 | 2 |
| 2.1 供試材 | 2 |
| 2.2 試験片 | 2 |
| 2.3 試験装置 | 2 |
| 2.4 疲労試験方法 | 3 |
| 2.5 試験後の材料解析 | 3 |
| 3. 試験結果および検討 | 4 |
| 3.1 外観観察 | 4 |
| 3.2 繰り返しに伴う応力の変化 | 4 |
| 3.3 疲労寿命 | 5 |
| 3.4 破面およびマイクロ組織観察 | 6 |
| 4. まとめ | 7 |
| 参考文献 | 8 |
| 付 録 | 50 |
| 付録A 低C-9Cr-1Mo-Nb-V鋼の低サイクル疲労試験データ | 50 |
| 付録B 9Cr-2Mo 鋼の低サイクル疲労試験データ | 50 |

LIST OF TABLE

| | | |
|---------|---|----|
| Table 1 | Chemical composition and Mechanical properties of Mod. 9Cr-1Mo steel (12mmt, F2) | 9 |
| Table 2 | Chemical composition and Mechanical properties of Mod. 9Cr-1Mo steel (250mmt, F4) | 10 |
| Table 3 | Chemical composition and Mechanical properties of Mod. 9Cr-1Mo steel (25mmt, F6) | 11 |
| Table 4 | Specification of fatigue testing machine | 12 |
| Table 5 | Low cycle fatigue test conditions for Mod. 9Cr-1Mo steel | 12 |
| Table 6 | Low cycle fatigue data on Mod. 9Cr-1Mo steel(F2) | 13 |
| Table 7 | Low cycle fatigue data on Mod. 9Cr-1Mo steel(F4) | 14 |
| Table 8 | Low cycle fatigue data on Mod. 9Cr-1Mo steel(F6) | 15 |

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Fatigue test specimen in air 16

Fig. 2 Method of electron beam welding 16

Fig. 3 Sampling method of fatigue test specimen of Mod. 9Cr-1Mo
steel forging 17

Fig. 4 Details of fatigue test section in air 18

Fig. 5 Schematic diagram of fatigue testing machine in air 18

Fig. 6 Loading waveform(a) and hysteresis loop(b) 19

Fig. 7 Definition of failure point (A, B, C) 20

Fig. 8 Cyclic stress range response of Mod. 9Cr-1Mo
steel(F2) at 450°C in air 21

Fig. 9 Cyclic stress range response of Mod. 9Cr-1Mo
steel(F2) at 500°C in air 21

Fig. 10 Cyclic stress range response of Mod. 9Cr-1Mo
steel(F2) at 550°C in air 22

Fig. 11 Cyclic stress range response of Mod. 9Cr-1Mo
steel(F2) at 600°C in air 22

Fig. 12 Cyclic stress range response of Mod. 9Cr-1Mo
steel(F4) at 500°C in air 23

Fig. 13 Cyclic stress range response of Mod. 9Cr-1Mo
steel(F4) at 550°C in air 23

Fig. 14 Cyclic stress range response of Mod. 9Cr-1Mo
steel(F4) at 550°C in air 24

Fig. 15 Cyclic stress range response of Mod. 9Cr-1Mo
steel(F6) at 450°C in air 24

Fig. 16 Cyclic stress range response of Mod. 9Cr-1Mo
steel(F6) at 500°C in air 25

Fig. 17 Cyclic stress range response of Mod. 9Cr-1Mo
steel(F6) at 550°C in air 25

Fig. 18 Cyclic stress range response of Mod. 9Cr-1Mo
steel(F6) at 600°C in air 26

Fig. 19 Cyclic stress range response of Mod. 9Cr-1Mo
steel(F6) at 650°C in air 26

| | | |
|---------|--|----|
| Fig. 20 | Cyclic peak stress-strain relations of Mod. 9Cr-1Mo steel(F2) in air | 27 |
| Fig. 21 | Cyclic peak stress-strain relations of Mod. 9Cr-1Mo steel(F4) in air | 27 |
| Fig. 22 | Cyclic peak stress-strain relations of Mod. 9Cr-1Mo steel(F6) in air | 28 |
| Fig. 23 | Relation between total strain range and fatigue life at 450°C in air | 29 |
| Fig. 24 | Relation between total strain range and fatigue life at 500°C in air | 30 |
| Fig. 25 | Relation between total strain range and fatigue life at 550°C in air | 31 |
| Fig. 26 | Relation between total strain range and fatigue life at 600°C in air | 32 |
| Fig. 27 | Relation between total strain range and fatigue life at 650°C in air | 33 |
| Fig. 28 | Influence of temperature on fatigue life of Mod. 9Cr-1Mo steel(F2) | 34 |
| Fig. 29 | Influence of temperature on fatigue life of Mod. 9Cr-1Mo steel(F4) | 35 |
| Fig. 30 | Influence of temperature on fatigue life of Mor-1Mo steel(F6) | 36 |
| Fig. 31 | Comparison between observed and averaged life at 450°C in air | 37 |
| Fig. 32 | Comparison between observed and averaged life at 500°C in air | 37 |
| Fig. 33 | Comparison between observed and averaged life at 550°C in air | 38 |
| Fig. 34 | Comparison between observed and averaged life at 600°C in air | 38 |

LIST OF PHOTOGRAPHS

| | | |
|-----------|---|----|
| Photo. 1 | Appearance of fractured fatigue specimens (1) | 39 |
| Photo. 2 | Appearance of fractured fatigue specimens (2) | 40 |
| Photo. 3 | Appearance of fractured fatigue specimens (3) | 41 |
| Photo. 4 | Appearance of fractured fatigue specimens (4) | 42 |
| Photo. 5 | Appearance of fractured fatigue specimens (5) | 43 |
| Photo. 6 | Observation on the fracture surface of Mod. 9Cr-1Mo steel by SEM (HTH6B2) | 44 |
| Photo. 7 | Observation on the fracture surface of Mod. 9Cr-1Mo steel by SEM (HTH6A0) | 45 |
| Photo. 8 | Observation on the fracture surface of Mod. 9Cr-1Mo steel by SEM (HTH6B6) | 46 |
| Photo. 9 | Observation on the fracture surface of Mod. 9Cr-1Mo steel by SEM (HTH 6B0) | 47 |
| Photo. 10 | Observation on the fracture surface of Mod. 9Cr-1Mo steel by SEM (HTH6 C0) | 48 |
| Photo. 11 | Microstructure of vertical sectioned fatigue specimen after test | 49 |

1. ま え が き

高速原型炉「もんじゅ」の蒸気発生器（SG）は、高圧水から高圧蒸気に変換する蒸発器と高圧蒸気をさらに過熱する過熱器の2系統に分離されている。蒸発器には、応力腐食割れ（SCC）に強いフェライト系の2.25Cr-1Mo鋼（NT材）を使用し、過熱器には高温強度を有しているオーステナイト系鋼の中でSCCにも優れたSUS321鋼が採用されている⁽¹⁾。「もんじゅ」以降の大型高速炉では、信頼性の向上を図りつつ、経済性に優れた一体貫流型蒸気発生器を採用する予定になっている^{(2) (3)}。これに適用する材料としてはSCCに強く、かつ高い高温強度や優れた耐熱応力性を有している高クロム系鋼の適用が検討されてきた^{(1) (4)}。

本試験では、現在実証炉のSGで適用が有力視されているMod. 9Cr-1Mo 鋼の高温疲労特性を把握するため、伝熱管相当板、圧延鋼板および管板用鍛鋼品について、大気中低サイクル疲労試験を実施した。

本報では、ひずみ範囲、試験温度をパラメータにした高温疲労特性および採取位置ならびに採取方向の違いによる鍛鋼品の疲労寿命への影響について報告する。

なお、本報をまとめるに当たっては、「もんじゅ」で使用された主要構造材SUS304、2.25Cr-1Mo鋼との比較する方法をとった。

2. 試験方法

2.1 供試材

供試材には、一体貫流型蒸気発生器材料として適用が予定されているMod. 9Cr-1Mo 鋼 (NT材) で、製品形状の異なる伝熱管相当鋼板 (板厚: 12mm, 識別番号: F 2), 鍛鋼品 (板厚: 250mm, 識別番号: F 4) および圧延鋼板 (板厚: 25mm, 識別番号: F 6) を用いた。供試材の化学成分, 熱処理条件および機械的性質をそれぞれTable 1~3に示す。試験には、いずれも応力除去焼鈍処理 (SR) を740°C×8.4hrの条件下で施したものを供した。

2.2 試験片

試験片形状は、平行部長さ (G.L) 25mm, 平行部直径10mmの中実丸棒試験片である。疲労試験片形状をFig. 1に示す。伝熱管相当鋼板および圧延鋼板からの試験片の採取は、試験片平行部が圧延方向に対して平行になるようにした。なお、伝熱管相当鋼板については、板厚が試験片のつかみ部 ($\phi 26\text{mm}$) よりも12mmと薄いことから、つかみ部を含めた試験片の採取ができない。このため、つかみ部については同材質の別材料より採取し、これをFig. 2に示すように平行部のR部近傍で溶接を施した後、試験片を製作した。溶接には平行部の熱影響を極力小さくするために電子ビーム溶接 (EB) 法を用いた。

試験片加工後は特に熱処理を行わず、平行部の表面は加工時における周方向のキズを除去するため、エメリー紙 (# 400) を用いて軸方向に研磨仕上げ処理を施した。

鍛鋼品については、採取位置および採取方向による疲労寿命への影響を調べるため、Fig. 3に示す要領にて試験片を採取した。

2.3 試験装置

本試験に使用した試験機は、最大負荷容量 $\pm 5\text{ ton}$ の電気油圧サーボ式単軸引張・圧縮型疲労試験機である。軸ひずみ測定には押し当て型ひずみ計 (GL=20mm) を用い、試験片平行部の変位量を直接測定した。試験片の加熱には、電気抵抗炉型加熱炉を用い、試験片平行部における軸方向の温度分布を $\pm 3^\circ\text{C}$ 以内とした。

使用した試験機の仕様をTable 4に、試験機の概略をFig. 4およびFig. 5に示す。

2.4 疲労試験方法

本試験では、主として疲労特性に及ぼす温度依存性を確認するための試験を実施するとともに、鍛鋼品については試験片採取位置、採取方向をもパラメータにし、これらの違いによる疲労特性の影響を確認するための試験も実施した。

本試験における大気中疲労試験条件をTable 5に示す。試験は、平均ひずみ零の単軸引張圧縮の三角波で、0.1%/secの定ひずみ速度制御で実施した (Fig. 6 参照)。試験温度は 450°C～ 650°C、ひずみ範囲は 0.4%～ 1.2%の範囲内である。

制御用熱電対を試験片平行部にスポット溶接した場合、その部位からき裂が発生し、疲労寿命の低下を招く恐れがある⁽⁶⁾。このため、制御熱電対は平行部外のR部に溶接することとした。なお、試験温度の設定は平行部にモニター用として熱電対を縛り付け、モニター温度が試験温度になるように制御温度を設定した。

軸ひずみは室温の温度変化に伴ってゆらぎ等の影響を受けやすい。このため、試験装置の全体を風防で覆うことによって室温変動をできるだけ小さくし (±2°C以内)、試験中における軸ひずみのふらつきを最小に抑えた。試験中の荷重、軸ひずみと繰返し数との関係は、レコーダーに記録するとともに、小型計算機を用いて常時オンラインデータサンプリングを行った。

破断回数は、引張荷重が定常値から約25%減少した時点を破断と定義し、その時の繰返し数を破断繰返し数 (N_f) とした。試験片の破断位置は、Fig. 7に示すように平行部中心より±5mmをA破断、平行部中心より±10mmをB破断 (ただしA破断を除く)、およびそれ以外での破断をC破断と定義した。

これら疲労試験方法の詳細については、小峰らの報告⁽⁶⁾を参照されたい。

2.5 試験後の材料解析

破断後試験片については破断位置や破断形態等を目視により観察した。また、光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて、代表的な破断試験片のき裂近傍の断面マイクロ組織および主き裂の破面形態等を観察した。

3. 試験結果および検討

3.1 外観観察

試験後の疲労試験片の外観写真をPhoto 1～5に示す。

疲労破損後の試験片は、試験前の光沢色がなくなり、酸化の影響により黒色化していた。その度合いは高温側の方がより著しくなっていた。主き裂の状況は目視により観察することができた。破断位置をみると本試験では大半がGL内破断（A破断あるいはB破断）であった。ただし、鍛鋼品（F4）の場合は、B破断のケースが多く、中にはC破断のケースも数点みられた。試験温度およびひずみ範囲の差異による破断位置への明確な影響は認められなかった。なお、本報告ではGL内破断であるA破断、B破断を有効試験データとして取扱い、C破断は、参考データとして取り扱うこととした。

3.2 繰返しに伴う応力の変化

繰返し数に対する応力の挙動をヒート、試験温度別にFig. 8からFig. 19に示す。

Mod. 9Cr-1Mo 鋼の繰返し応力挙動は、極初期時（～20サイクル）に応力がやや増大するが繰返しの増加に伴い応力が低下する傾向が認められ、いわゆる繰返し軟化材であることがわかる。繰返し軟化の挙動は試験温度が高くなるほど、あるいは繰返しのひずみ範囲が大きくなるほど顕著に認められた。また、繰返しの極初期時の硬化挙動は試験温度が低く、ひずみ範囲が比較的大きな条件下で認められた。このような傾向は製品形状によらず、3ヒートとも同様であり、2.25Cr-1Mo鋼の特性⁽⁶⁾⁽⁷⁾と類似していた。

初期応力ならびに繰返し中における応力値は伝熱管相当鋼板と圧延鋼板とでほとんど同じであった。鍛鋼品の場合は、上記の鋼板に比較すると各ひずみ範囲と数 kg/mm^2 程度応力が低下する傾向を示した（Fig. 12～14参照）。これは同一ヒートを用いた高温引張試験の結果⁽⁸⁾と対応している。また、鍛鋼品の試験片採取方向および採取位置違いにより、初期ならびに繰返し中の応力にバラツキが生じ、その範囲は約 $5 \text{ kg}/\text{mm}^2$ であった。

繰返し破断回数の1/2サイクル時における応力と塑性ひずみ範囲との関係をヒー

ト毎にFig. 20からFig. 22に示す。試験温度が高くなるに従って、ひずみ範囲の増加に伴う応力の増加率は小さくなる傾向を示した。また、650℃では塑性ひずみ範囲の増加に対しても応力はほとんど増加しない結果を示した。

3.3 疲労寿命

大気中低サイクル疲労試験結果をTable 6からTable 8に、 $\Delta \epsilon_t - N_f$ の関係を温度ごとにFig. 23からFig. 27に示す。本鋼との疲労寿命の比較のために、材料強度基準⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾で規定された代表的な鋼種としてSUS304および2.25Cr-1Mo鋼の最適疲労線図を併せて示した。現行の暫定基準では、通商産業省告示 501号において、低合金鋼に対して単一の設計疲労線図を与えていることを踏まえて2.25Cr-1Mo鋼の設計疲労線図を適用しているが、今回の検討結果から、むしろSUS304と類似した特性を有することがわかった。この成果は平成4年度の暫定基準に反映された。

本試験で得られたMod. 9Cr-1Mo 鋼の疲労強度は、全般的に「もんじゅ」SGで使用されている2.25Cr-1Mo鋼よりも優れており、おおむね50℃高い強度を示した。また、SUS304鋼の最適疲労曲線とほぼ同等の強度を示した。また、同じ9Cr系鋼である低C-9Cr-1Mo-Nb-V鋼(6.付録 Fig. A1参照)、9Cr-2Mo鋼(Fig. A2~A3参照)と比較して、長寿命側すなわち低ひずみ範囲になるほどMod. 9Cr-1Mo 鋼の方が優れた疲労強度を有していた。

試験温度に対する疲労寿命の影響をFig. 28からFig. 30に示す。伝熱管相当鋼板、圧延鋼板および鍛鋼品の各ヒートとも試験温度の上昇に伴って疲労寿命が低下傾向を示し、疲労寿命に対する温度依存性が認められた。この温度上昇に伴う疲労寿命の低下率は各ヒートともひずみ範囲が小さく、すなわち長寿命試験になるにしたがって小さくなっていった。

低サイクル領域で精度良く、かつ簡易的に疲労寿命の平均線を算出できるManson-Coffin則を用いて、ヒートの違いおよび鍛鋼品の採取位置と採取方向による疲労寿命への影響を調べた。結果をFig. 31からFig. 34に示す。450℃、500℃、600℃では、Manson-Coffin 則⁽¹¹⁾により、簡易的に近似した平均疲労線図で良く記述することができた。しかし、鍛鋼品(F4ヒート)の採取位置及び方向をパラメータにした試験結果をもプロットし、近似した550℃の結果では、線図に対してバラツキの程

度が大きくなった。鍛鋼品の試験によるこのバラツキは、採取位置および採取方向には寿命の長短が発生する原因が認められず、また、このバラツキは線図に対して factor of 2 の範囲に収まっていることから、鍛鋼品の採取位置及び方向の違いによる疲労寿命への影響はバラツキの範囲として整理できるものと考えられる。

3.4 破面およびマイクロ組織観察

各試験温度で得られた比較的長時間領域 ($\Delta \varepsilon t=0.5\%$) の試験片について、破面観察ならびに破断部近傍の断面のマイクロ組織観察を実施した。代表的な F 6 ヒートの破面観察の写真を Photo. 6 から Photo. 10 に示す。き裂起点部や初期き裂進展部では、フェライト鋼特有の大气による高温酸化が著しく、これらの近傍部における破壊形態は識別しにくかった。しかし、起点部より 2~3 mm 進展した部位での破面では、疲労破壊特有のストライエーションが観察され、この間隔はき裂の進展に伴って内部ほど大きくなっていった。

550°C の同一ひずみ条件下での代表的な断面マイクロ組織を Photo. 11 に示す。今回観察した範囲内では、主き裂以外のき裂（マイクロクラックなど）の発生はほとんど観察されなかった。通常、SUS304 や 2.25Cr-1Mo 鋼の疲労き裂進展は試験片表面に微細なき裂が発生し、成長した後合体して主き裂となり破損に至ることが多い⁽¹²⁾。この場合には、主き裂部以外にも微細なき裂が試験片断面観察により見られる。本試験で主き裂以外のき裂がほとんど観察されなかった原因としては、B 破断のケース [Photo. 11(a), (b)] では押し当て型ひずみ計の試験片に対する接触力が大きく、その部位に応力が集中してき裂が発生したことなどが考えられた。しかし、上記と同一条件下の A 破断のケース

[Photo. 11(c)] においても同様な結果が認められていることから材料等の他の要因が考えられる。これらについては、さらに詳細な冶金的解析を進めていき原因を究明していく必要がある。これは今後の課題のひとつである。

4. ま と め

F B R大型炉一体貫流型蒸気発生器材として適用が予定されているMod. 9Cr-1Mo 鋼について、大気中低サイクル疲労試験を実施し、高温疲労特性を把握した。試験には、鋼板（12mmt, 25mmt : 2 ヒート）と鍛鋼品（250mmt : 1 ヒート）の計 3 ヒートを用いた。試験温度は400～650℃、ひずみ範囲は0.4～1.2%である。

主な試験結果は以下の通りである。

- (1) Mod. 9Cr-1Mo 鋼の鋼板および鍛鋼品について、450℃～650℃の温度範囲で、最長約 10^{-5} cyclesまでの高温疲労特性データ54点を取得した。
- (2) Mod. 9Cr-1Mo 鋼は、繰返しに伴い応力が徐々に低下する、いわゆる繰返し軟化挙動を示した。これは、高温、高ひずみ範囲になるほど顕著であり、3 ヒートとも同様であった。
- (3) Mod. 9Cr-1Mo 鋼は、いずれのヒートも同一条件下での2. 25Cr-1Mo鋼のそれらよりも約150℃高い疲労強度を示し、SUS304並みの疲労強度を有していることが判った。また、同じ9 Cr系鋼である9Cr-2Mo鋼や低C-9Cr-1Mo-Nb-V鋼よりも低いひずみ範囲側で高い疲労強度を有していた。
- (4) 本試験の範囲内では、疲労強度に対する温度依存性が認められた。ただし、この依存性は長寿命側になるほど小さくなる傾向が認められた。
- (5) 採取位置（板厚方向）や採取方向をパラメータにした鍛鋼品の試験では、疲労寿命に若干の差異が認められたが、この寿命の長短には採取位置および方向などによる寿命の長短の一連性が認められなかった。しかし、これらの寿命の差異は、Manson-Coffin則により近似した寿命線に対してfactor of 2の範囲内であった。

疲労特性に関する今後の課題としては、Mod. 9Cr-1Mo 鋼を実機に適用するにあたって、最適疲労線図の策定が先決である。このため、温度依存性を記述するための低温度領域での疲労試験を実施するとともに、低ひずみ領域のデータを取得する高サイクル疲労試験、ひずみ速度依存性を確認するための低ひずみ速度疲労試験を随時実施する必要がある。

終わりに、本試験の実施およびデータ整理に協力していただいた常陽産業(株)石上勝夫氏、川島成一氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 二瓶, 高速増殖炉用構造材料における高モリブデン鋼の適用, 原子力工業 vol. 33, No. 3 (1987)
- 2) 中川, 高速実証炉開発の現状, 日本原子力学会誌 vol. 30 No. 11(1988)
- 3) M. Motooka, J. Kubota, et al, Evaluation study on Mod. 9Cr-1Mo steel tube integrities of once-through type steam generator, Int. Conf. on Fast Reactor and Related Fuel Cycles(FR' 91), Kyoto, Japan, vol. 4(1991)
- 4) 加納, 和田他, F B R大型炉用構造材料試験基本計画, 動燃技報 No. 50(1984)
- 5) 小峰ら, 高速炉構造材料に関する疲労試験方法の標準化に関する試験技術のまとめ, PNC TN9440 91-004, 1991年 2月
- 6) 土田ら, SUS304鋼, SUS321鋼 および2. 25Cr- 1 Mo鋼の大気中疲労試験, PNC SN941 85-169, 1985年 11月
- 7) 小峰ら, SUS304鋼, 2. 25Cr- 1 Mo鋼の大気中疲労試験, PNC SN9410 89-147, 1989年10月
- 8) 青木ら, 高クロムモリブデン鋼の基本材料特性試験 (I), PNC SN9410, 90-12, 1990年 6月
- 9) 高速原型炉高温構造設計方針 材料強度基準等, PNC N241 84-08(1)(2), 1984年 9月
- 10) 解説 高速原型炉高温構造設計方針 材料強度基準等, PNC SN241 85-08, 1985年 3月
- 11) 例えば, 樋口ら, F B R蒸気発生器伝熱管用材料の水/蒸気中疲労特性評価試験, PNC SJ9150 90-002, 1990年12月
- 12) 小峰ら, 高温流動ナトリウム中におけるナトリウム浸漬材の低サイクル疲労特性 (I), PNC SN9410 89-148, 1989年10月

Table 1 Chemical composition and Mechanical properties of Mod.9Cr-1Mo steel(12mmt, F2)

| Heat treatment | |
|-----------------|----------------------------|
| Normalized | 1050°C, 0.83hr, air cool |
| Tempered | 780°C, 1.00hr, air cool |
| Stress Relieved | 740°C, 8.4hr, furnace cool |

| Chemical compositions | | (wt%) | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|--|-------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|------|--------|
| | | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo | Nb | Al | V | N |
| Ladle | | 0.10 | 0.39 | 0.41 | 0.013 | 0.001 | 0.06 | 8.77 | 0.96 | 0.087 | 0.011 | 0.20 | 0.0502 |
| Check | | 0.10 | 0.40 | 0.43 | 0.014 | 0.001 | 0.07 | 0.73 | 0.96 | 0.09 | 0.013 | 0.22 | 0.051 |

| Mechanical properties | | | | | |
|-----------------------|--|--|--|--------------------------|-------------------------------|
| | | 0.2%yield Strength (kg/mm ²) | Tensile Strength (kg/mm ²) | Elong after fracture (%) | Percent reduction in area (%) |
| SR * | | 49.7 | 69.3 | 29.7 | 74.3 |
| without SR | | 51.6 | 70.2 | 27.3 | 73.0 |

*SR 740°C, 10.6hr, F.C.

Table 2 Chemical composition and Mechanical properties of Mod.9Cr-1Mo steel(250mmt, F4)

| Heat treatment | | Quenched 1040°C, 6.00hr, water cool Tempered 760°C, 6.00hr, air cool Stress Relieved 740°C, 8.4hr, furnace cool | | | | | | | | | | |
|-----------------------|--|---|--------------------------|-------------------------------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Chemical compositions | | (wt %) | | | | | | | | | | |
| | C | Si | Mu | P | S | Ni | Cr | Mo | Nb | Al | V | N |
| Ladle | 0.10 | 0.25 | 0.37 | 0.008 | 0.003 | 0.08 | 9.10 | 0.93 | 0.09 | 0.002 | 0.022 | 0.043 |
| Check | 0.10 | 0.25 | 0.37 | 0.008 | 0.003 | 0.08 | 9.10 | 0.93 | 0.09 | 0.002 | 0.022 | 0.043 |
| Mechanical properties | | | | | | | | | | | | |
| | 0.2%yield Strength (kg/mm ²) | Tensile Strength (kg/mm ²) | Elong after fracture (%) | Percent reduction in area (%) | | | | | | | | |
| 0/4t L | 51 *, 50** | 69 *, 67** | 23 *, 25** | 74 *, 74** | | | | | | | | |
| 1/4t L | 51 *, 49** | 68 *, 66** | 24 *, 24** | 74 *, 75** | | | | | | | | |
| 0/4t Z | 50 *, 48** | 68 *, 66** | 25 *, 25** | 73 *, 74** | | | | | | | | |
| 0/2t L | 50 *, 49** | 68 *, 66** | 24 *, 24** | 74 *, 74** | | | | | | | | |
| 0/2t Z | 50 *, 49** | 68 *, 67** | 24 *, 25** | 71 *, 72** | | | | | | | | |
| 0/4t Z | 49 *, 49** | 68 *, 66** | 25 *, 24** | 72 *, 73** | | | | | | | | |

*SR(725°C, 8.4hr, F.C.) **without SR

Table 3 Chemical composition and Mechanical properties of Mod. 9Cr-1Mo steel(25mmt, F6)

| Heat treatment | | Normalized 1050°C, 1.08hr, air cool Tempered 780°C, 1.42hr, air cool Stress Relieved 740°C, 8.4hr, furnace cool | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|------------|---|--|--------------------------------|--|-------|------|------|------|-------|-------|------|--------|
| Chemical compositions | | (wt%) | | | | | | | | | | | |
| | | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo | Nb | Al | V | N |
| Ladle Check | | 0.10 | 0.39 | 0.41 | 0.013 | 0.001 | 0.06 | 8.77 | 0.96 | 0.087 | 0.011 | 0.20 | 0.0502 |
| | | 0.10 | 0.40 | 0.42 | 0.014 | 0.001 | 0.06 | 0.75 | 0.97 | 0.089 | 0.012 | 0.21 | 0.0505 |
| Mechanical properties | | | | | | | | | | | | | |
| | | 0.2%yield Strength (kg/mm ²) | Tensile Strength (kg/mm ²) | Elong after fracture (%) | Percent reduction in area (%) | | | | | | | | |
| | SR * | 49.9 | 68.2 | 26.0 | 69.0 | | | | | | | | |
| | without SR | 52.2 | 69.5 | 27.7 | 68.6 | | | | | | | | |

*SR 740°C, 10.6hr, F.C.

Table 4 Specification of fatigue testing machine

| | Low-cycle Fatigue Testing Machine |
|---------------------|------------------------------------|
| Type of Lading | Uniaxial-Push•Pull |
| Capacity of Loading | ± 5 ton |
| Stroke Renge | Max. 50mm |
| Control Mode | Load, Strain, Stroke |
| Loading Weveform | Sine, Triangular, Ramp & Hold etc. |
| Strain Rate | 1.0%/sec~0.0001%/sec |
| Extensometer | LVDT ±0.5mm GL=20mm |
| Load Cell | max. ±10ton |
| Heating Method | Furnace Heating |
| Temperature | max. 800°C |

Table 5 Low cycle fatigue test conditions for Mod.9Cr-1Mo Steel

| | F2 Heat(12mmt) | F4 Heat(250mmt) | F6 Heat(25mmt) |
|--------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|
| Type of loading | Uniaxial push-pull | → | → |
| Control | Constant strain control | → | → |
| Loading waveform | Traiangular waveform | → | → |
| Strain rate(sec-1) | 1×10^{-3} | → | → |
| Strain range(%) | 0.5, 0.7, 1.0, 1.2 | 0.4, 0.5, 0.7, 1.0 | 0.5, 0.7, 1.0, 1. |
| Temperature(°C) | 450, 500, 550, 600 | 500, 550 | 450, 500, 550, 600, 650 |

Table 6 Low cycle fatigue data on Mod. 9Cr-1Mo steel (F2)

| Hear | Temp °C | TP No. | ϵ %/sec | $\Delta \epsilon t$ % | $\Delta \epsilon p$ % | $\Delta \epsilon e$ % | σ_{max} kg/mm ² | σ_{min} kg/mm ² | σR kg/mm ² | N f cycles | Failuer position |
|------|------------|--------|---------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|---------------|---------------------|
| F 2 | 450 | HUH6B8 | 0.1 | 0.50 | 0.13 | 0.37 | 29.2 | 32.0 | 61.2 | 92178 | B |
| | | HUH6B7 | 0.1 | 0.70 | 0.30 | 0.40 | 31.6 | 34.6 | 66.2 | 10200 | A |
| | | HUH6A4 | 0.1 | 1.00 | 0.60 | 0.40 | 34.4 | 37.3 | 71.7 | 22874 | B |
| | | HUH6B0 | 0.1 | 1.20 | 0.79 | 0.41 | 36.5 | 39.7 | 76.2 | 2349 | A |
| | 500 | HUH6B6 | 0.1 | 0.50 | 0.16 | 0.34 | 27.9 | 30.7 | 58.6 | 25806 | B |
| | | HUH6B1 | 0.1 | 0.70 | 0.35 | 0.35 | 29.3 | 32.1 | 61.4 | 7432 | B |
| | | HUH6A5 | 0.1 | 1.00 | 0.62 | 0.38 | 31.7 | 34.8 | 66.5 | 2546 | B |
| | | HUH6B2 | 0.1 | 0.20 | 0.79 | 0.41 | 32.4 | 35.6 | 68.0 | 1902 | B |
| | 550 | HUH6B5 | 0.1 | 0.50 | 0.20 | 0.30 | 24.2 | 26.8 | 51.0 | 15996 | B |
| | | HUH6A9 | 0.1 | 0.70 | 0.40 | 0.30 | 26.6 | 29.5 | 56.1 | 4938 | A |
| | | HUH6A8 | 0.1 | 1.00 | 0.67 | 0.33 | 27.8 | 30.7 | 58.5 | 2294 | A |
| | | HUH6B3 | 0.1 | 0.20 | 0.84 | 0.36 | 26.9 | 29.9 | 56.8 | 1515 | A |
| | 600 | HUH6A0 | 0.1 | 0.50 | 0.425 | 0.25 | 20.6 | 22.5 | 43.1 | 11392 | B |
| | | HUH6A2 | 0.1 | 0.70 | 0.41 | 0.29 | 21.9 | 22.8 | 44.7 | 4272 | B |
| | | HUH6A7 | 0.1 | 1.00 | 0.72 | 0.28 | 21.9 | 24.8 | 46.7 | 1826 | A |
| | | HUH6B4 | 0.1 | 1.20 | 0.91 | 0.29 | 22.5 | 25.4 | 47.9 | 994 | B |

ϵ (%/sec) : strain rate
 $\Delta \epsilon t$ (%) : total strain range
 $\Delta \epsilon p$ (%) : plastic strain range
 $\Delta \epsilon e$ (%) : elastic strain range
 σ_{max} (kg/mm²) : max. stress
 σ_{min} (kg/mm²) : min. stress
 σR (kg/mm²) : stress range

Table 7 Low cycle fatigue data on Mod.9Cr-1Mo steel (F4)

| Hear | Temp °C | TP No. | Sampling position | $\dot{\epsilon}$ %/sec | $\Delta \epsilon t$ % | $\Delta \epsilon p$ % | $\Delta \epsilon e$ % | σ_{max} kg/mm ² | σ_{min} kg/mm ² | σR kg/mm ² | N f cycles | Failuer position |
|------|------------|---------|----------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|---------------|---------------------|
| 4 F | 500 | HMHGJ9 | t/2, Z | 0.1 | 0.38 | 0.10 | 0.28 | 25.8 | 26.4 | 52.2 | 53876 | B |
| | | HMHGK2 | t/2, Z | 0.1 | 0.40 | 0.10 | 0.30 | 25.5 | 25.6 | 51.1 | 79070 | C |
| | | HMHGK1 | t/2, Z | 0.1 | 0.49 | 0.15 | 0.34 | 25.8 | 26.9 | 52.7 | 35054 | B |
| | | HMHGJ0 | t/2, Z | 0.1 | 0.70 | 0.36 | 0.34 | 28.6 | 29.8 | 58.4 | 7528 | B |
| | | HMHGJ6 | t/2, Z | 0.1 | 1.00 | 0.64 | 0.36 | 30.2 | 31.9 | 62.1 | 2266 | B |
| | 550 | HMHGK0 | t/2, Z | 0.1 | 0.39 | 0.19 | 0.20 | 20.5 | 21.5 | 42.0 | 72230 | A |
| | | HMHGJ4 | t/2, Z | 0.1 | 0.49 | 0.17 | 0.32 | 23.8 | 25.3 | 49.1 | 13779 | B |
| | | HMHGJ5 | t/2, Z | 0.1 | 0.70 | 0.40 | 0.30 | 24.1 | 25.2 | 49.3 | 5934 | A |
| | | HMHGJ1 | t/2, Z | 0.1 | 1.00 | 0.66 | 0.34 | 26.3 | 27.9 | 54.2 | 1389 | B |
| | 550 | HMHG A2 | 0/4t, L, outside | 0.1 | 0.50 | 0.18 | 0.32 | 25.1 | 23.3 | 48.4 | 16489 | C |
| | | HMHG D6 | 0/4t, L, middle | 0.1 | 0.44 | 0.16 | 0.28 | 26.0 | 22.9 | 48.9 | 10490 | B |
| | | HMHG E8 | 1/4t, L, middle | 0.1 | 0.46 | 0.17 | 0.29 | 21.9 | 24.0 | 45.9 | 21014 | B |
| | | HMHG F6 | 1/4t, C, middle | 0.1 | 0.50 | 0.21 | 0.29 | 24.2 | 24.7 | 48.9 | 10217 | B |
| | | HMHG G3 | 1/2t, L, middle | 0.1 | 0.50 | 0.19 | 0.31 | 24.5 | 22.4 | 46.9 | 18606 | B |
| | | HMHG C4 | 1/4t, Z, outside | 0.1 | 0.48 | 0.19 | 0.29 | 23.5 | 25.0 | 48.5 | 10294 | B |
| | | HMHG H5 | 3/4t, L, middle | 0.1 | 0.48 | 0.18 | 0.30 | 22.1 | 23.6 | 45.7 | 17772 | A |
| | | HMHG I3 | 3/4t, C, middle | 0.1 | 0.48 | 0.18 | 0.30 | 22.7 | 24.1 | 46.8 | 18018 | B |
| | | HMHG B3 | 1/2t, L, outside | 0.1 | 0.47 | 0.20 | 0.27 | 28.9 | 25.5 | 49.4 | 7486 | B |

$\dot{\epsilon}$ (%/sec) : strain rate
 $\Delta \epsilon t$ (%) : total strain range
 $\Delta \epsilon p$ (%) : plastic strain range
 $\Delta \epsilon e$ (%) : elastic strain range
 σ_{max} (kg/mm²) : max. stress
 σ_{min} (kg/mm²) : min. stress
 σR (kg/mm²) : stress range

Table 8 Low cycle fatigue data on Mod.9Cr-1Mo steel (F6)

| Hear | Temp °C | TP No. | $\dot{\epsilon}$ %/sec | $\Delta \epsilon t$ % | $\Delta \epsilon p$ % | $\Delta \epsilon e$ % | σ_{max} kg/mm ² | σ_{min} kg/mm ² | σR kg/mm ² | N f cycles | Failuer position |
|------|------------|--------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|---------------|---------------------|
| F 2 | 450 | HTH6B2 | 0.1 | 0.50 | 0.18 | 0.32 | 30.2 | 30.6 | 60.8 | 42639 | B |
| | | HTH6A8 | 0.1 | 0.69 | 0.32 | 0.37 | 32.3 | 33.2 | 65.5 | 8173 | A |
| | | HTH6B1 | 0.1 | 1.00 | 0.61 | 0.39 | 35.1 | 34.4 | 69.5 | 3596 | A |
| | | HTH6C4 | 0.1 | 0.20 | 0.80 | 0.40 | 36.4 | 37.7 | 74.1 | 1710 | A |
| | 500 | HTH6A0 | 0.1 | 0.50 | 0.17 | 0.33 | 28.5 | 28.3 | 56.8 | 16615 | B |
| | | HTH6A1 | 0.1 | 0.70 | 0.36 | 0.34 | 31.5 | 31.6 | 63.1 | 4908 | A |
| | | HTH6A4 | 0.1 | 1.00 | 0.59 | 0.41 | 29.5 | 32.9 | 62.4 | 2904 | A |
| | | HTH6A7 | 0.1 | 1.20 | 0.80 | 0.40 | 31.2 | 33.4 | 64.6 | 1597 | B |
| | 550 | HTH6B6 | 0.1 | 0.50 | 0.20 | 0.30 | 24.2 | 25.0 | 49.2 | 13016 | A |
| | | HTH6B3 | 0.1 | 0.70 | 0.39 | 0.31 | 25.1 | 25.9 | 51.0 | 5087 | A |
| | | HTH6B5 | 0.1 | 1.00 | 0.68 | 0.32 | 27.0 | 27.5 | 54.5 | 2323 | A |
| | | HTH6C6 | 0.1 | 1.20 | 0.84 | 0.36 | 28.8 | 30.1 | 58.9 | 1706 | B |
| | 600 | HTH6B0 | 0.1 | 0.49 | 0.23 | 0.26 | 18.8 | 20.7 | 39.5 | 9853 | B |
| | | HTH6A5 | 0.1 | 0.71 | 0.42 | 0.29 | 21.2 | 21.5 | 42.7 | 4694 | B |
| | | HTH6C1 | 0.1 | 1.00 | 0.71 | 0.29 | 22.6 | 23.7 | 46.3 | 2062 | B |
| | | HTH6A2 | 0.1 | 1.20 | 0.96 | 0.24 | 23.3 | 23.5 | 46.8 | 1307 | A |
| 650 | HTH6C0 | 0.1 | 0.50 | 0.28 | 0.22 | 16.4 | 17.1 | 33.5 | 9857 | B | |
| | HTH6B9 | 0.1 | 0.70 | 0.47 | 0.23 | 16.5 | 17.2 | 33.7 | 3334 | B | |
| | HTH6B7 | 0.1 | 0.96 | 0.78 | 0.18 | 17.0 | 17.9 | 34.9 | 1883 | B | |
| | HTH6C7 | 0.1 | 1.20 | 0.94 | 0.26 | 17.8 | 18.1 | 36.5 | 1065 | B | |

$\dot{\epsilon}$ (%/sec) : strain rate
 $\Delta \epsilon t$ (%) : total strain range
 $\Delta \epsilon p$ (%) : plastic strain range
 $\Delta \epsilon e$ (%) : elastic strain range
 σ_{max} (kg/mm²) : max. stress
 σ_{min} (kg/mm²) : min. stress
 σR (kg/mm²) : stress range

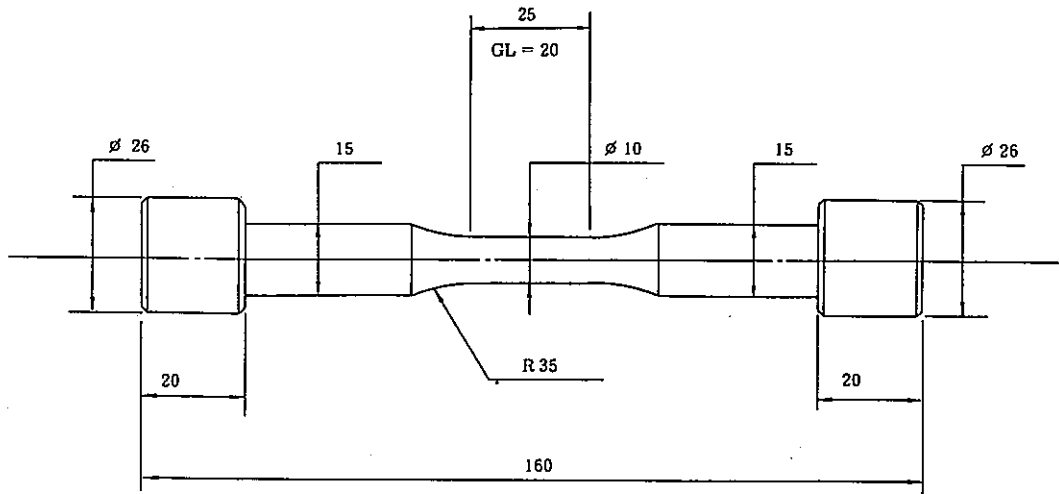


Fig. 1 Fatigue test specimen in air

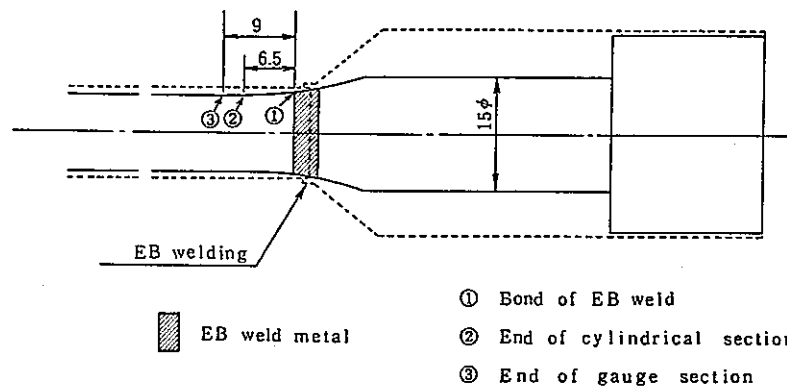


Fig. 2 Method of electron beam welding

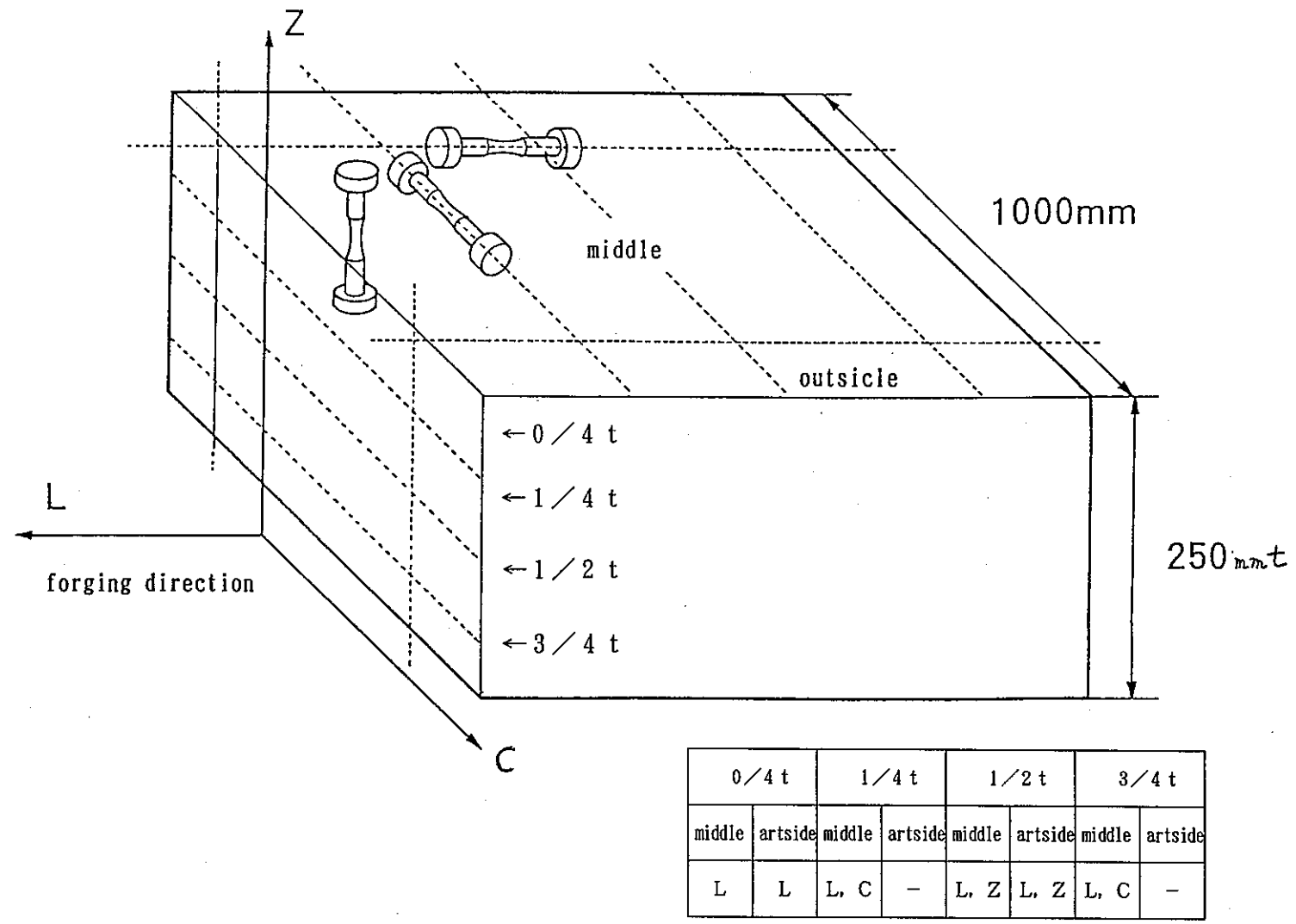


Fig. 3 Sampling method of fatigue test specimen of Mod.9Cr-1Mo steel forging

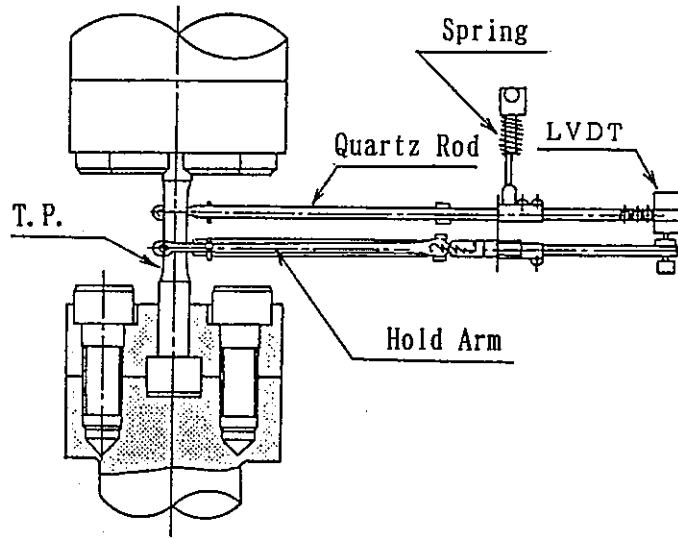


Fig. 4 Details of fatigue test section in air

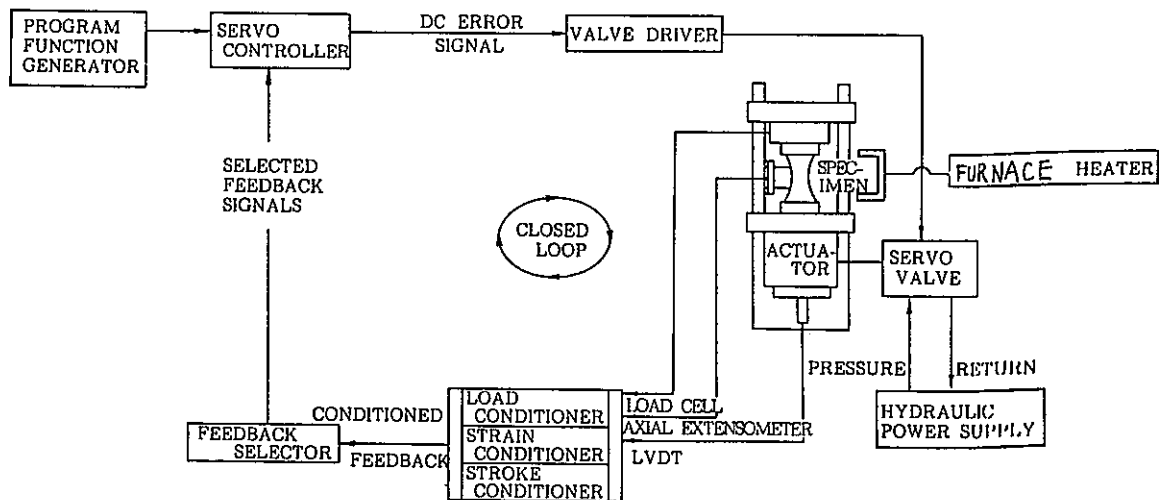


Fig. 5 Schematic diagram of fatigue testing machine in air

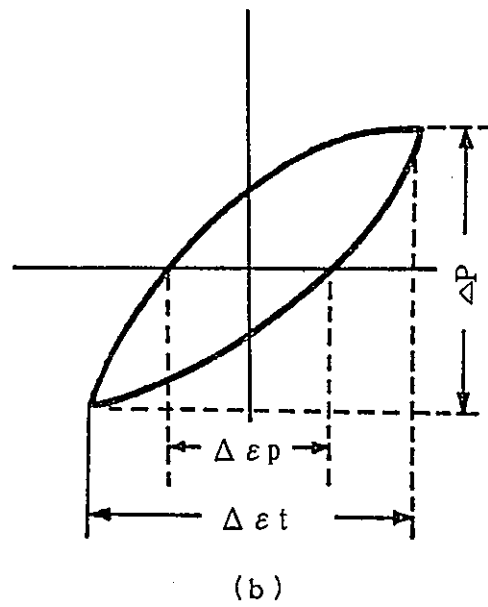
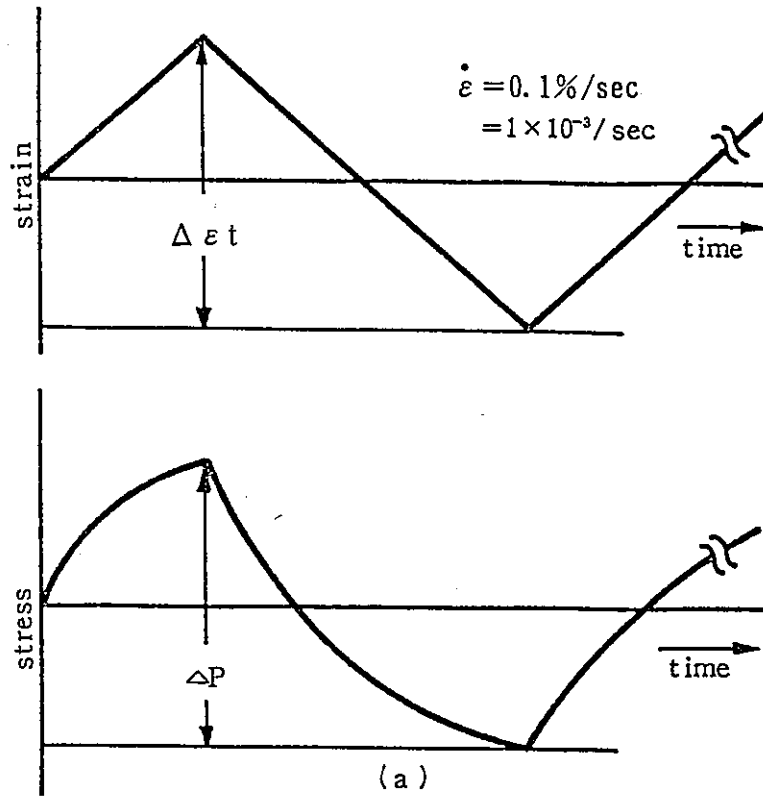


Fig. 6 Loading waveform(a) and hysteresis loop(b)

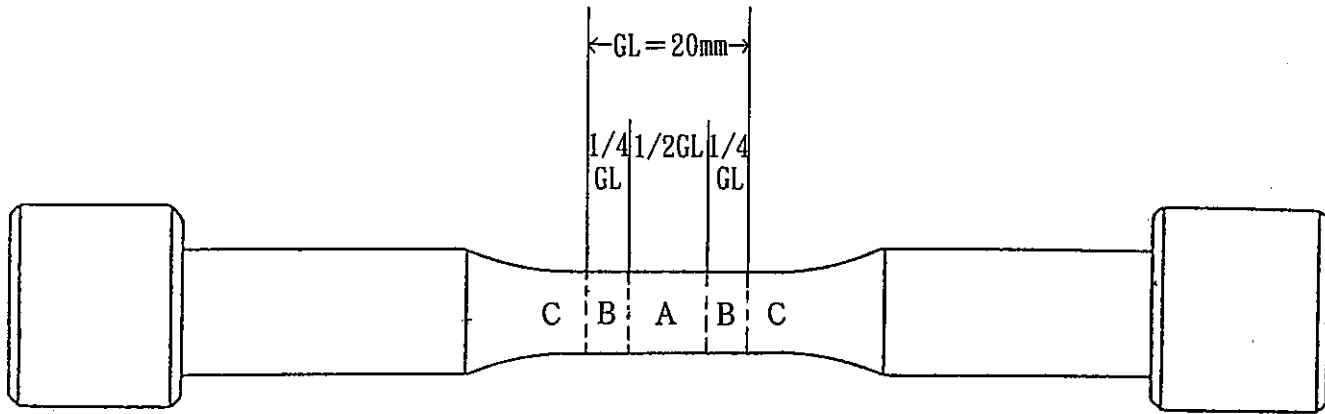


Fig. 7 Definition of failure point (A, B, C)

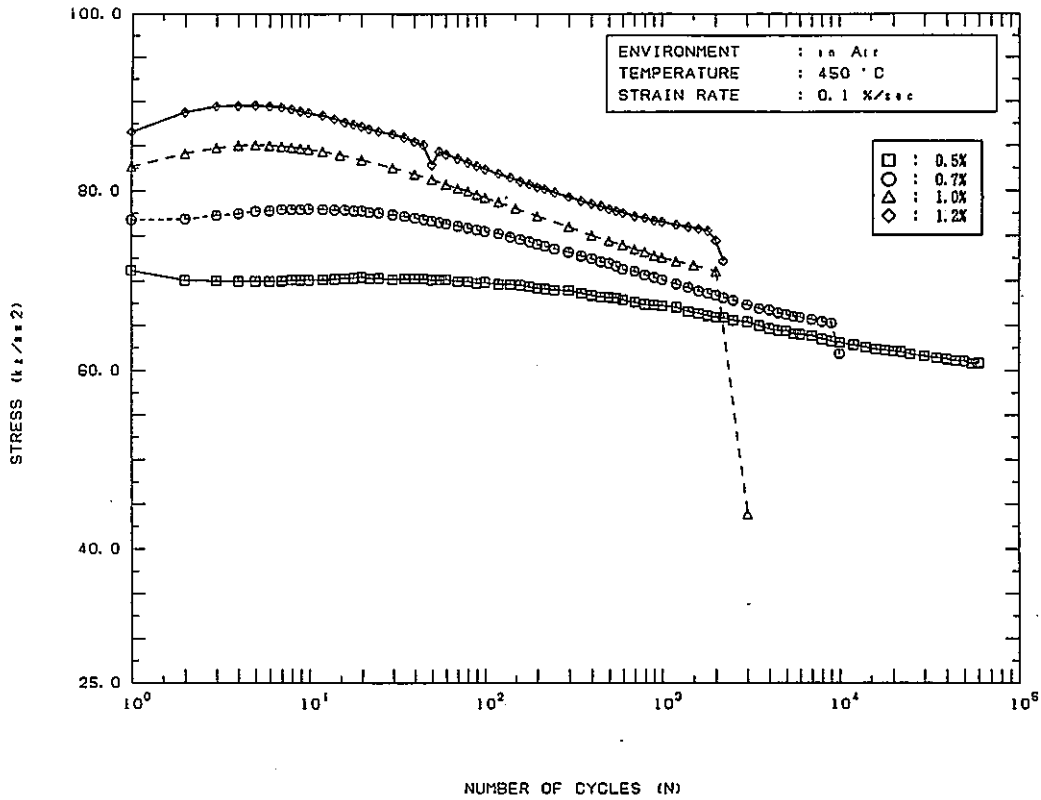


Fig. 8 Cyclic stress range response of Mod.9Cr-1Mo steel(F2) at 450°C in air

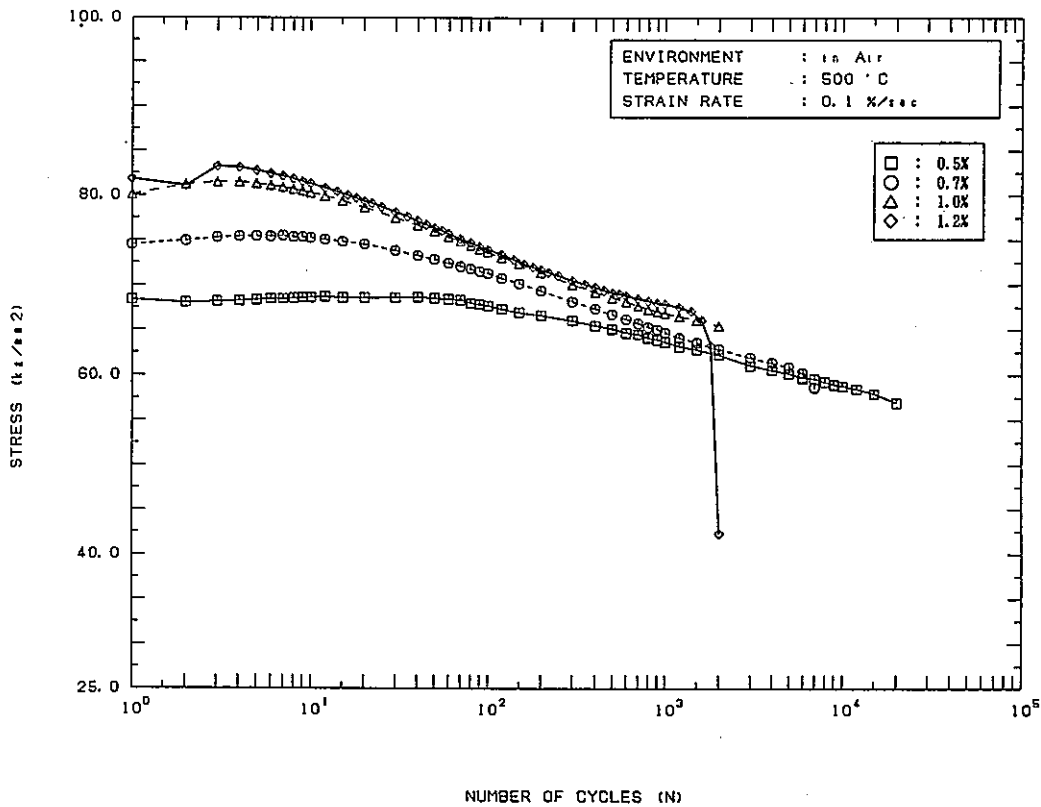


Fig. 9 Cyclic stress range response of Mod.9Cr-1Mo steel(F2) at 500°C in air

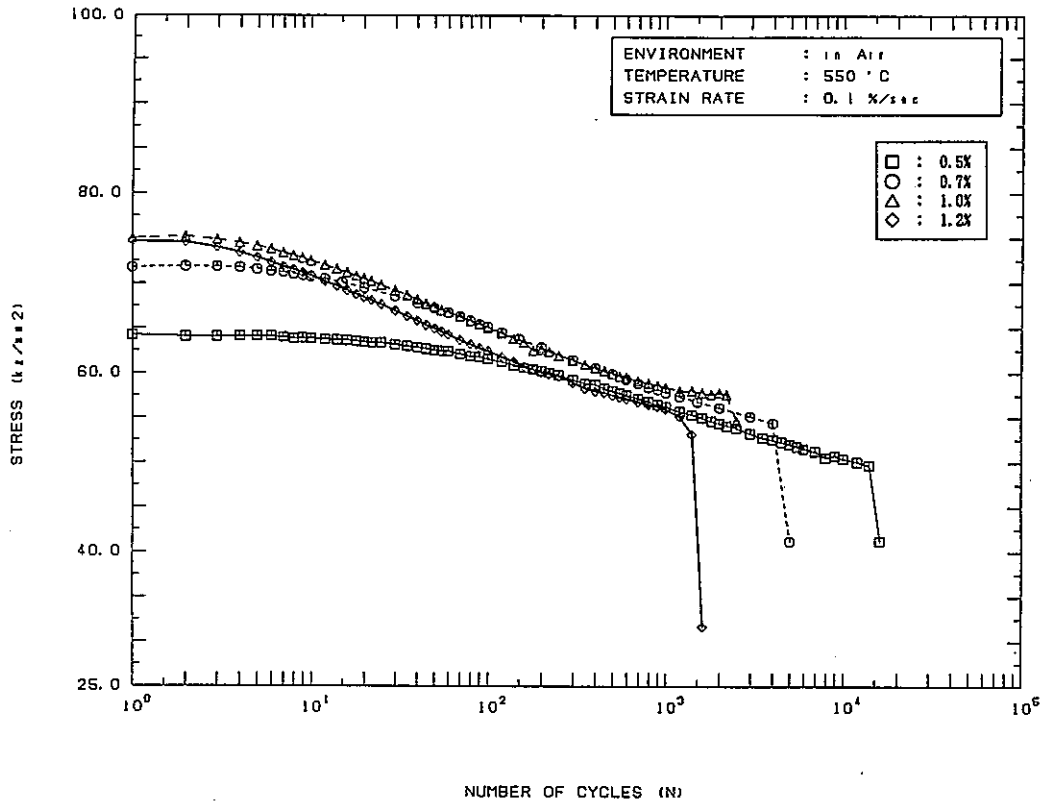


Fig.10 Cyclic stress range response of Mod. 9Cr-1Mo steel(F2) at 550°C in air

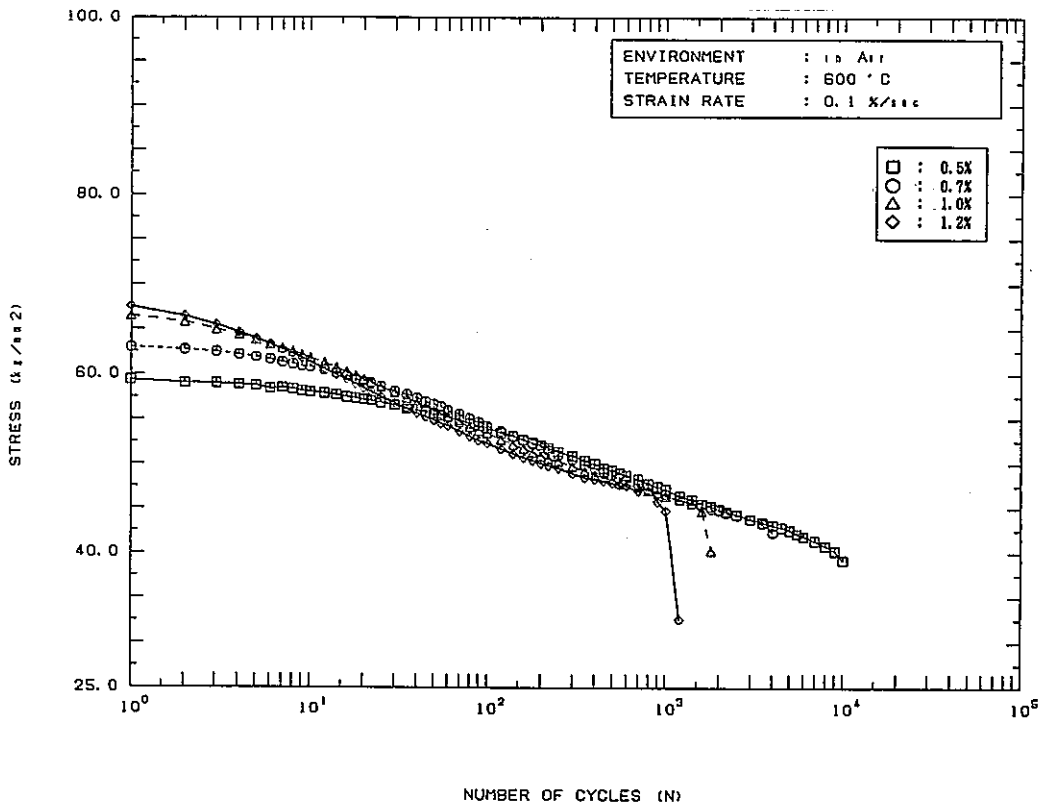


Fig.11 Cyclic stress range response of Mod. 9Cr-1Mo steel(F2) at 600°C in air

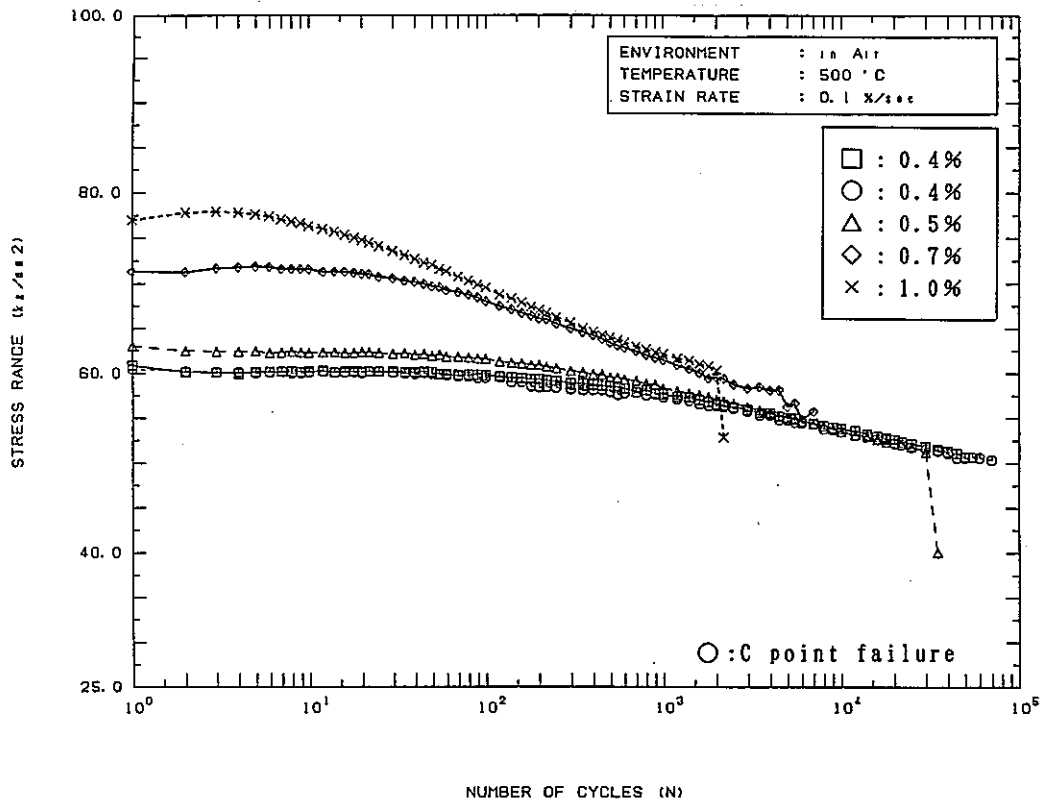


Fig.12 Cyclic stress range response of Mod.9Cr-1Mo steel(F4) at 500°C in air

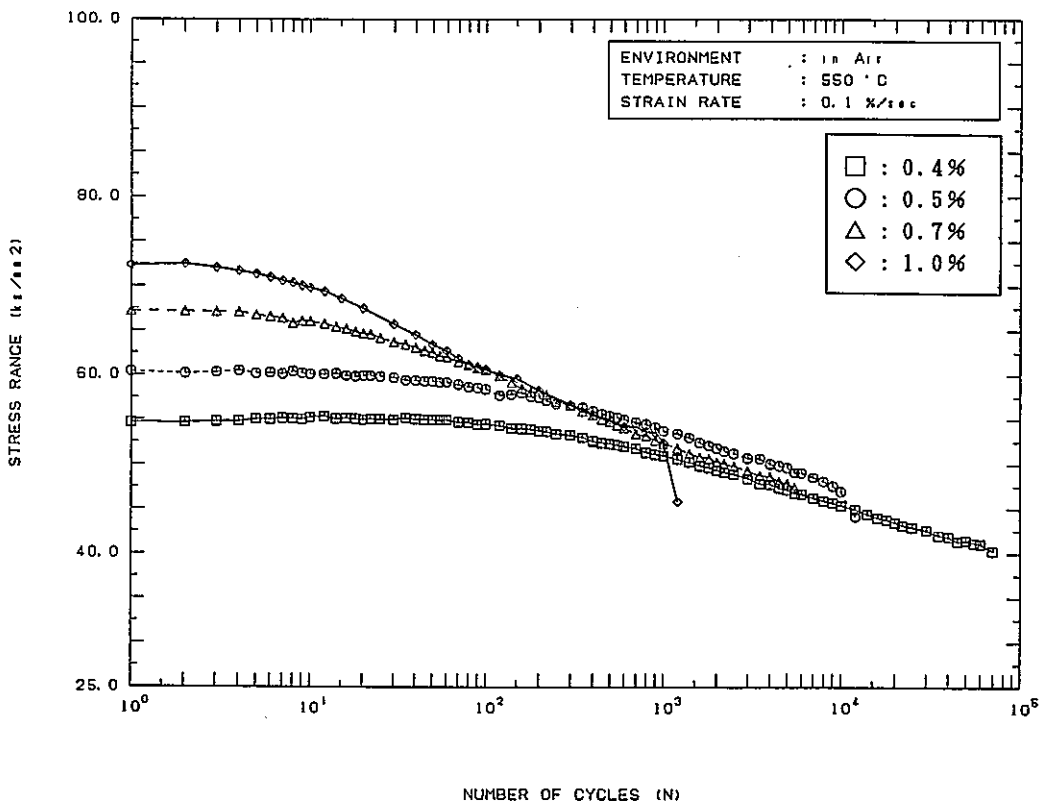


Fig.13 Cyclic stress range response of Mod.9Cr-1Mo steel(F4) at 550°C in air

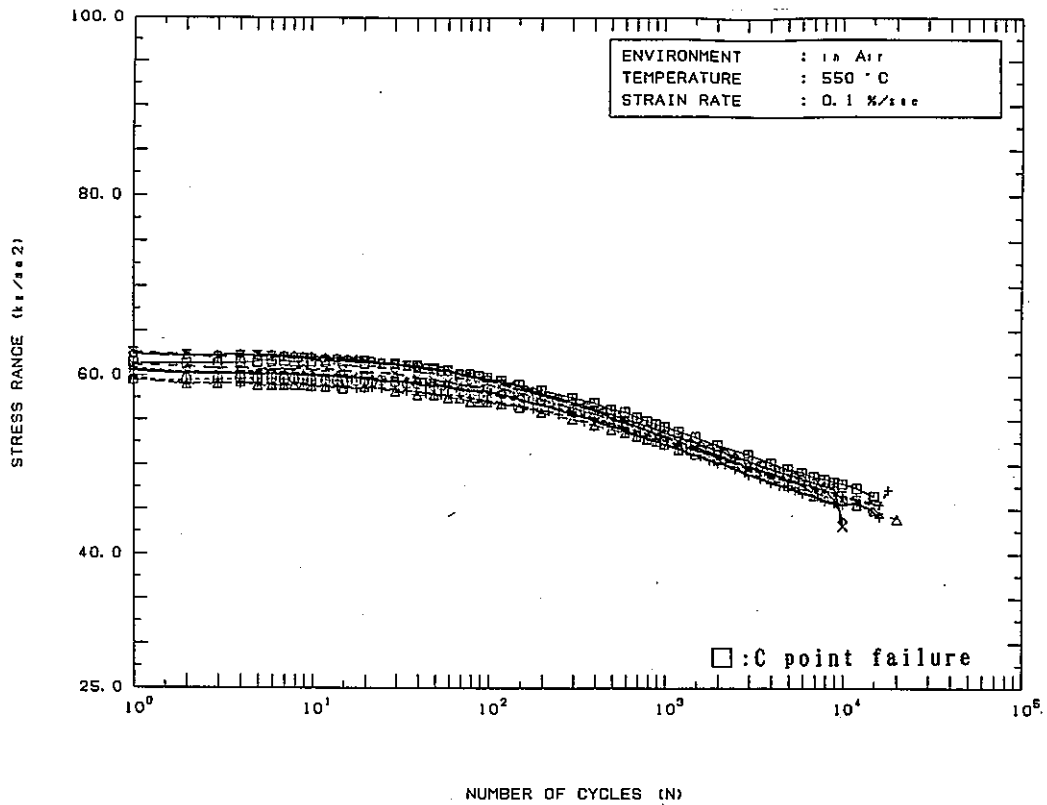


Fig.14 Cyclic stress range response of Mod.9Cr-1Mo steel(F4) at 550°C in air

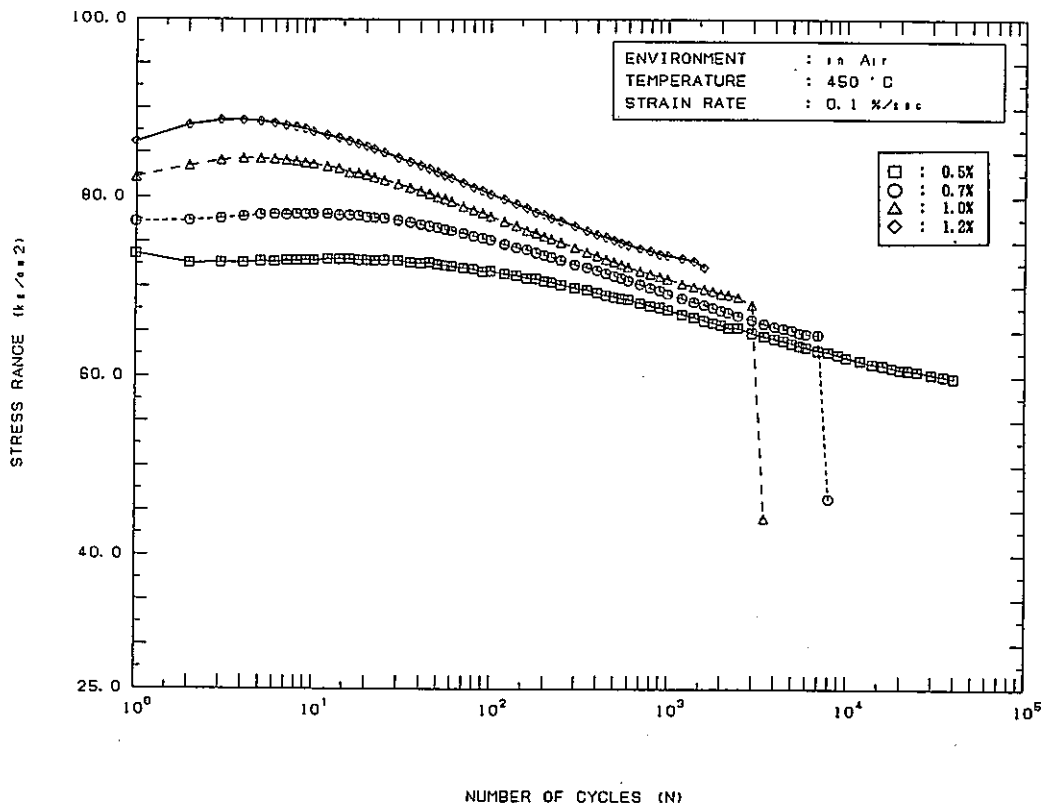


Fig.15 Cyclic stress range response of Mod.9Cr-1Mo steel(F6) at 450°C in air

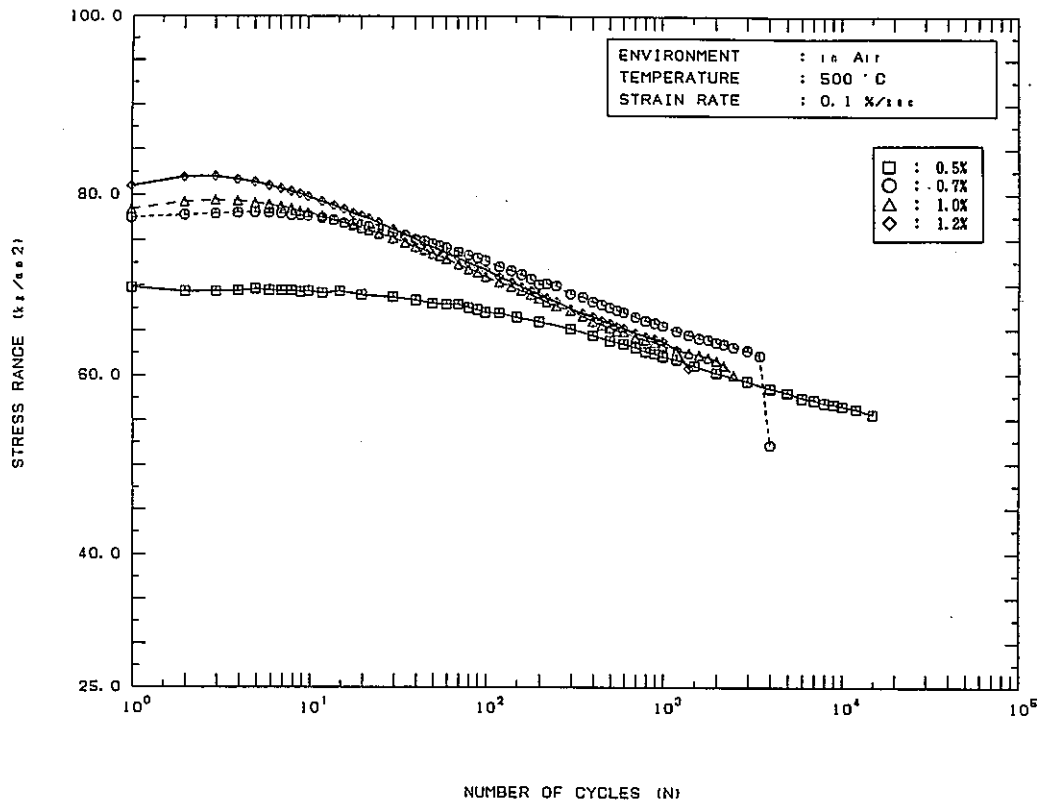


Fig.16 Cyclic stress range response of Mod.9Cr-1Mo steel(F6) at 500°C in air

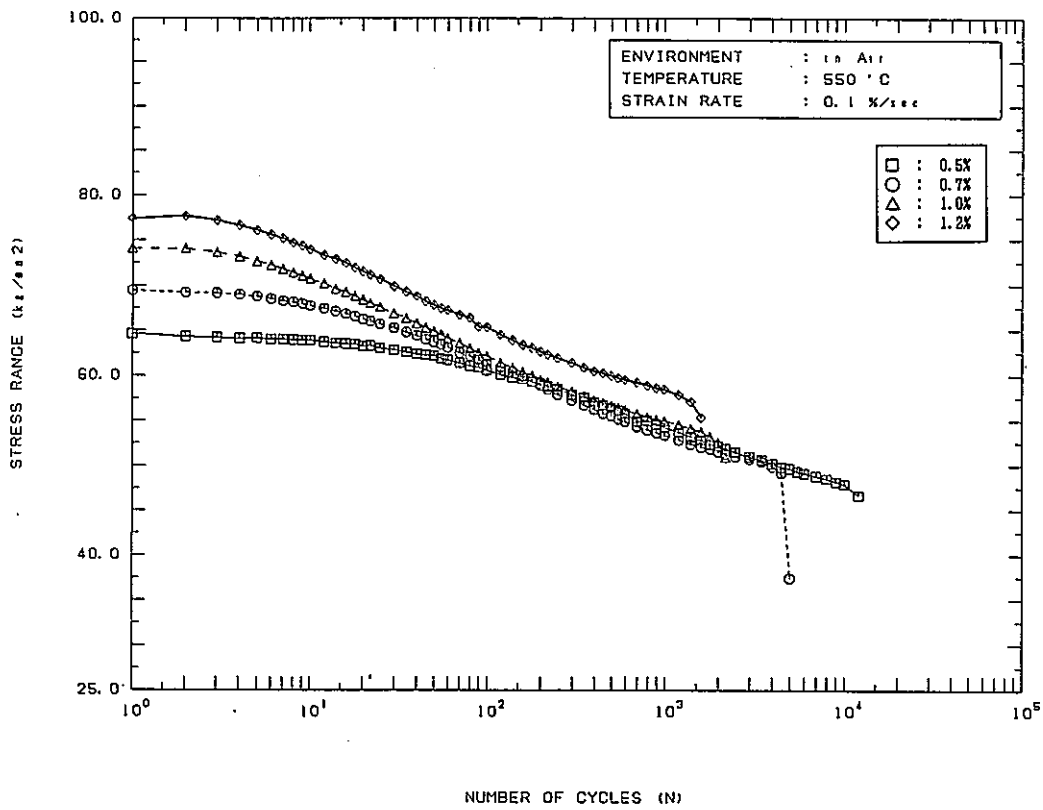


Fig.17 Cyclic stress range response of Mod.9Cr-1Mo steel(F6) at 550°C in air

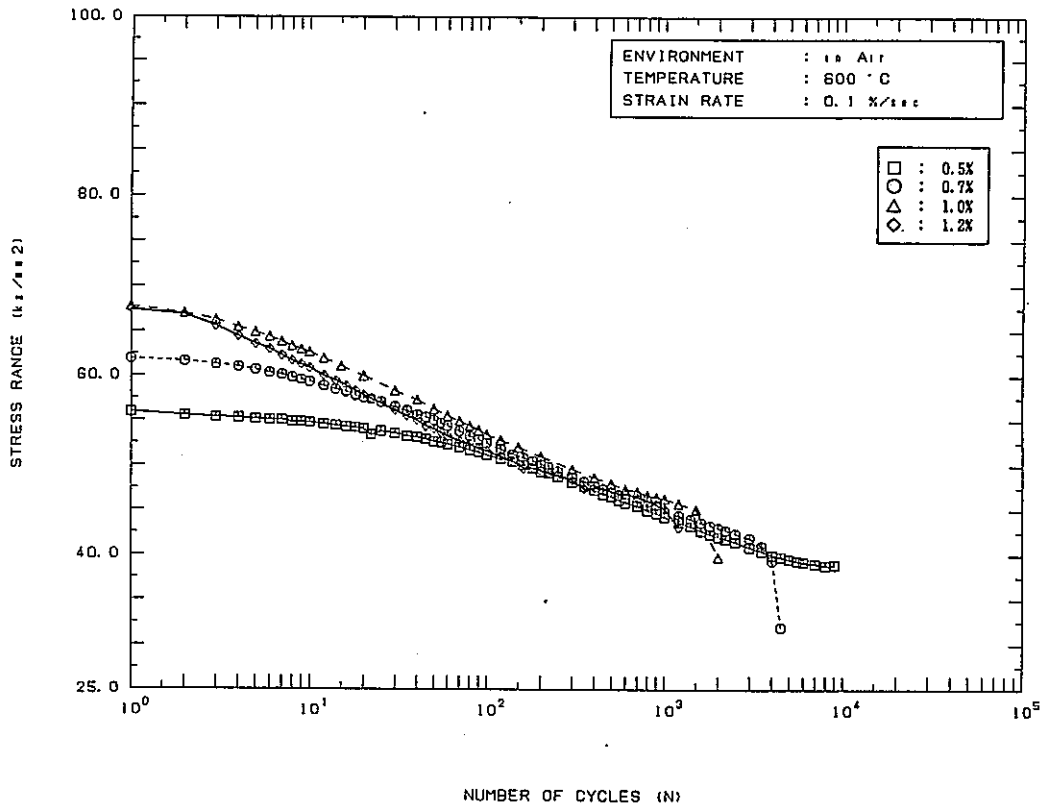


Fig.18 Cyclic stress range response of Mod.9Cr-1Mo steel(F6) at 600°C in air

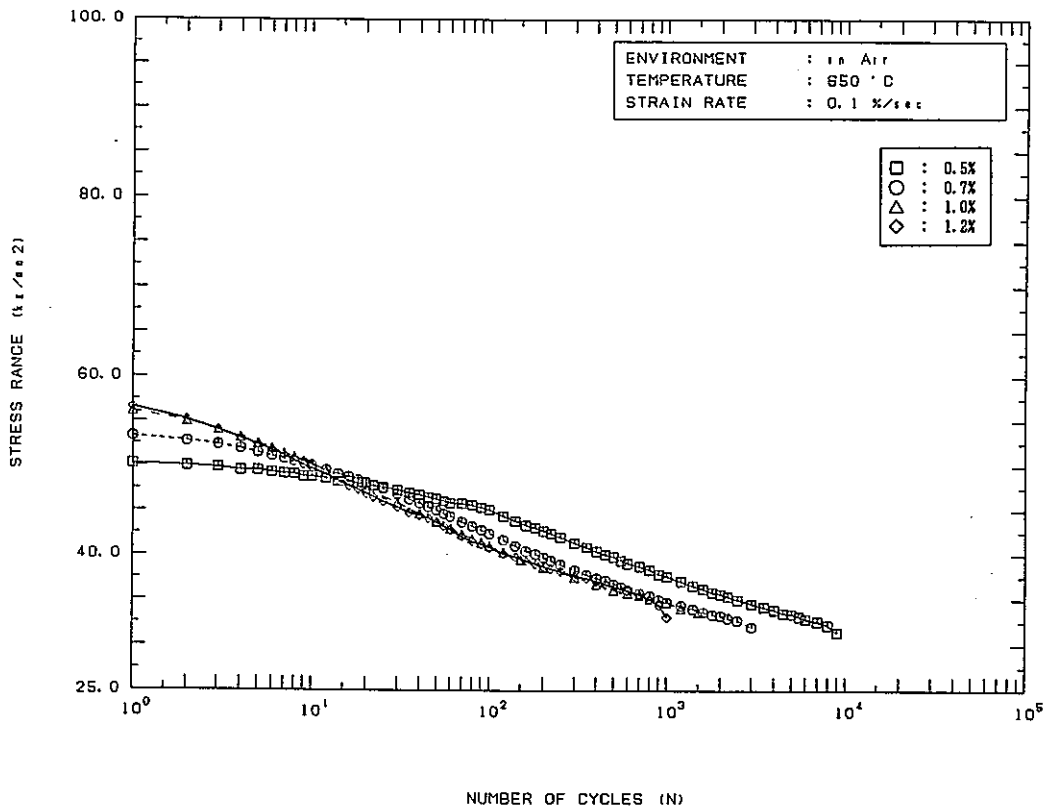


Fig.19 Cyclic stress range response of Mod.9Cr-1Mo steel(F6) at 650°C in air

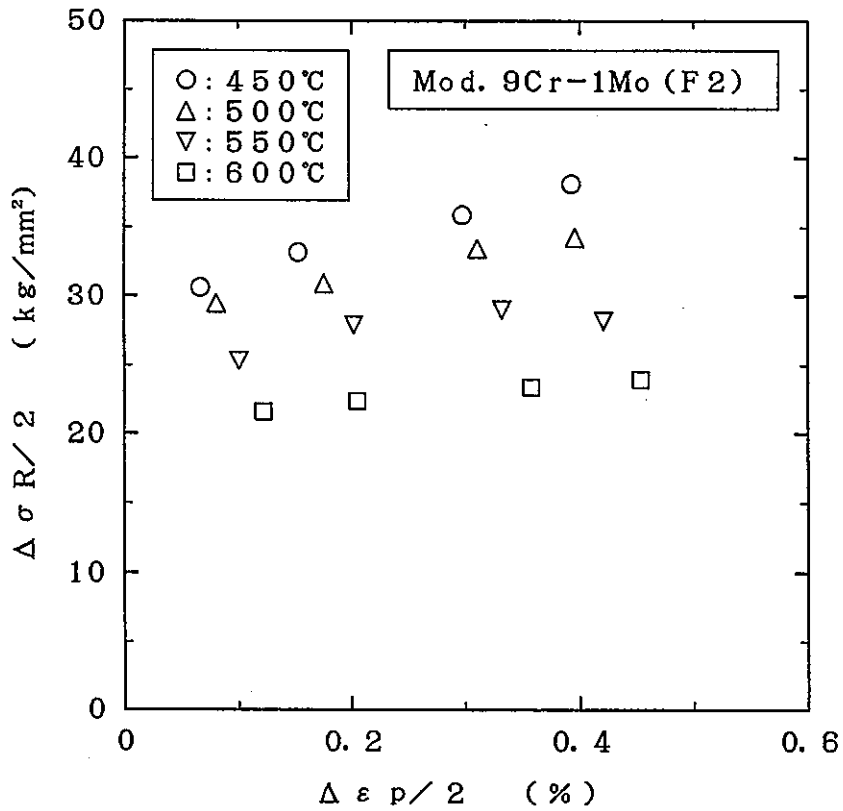


Fig.20 Cyclic peak stress-strain relations of Mod.9Cr-1Mo steel(F2) in air

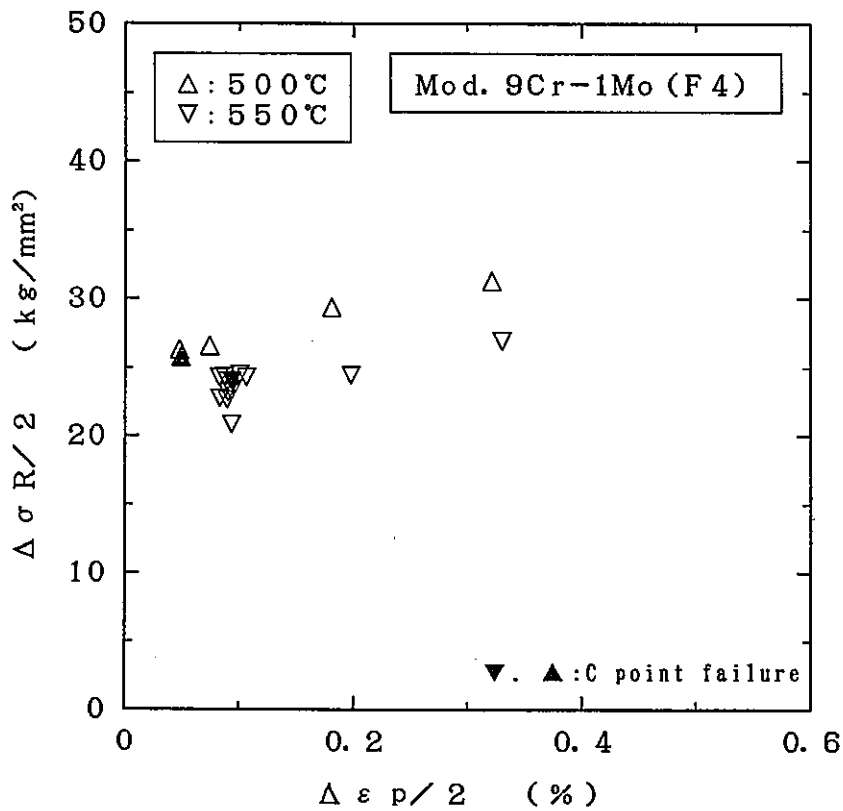


Fig.21 Cyclic peak stress-strain relations of Mod.9Cr-1Mo steel(F4) in air

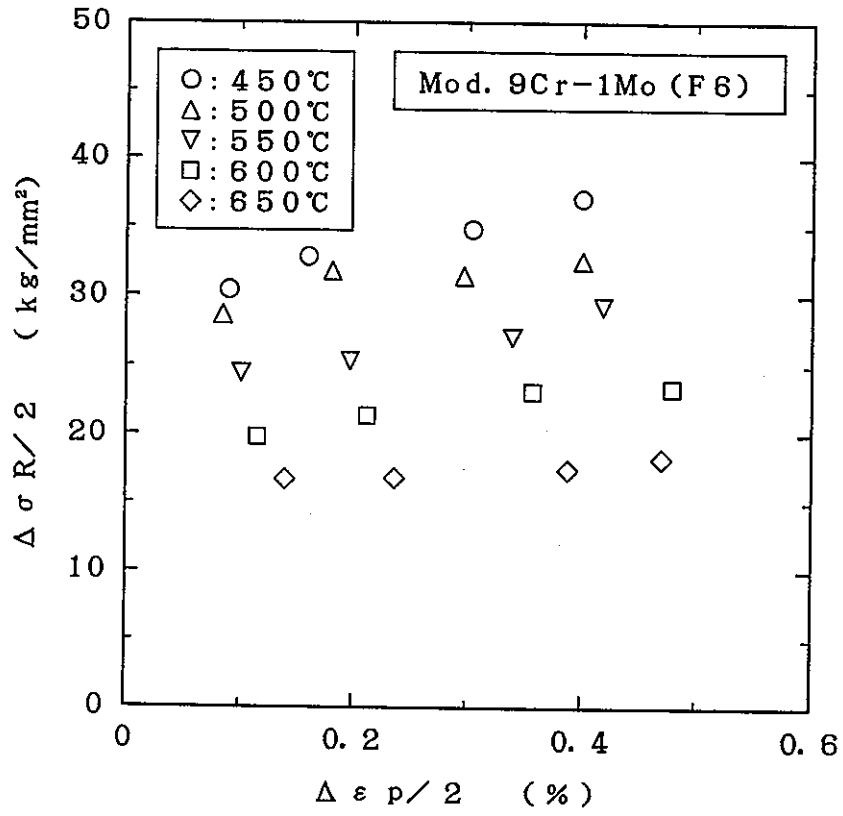


Fig. 22 Cyclic peak stress-strain relations of Mod. 9Cr-1Mo steel(F6) in air

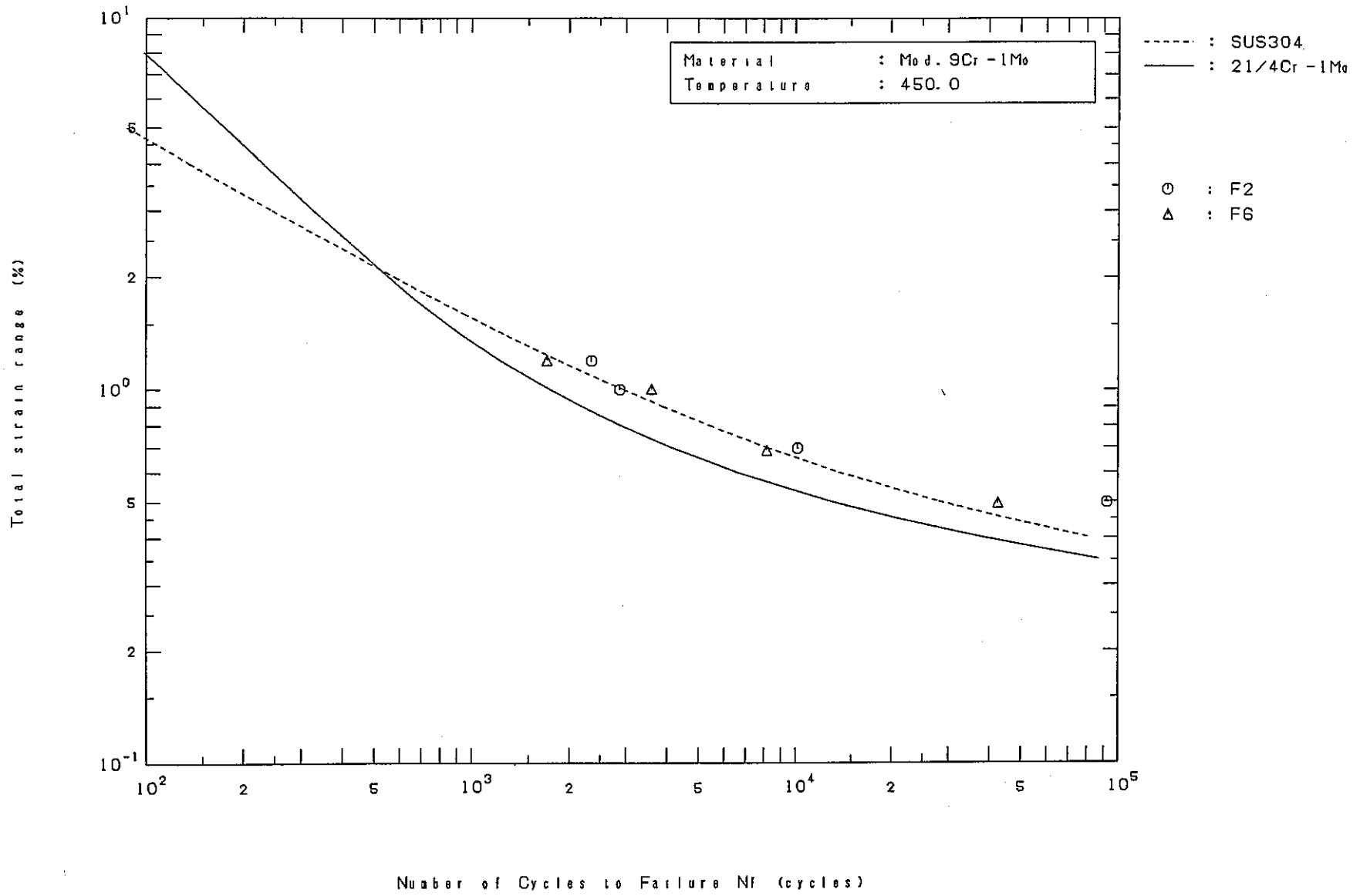


Fig.23 Relation between total strain range and fatigue life at 450°C in air

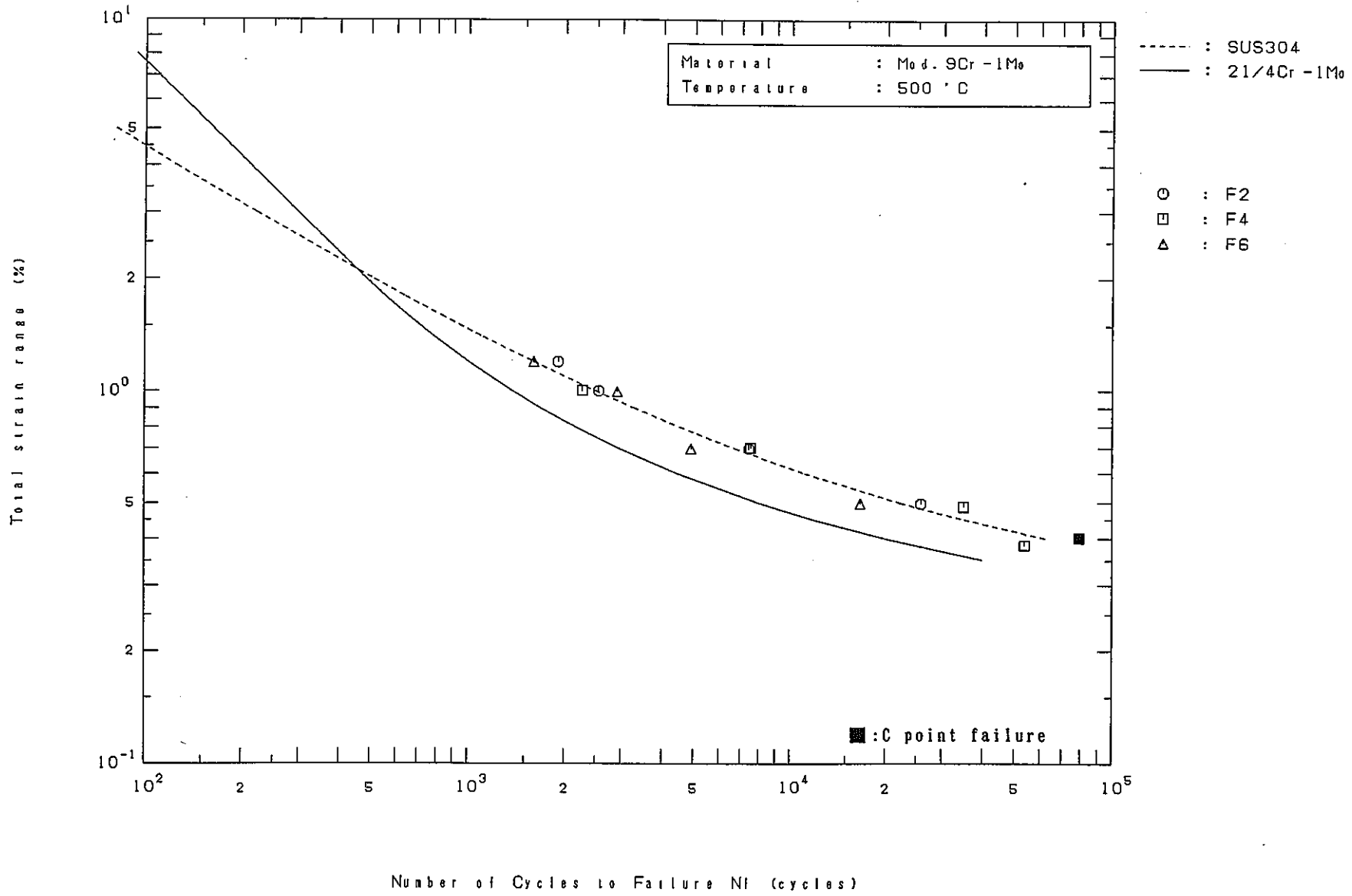


Fig.24 Relation between total strain range and fatigue life at 500°C in air

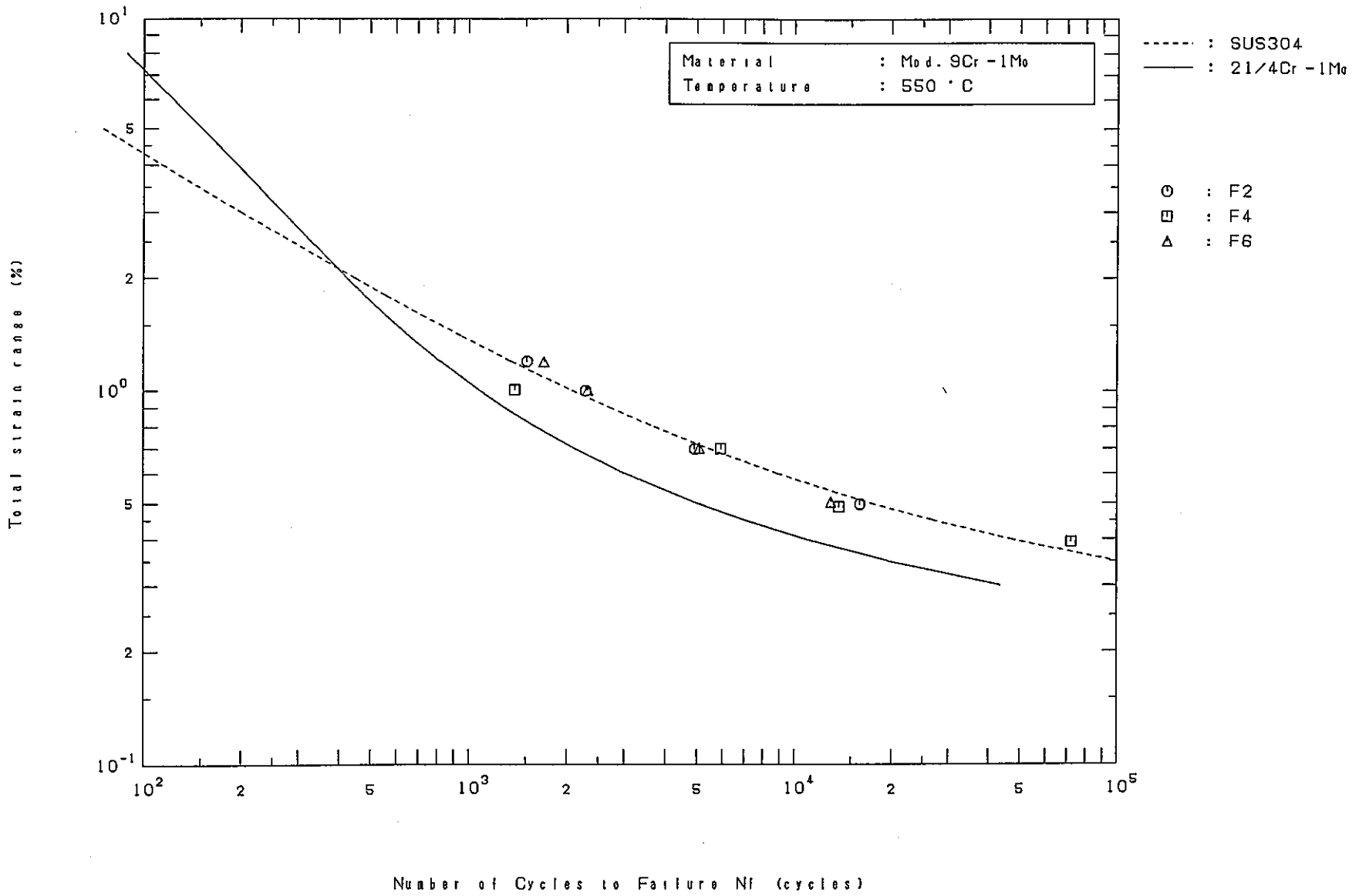


Fig.25 Relation between total strain range and fatigue life at 550°C in air

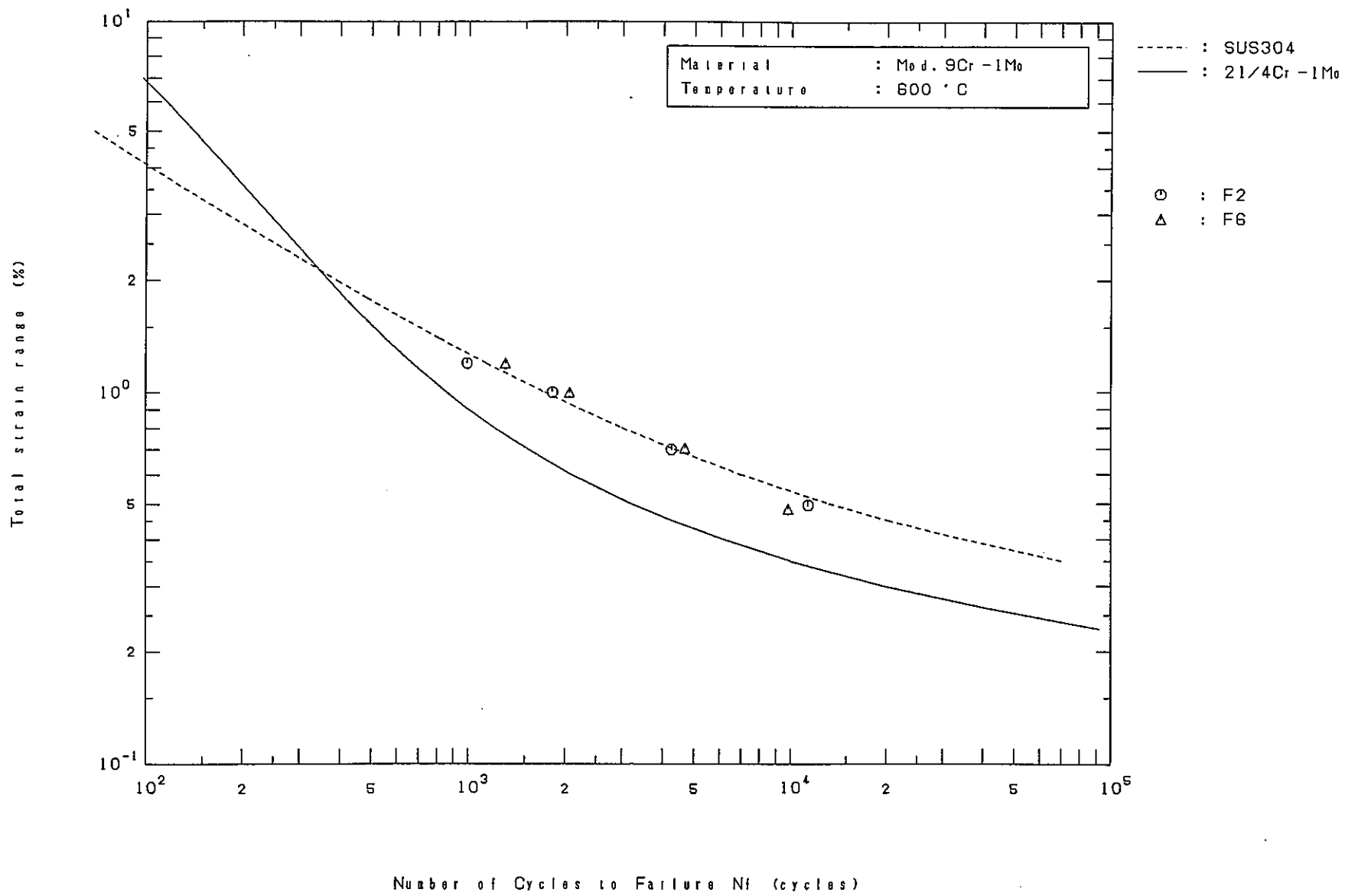


Fig.26 Relation between total strain range and fatigue life at 600°C in air

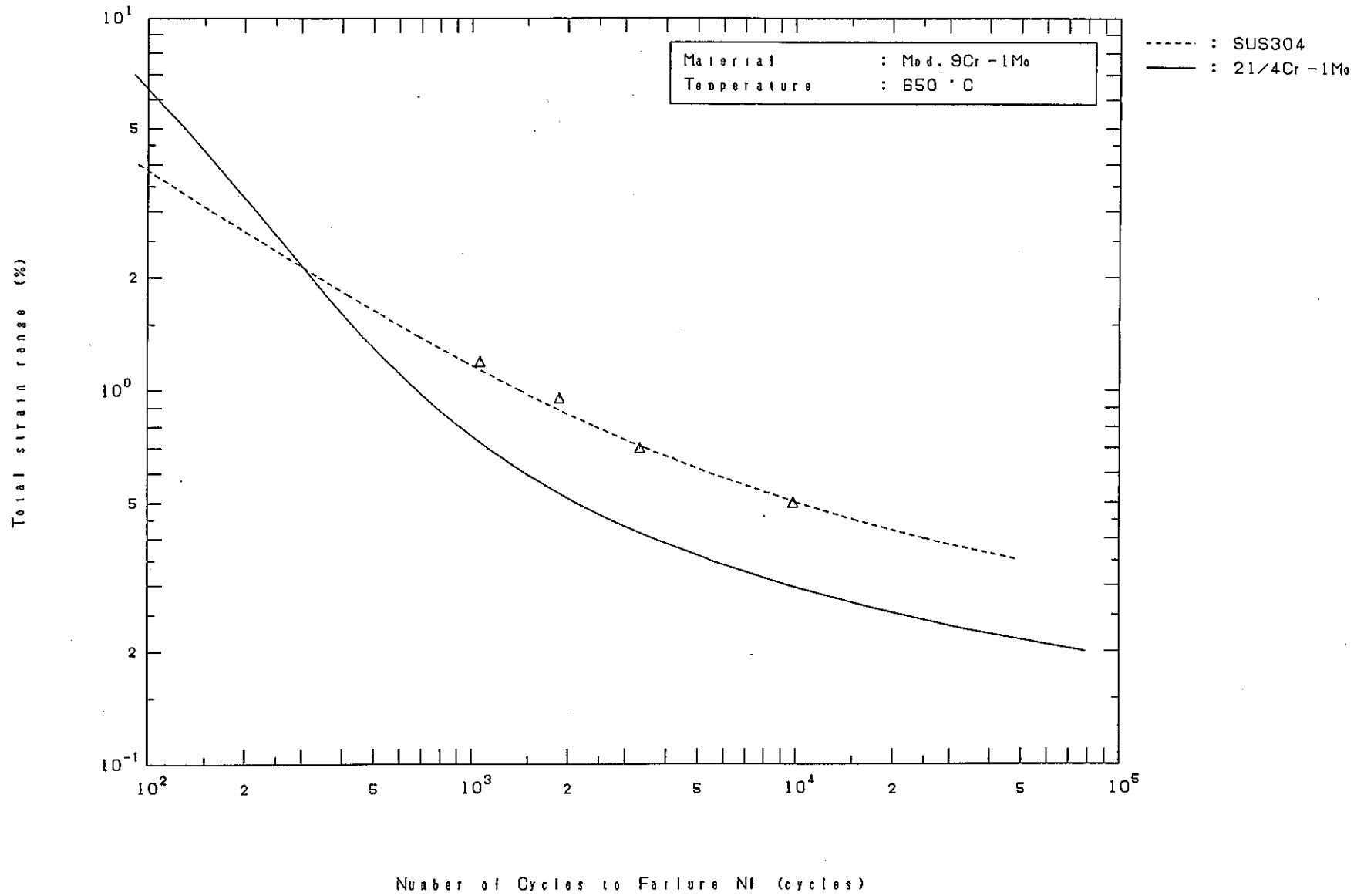


Fig.27 Relation between total strain range and fatigue life at 650°C in air

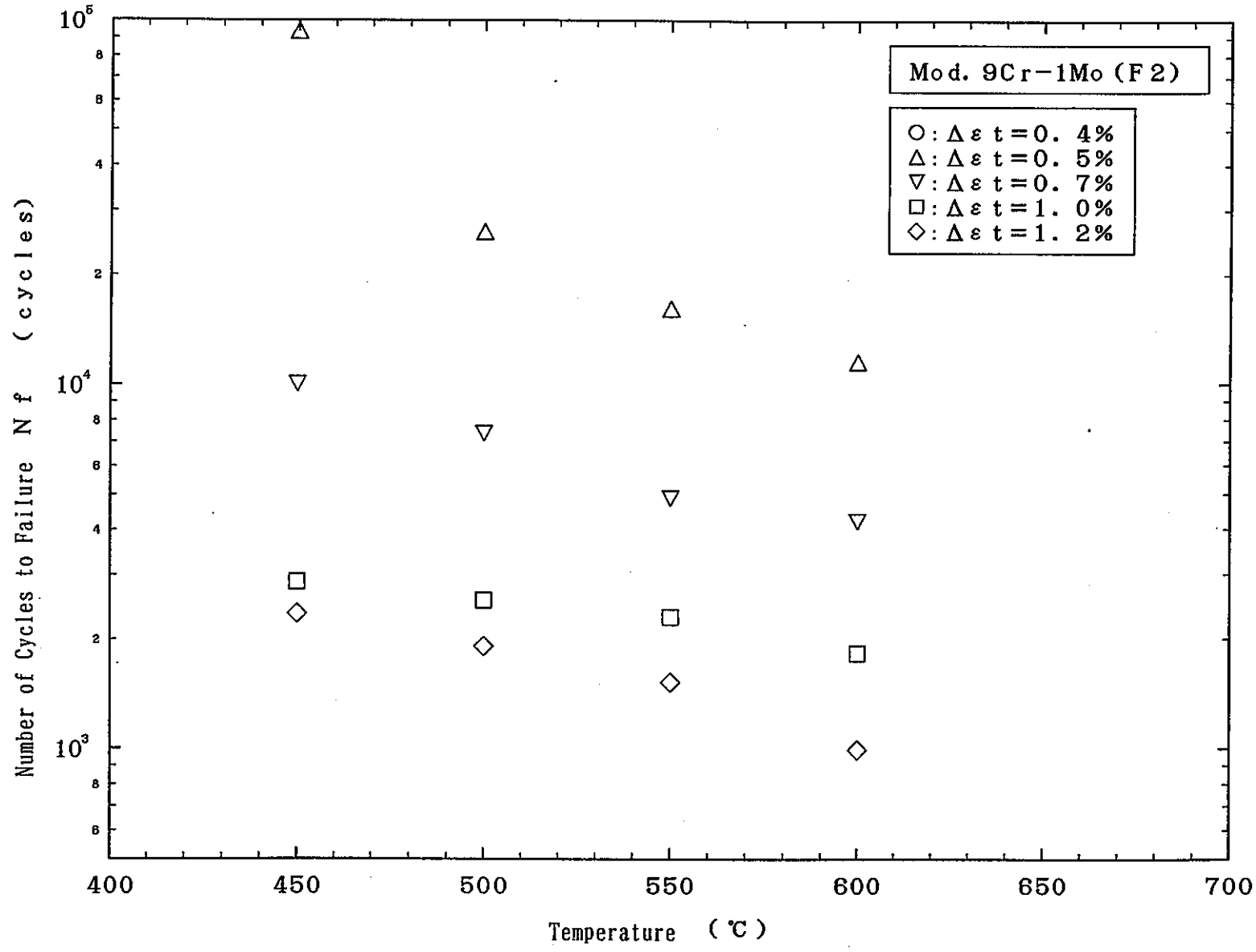


Fig.28 Influence of temperature on fatigue life of Mod.9Cr-1Mo steel(F2)

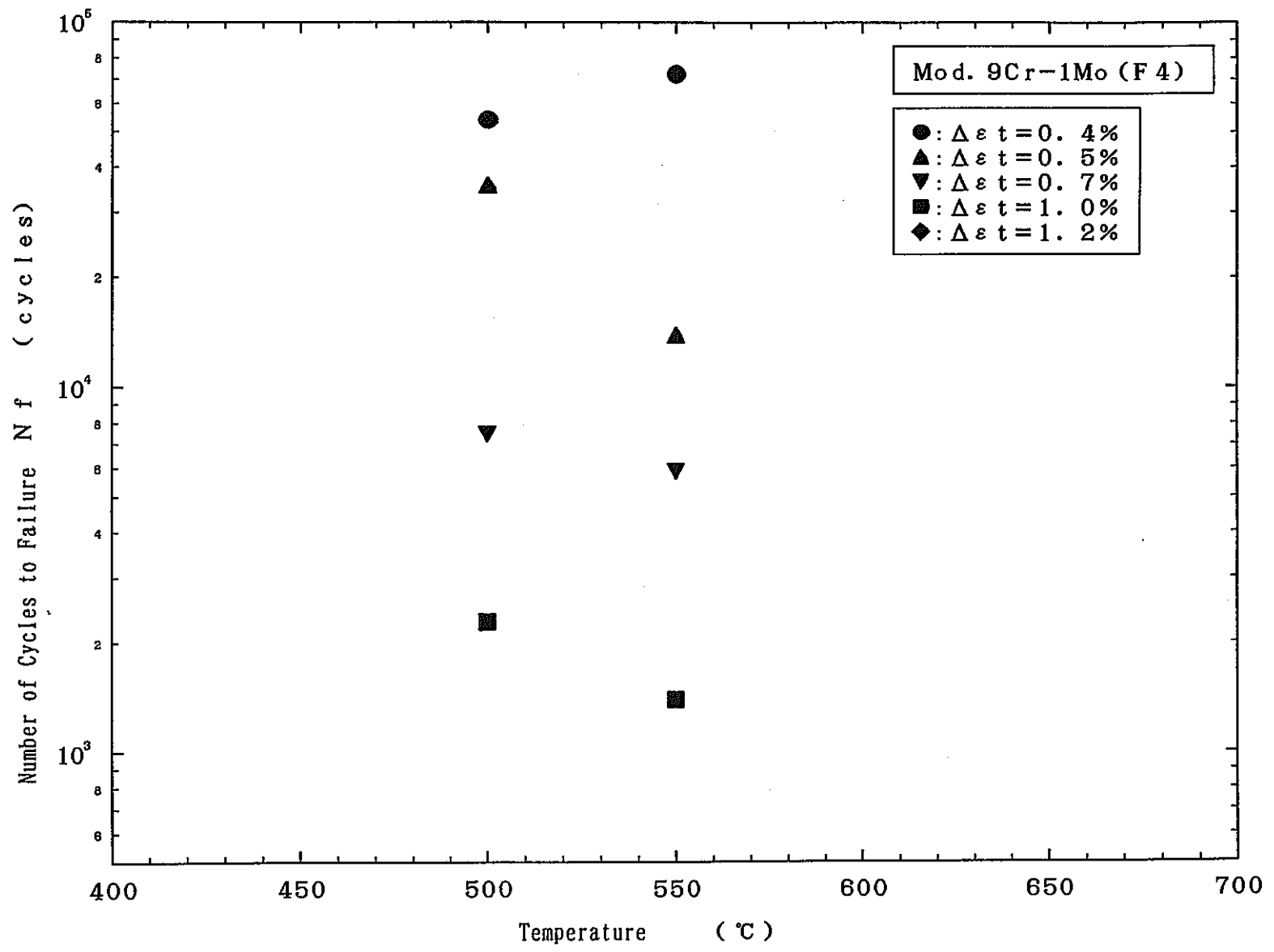


Fig.29 Influence of temperature on fatigue life of Mod.9Cr-1Mo steel(F4)

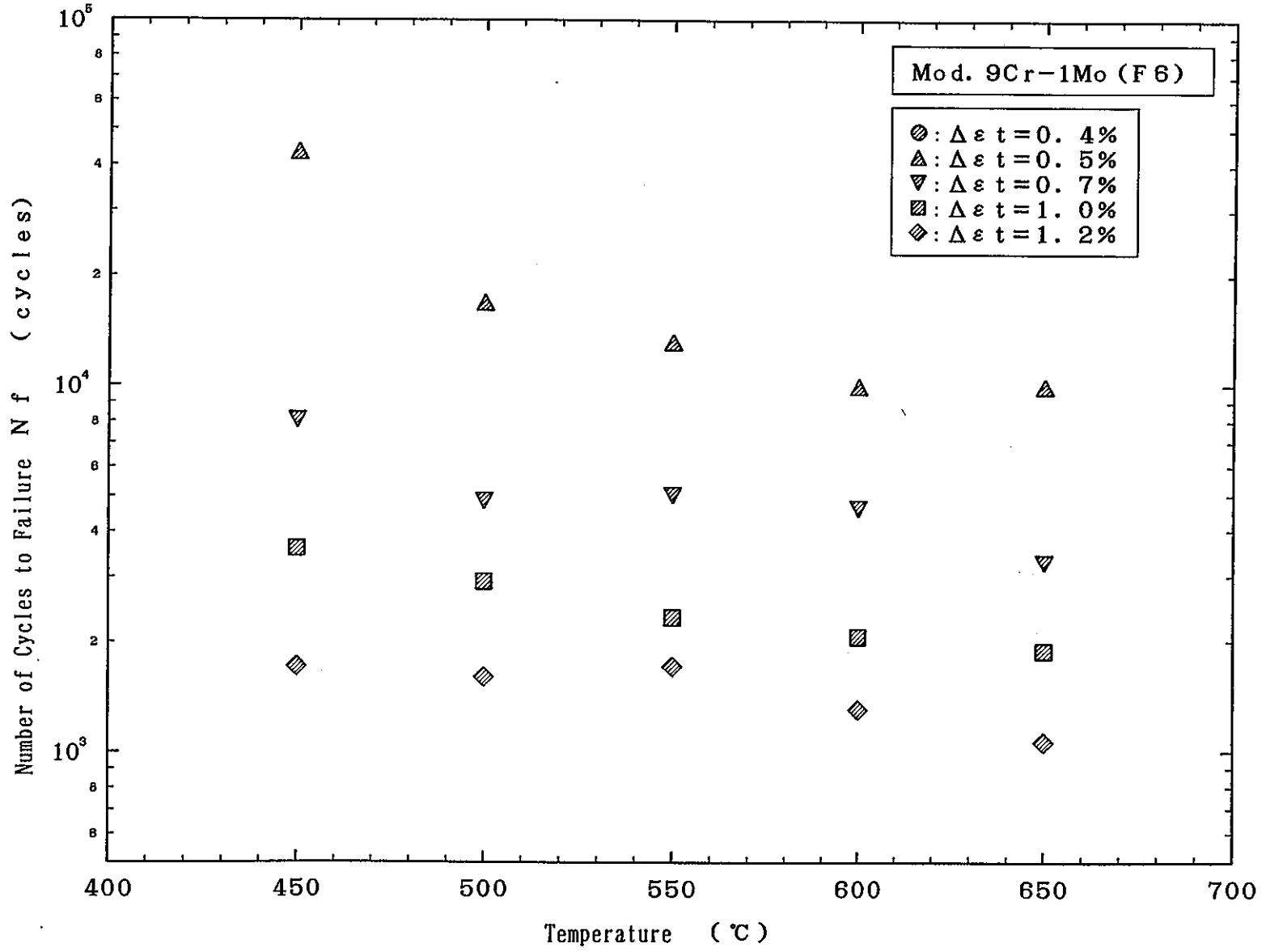


Fig.30 Influence of temperature on fatigue life of Mor-1Mo steel(F6)

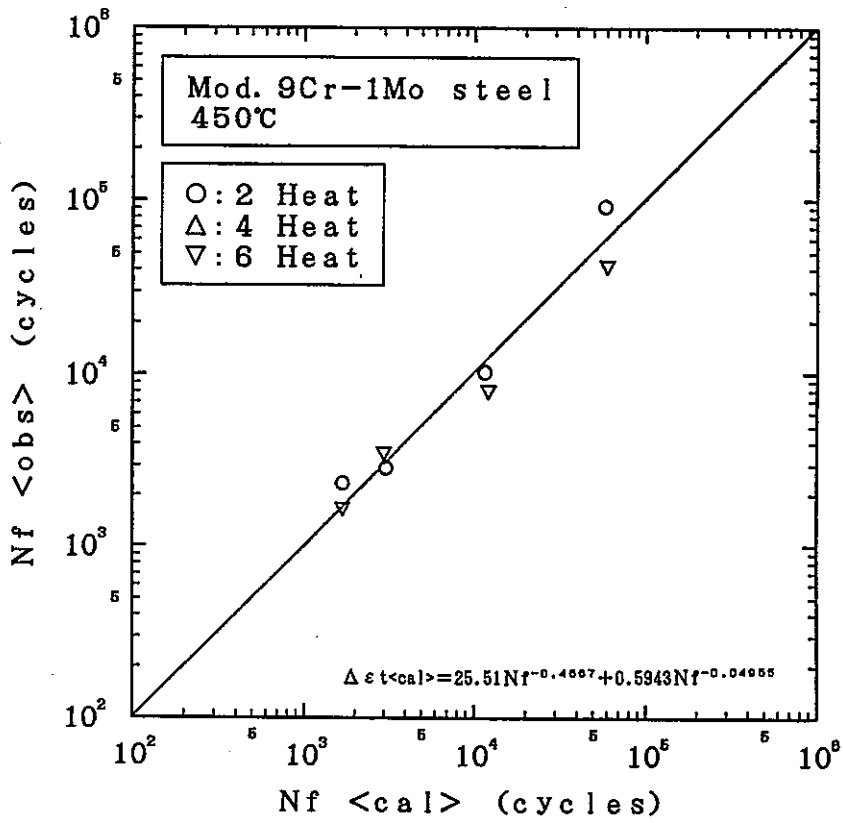


Fig. 31 Comparison between observed and averaged life at 450°C in air

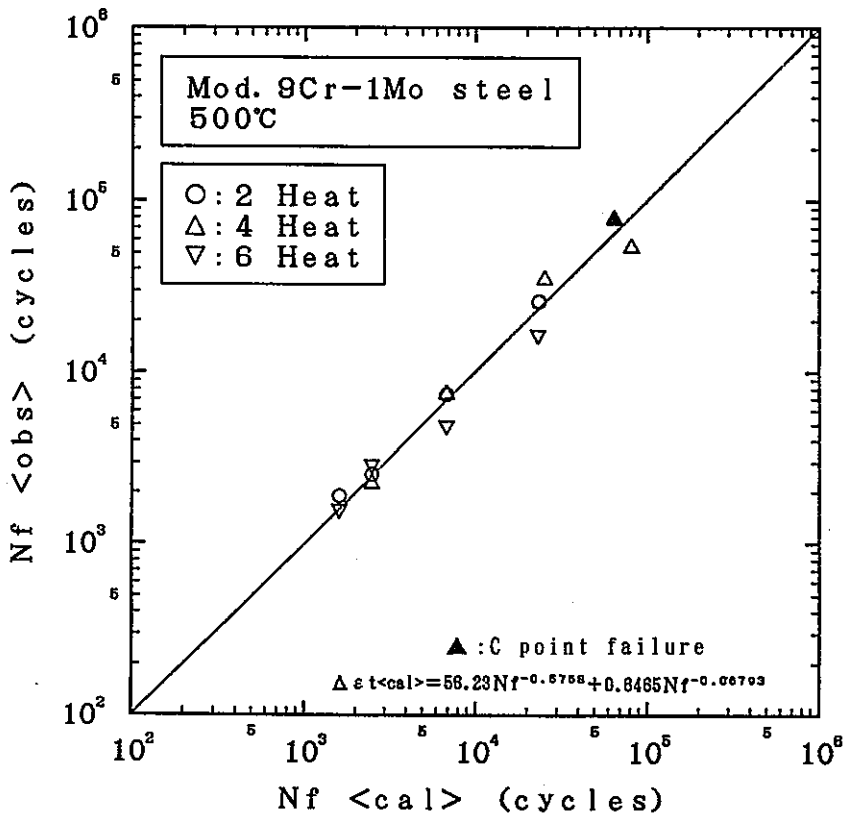


Fig. 32 Comparison between observed and averaged life at 500°C in air

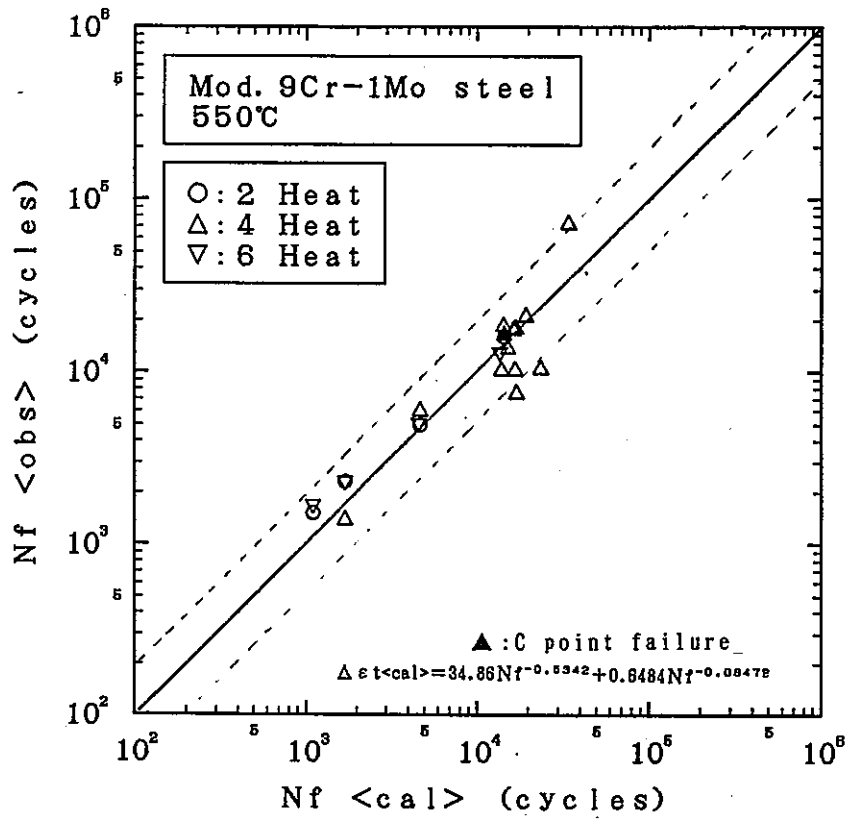


Fig. 33 Comparison between observed and averaged life at 550°C in air

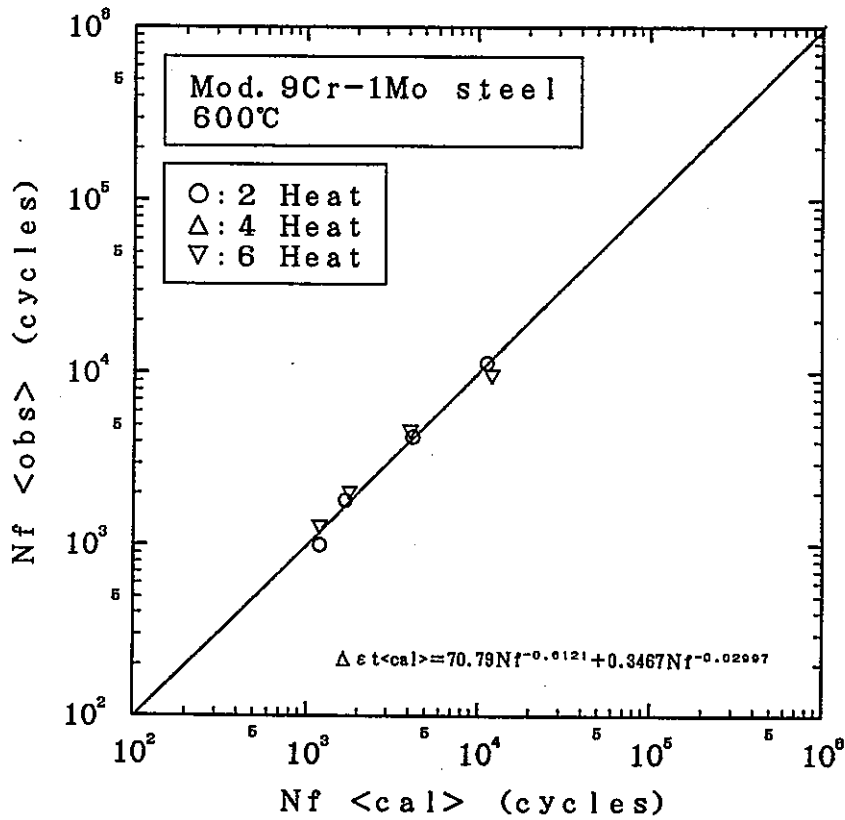


Fig. 34 Comparison between observed and averaged life at 600°C in air

Photo. 1 Appearance of fractured fatigue specimens (1)

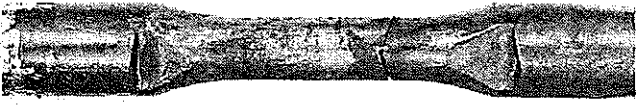





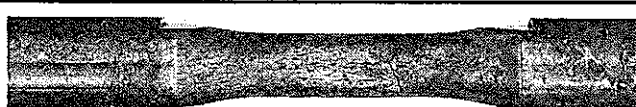
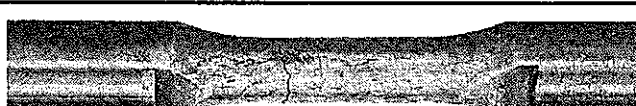
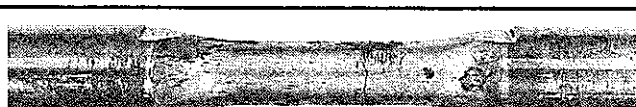



| Heat | Temp °C | TP No. | ϵ %/sec | $\Delta \epsilon t$ % | Nf cycles | Appearance of specimen |
|------|------------|--------|---------------------|--------------------------|--------------|--|
| F 2 | 450 | HUH6B8 | 0.1 | 0.497 | 92178 |  |
| | | HUH6B7 | 0.1 | 0.697 | 10200 |  |
| | | HUH6A4 | 0.1 | 0.999 | 2874 |  |
| | | HUH6B0 | 0.1 | 1.198 | 2349 |  |
| | 500 | HUH6B6 | 0.1 | 0.498 | 25806 |  |
| | | HUH6B1 | 0.1 | 0.699 | 7432 |  |
| | | HUH6A5 | 0.1 | 0.999 | 2546 |  |
| | | HUH6B2 | 0.1 | 1.200 | 1902 |  |
| | 550 | HUH6B5 | 0.1 | 0.497 | 15996 |  |
| | | HUH6A9 | 0.1 | 0.698 | 4938 |  |
| | | HUH6A8 | 0.1 | 1.000 | 2294 |  |
| | | HUH6B3 | 0.1 | 1.199 | 1515 |  |

Photo. 2 Appearance of fractured fatigue specimens (2)


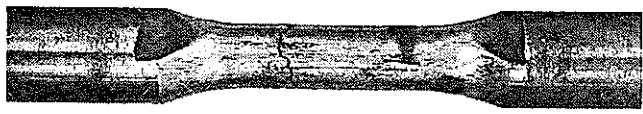

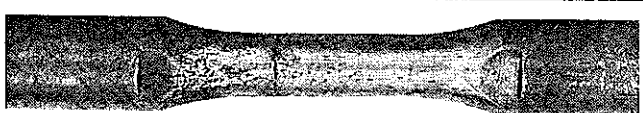

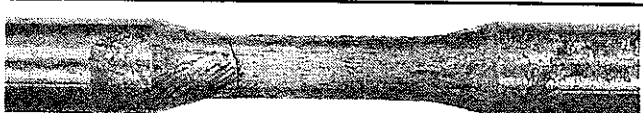
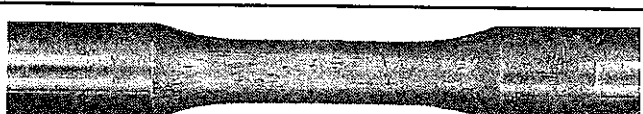
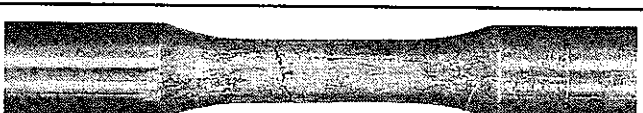
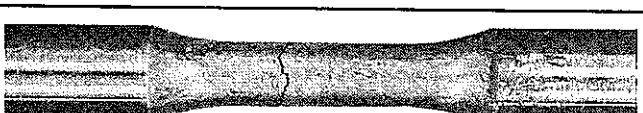
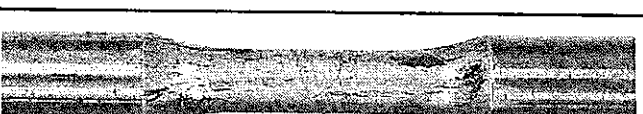
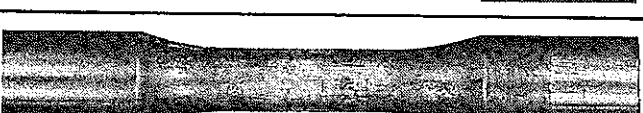

| Heat | Temp °C | TP No. | ϵ %/sec | $\Delta \epsilon t$ % | Nf cycles | Appearance of specimen |
|------|------------|--------|---------------------|--------------------------|--------------|--|
| F 2 | 600 | HUH6A0 | 0.1 | 0.495 | 11392 |  |
| | | HUH6A2 | 0.1 | 0.699 | 4272 |  |
| | | HUH6A7 | 0.1 | 1.000 | 1826 |  |
| | | HUH6B4 | 0.1 | 1.201 | 994 |  |
| F 4 | 500 | HMH6J9 | 0.1 | 0.384 | 53876 |  |
| | | HMH6K2 | 0.1 | 0.401 | 79070 |  |
| | | HMH6K1 | 0.1 | 0.488 | 35054 |  |
| | | HMH6J0 | 0.1 | 0.703 | 7528 |  |
| | | HMH6J6 | 0.1 | 1.003 | 2266 |  |
| | 550 | HMH6K0 | 0.1 | 0.394 | 72230 |  |
| | | HMH6J4 | 0.1 | 0.489 | 13779 |  |
| | | HMH6J5 | 0.1 | 0.699 | 5934 |  |

Photo. 3 Appearance of fractured fatigue specimens (3)




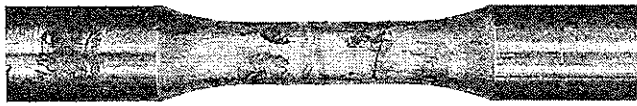





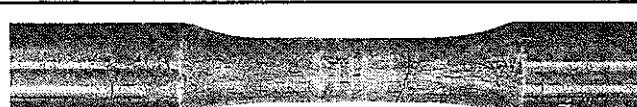


| Heat | Temp °C | TP No. | ϵ %/sec | $\Delta \epsilon t$ % | Nf cycles | Appearance of specimen |
|------|------------|--------|---------------------|--------------------------|--------------|--|
| F 4 | 550 | HMH6J1 | 0.1 | 1.007 | 1389 |  |
| | | HMH6A2 | 0.1 | 0.496 | 16489 |  |
| | | HMH6D6 | 0.1 | 0.437 | 10490 |  |
| | | HMH6E8 | 0.1 | 0.458 | 21014 |  |
| | | HMH6F6 | 0.1 | 0.501 | 10217 |  |
| | | HMH6G3 | 0.1 | 0.497 | 18606 |  |
| | | HMH6C4 | 0.1 | 0.477 | 10294 |  |
| | | HMH6H5 | 0.1 | 0.479 | 17772 |  |
| | | HMH6I3 | 0.1 | 0.475 | 18018 |  |
| | | HMH6B3 | 0.1 | 0.474 | 7486 |  |
| F 6 | 450 | HTH6B2 | 0.1 | 0.495 | 42639 |  |
| | | HTH6A8 | 0.1 | 0.689 | 8173 |  |

Photo. 4 Appearance of fractured fatigue specimens (4)



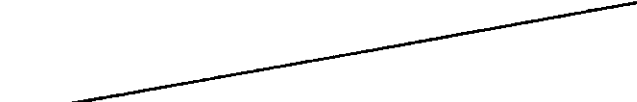
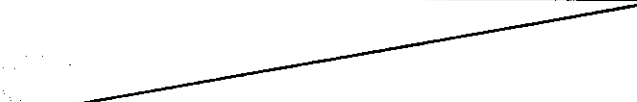
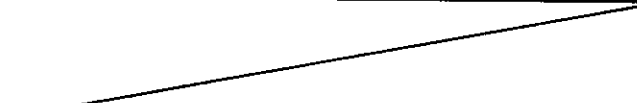
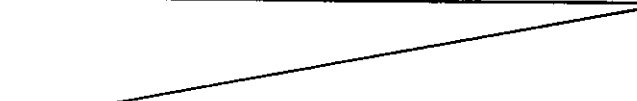
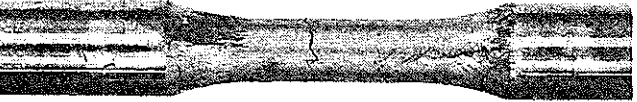
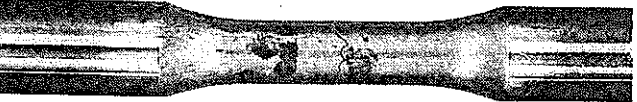

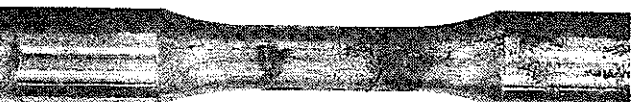

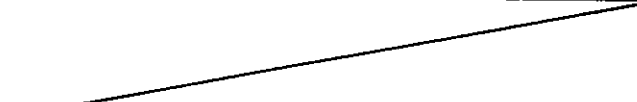

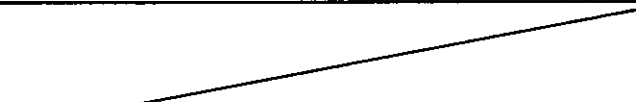




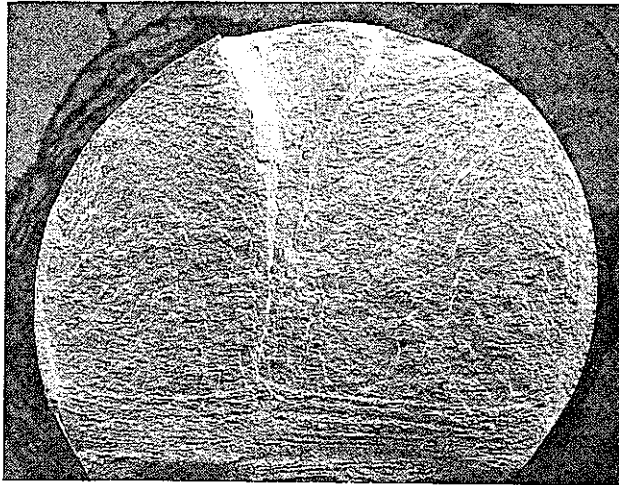
| Heat | Temp °C | TP No. | ϵ %/sec | $\Delta \epsilon t$ % | Nf cycles | Appearance of specimen |
|------|------------|--------|---------------------|--------------------------|--------------|--|
| F 6 | 450 | HTH6B1 | 0.1 | 1.003 | 3596 |  |
| | | HTH6C4 | 0.1 | 1.204 | 1710 |  |
| | 500 | HTH6A0 | 0.1 | 0.499 | 16615 |  |
| | | HTH6A1 | 0.1 | 0.699 | 4908 |  |
| | | HTH6A4 | 0.1 | 0.995 | 2904 |  |
| | | HTH6A7 | 0.1 | 1.199 | 1597 |  |
| | 550 | HTH6B6 | 0.1 | 0.504 | 13016 |  |
| | | HTH6B3 | 0.1 | 0.702 | 5087 |  |
| | | HTH6B5 | 0.1 | 1.002 | 2323 |  |
| | | HTH6C6 | 0.1 | 1.197 | 1706 |  |
| | 600 | HTH6B0 | 0.1 | 0.485 | 9853 |  |
| | | HTH6A5 | 0.1 | 0.706 | 4694 |  |

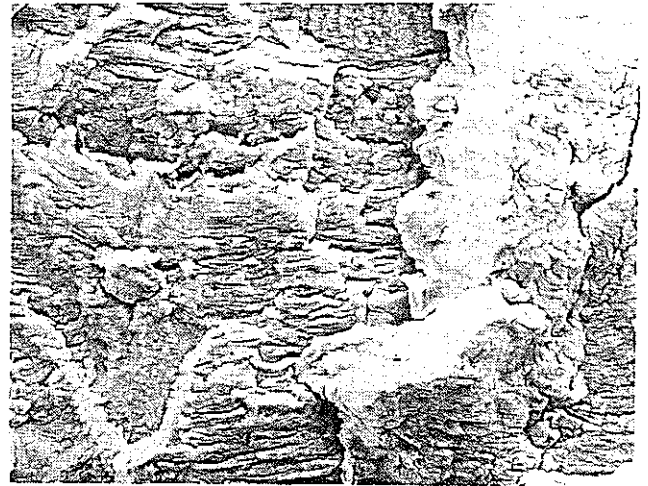
Photo. 5 Appearance of fractured fatigue specimens (5)

| Heat | Temp °C | TP No. | ϵ %/sec | $\Delta \epsilon t$ % | Nf cycles | Appearance of specimen |
|------|------------|--------|---------------------|--------------------------|--------------|--|
| F 6 | 600 | HTH6C1 | 0.1 | 0.998 | 2062 |  |
| | | HTH6A2 | 0.1 | 1.199 | 1307 |  |
| | 650 | HTH6C0 | 0.1 | 0.501 | 9857 |  |
| | | HTH6B9 | 0.1 | 0.701 | 3334 |  |
| | | HTH6B7 | 0.1 | 0.955 | 1883 |  |
| | | HTH6C7 | 0.1 | 1.198 | 1065 |  |



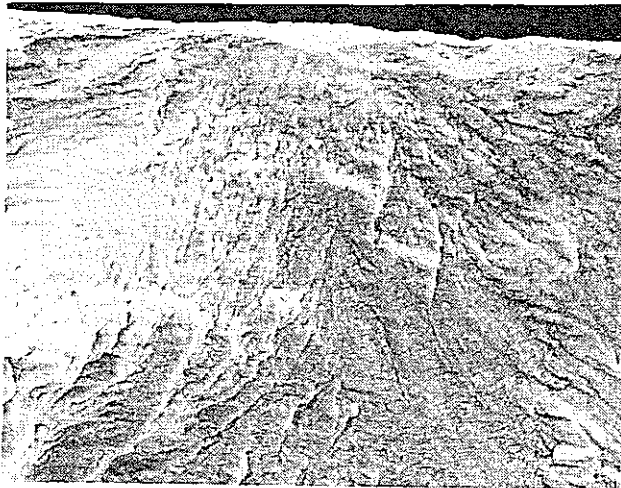
F6Heat 450°C, $\Delta \epsilon t=0.5\%$

1 mm



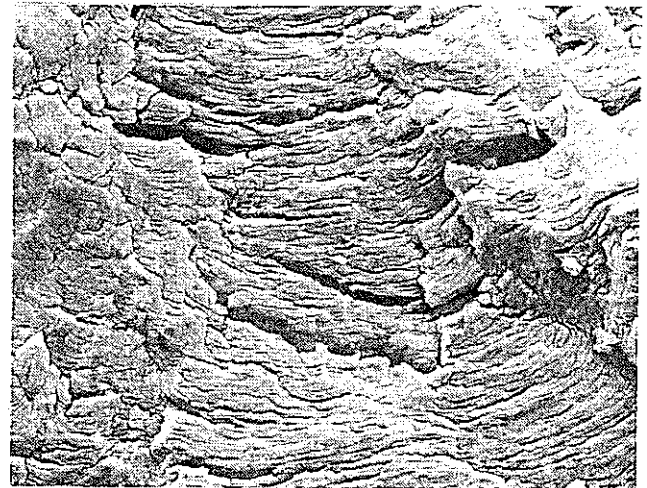
1.0mm form origin

10 μm



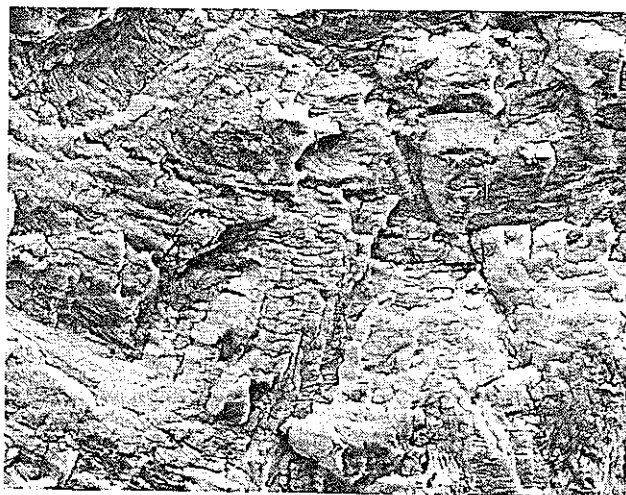
Crack origin

10 μm



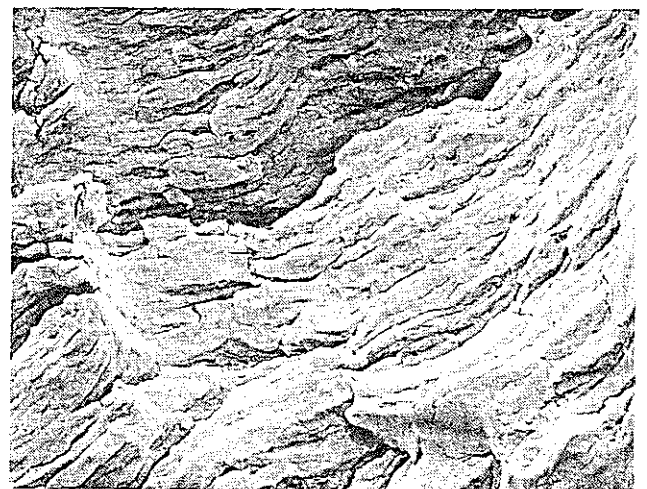
2.0mm form origin

10 μm



0.5mm form origin

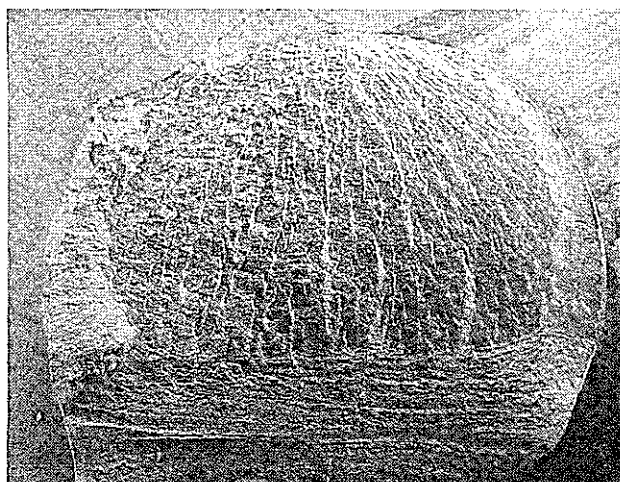
10 μm



3.0mm form origin

10 μm

Photo. 6 Observation on the fracture surface of Mod. 9Cr-1Mo steel by SEM (HTH6B2)



F6Heat 550°C, $\Delta \epsilon t=0.5\%$

1 mm



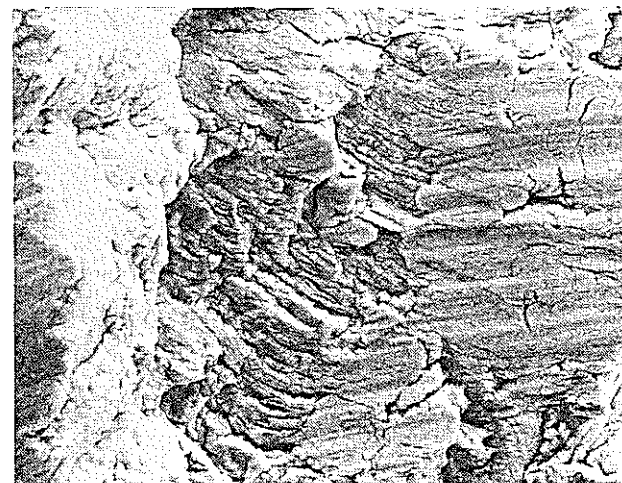
1.0mm form origin

10 μm



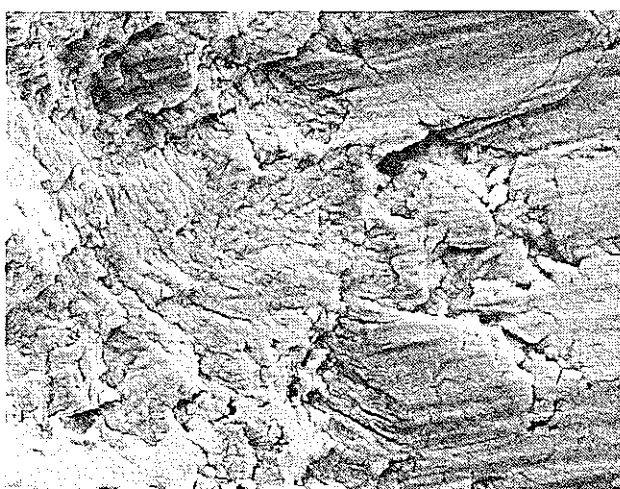
Crack origin

10 μm



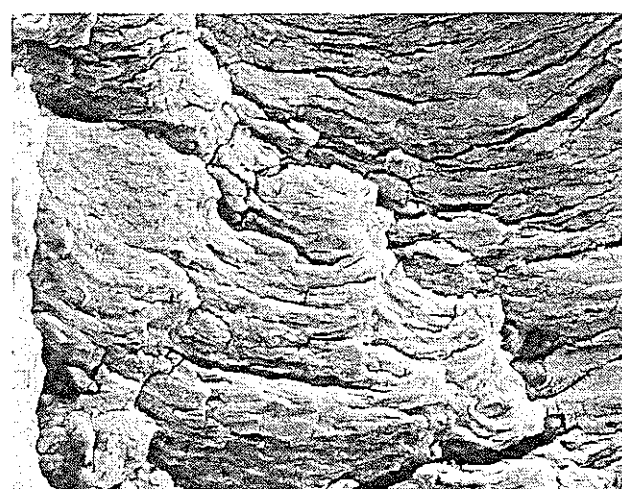
2.0mm form origin

10 μm



0.5mm form origin

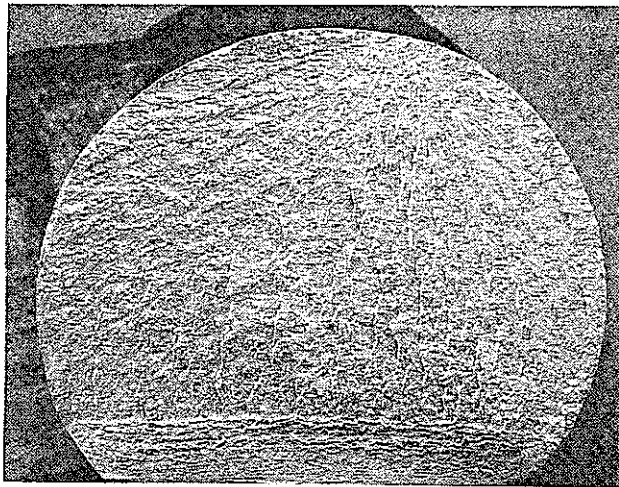
10 μm



3.0mm form origin

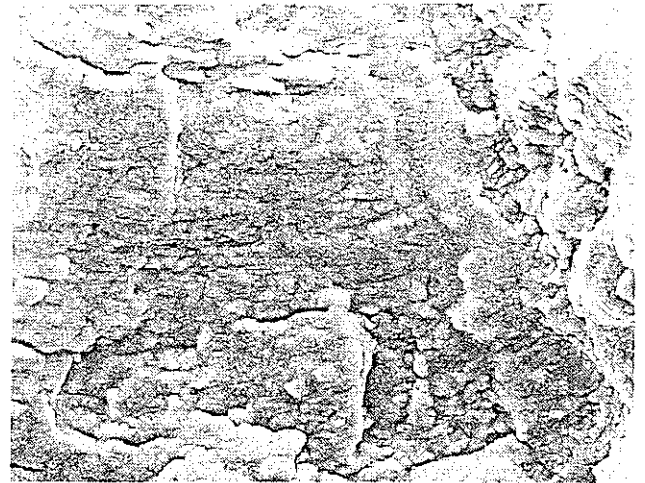
10 μm

Photo. 7 Observation on the fracture surface of Mod.9Cr-1Mo steel by SEM (HTH6A0)



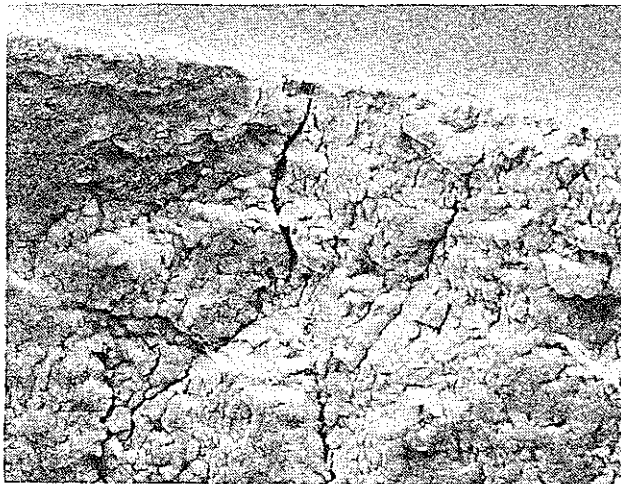
F6Heat 550°C, $\Delta \epsilon t=0.5\%$

1 mm



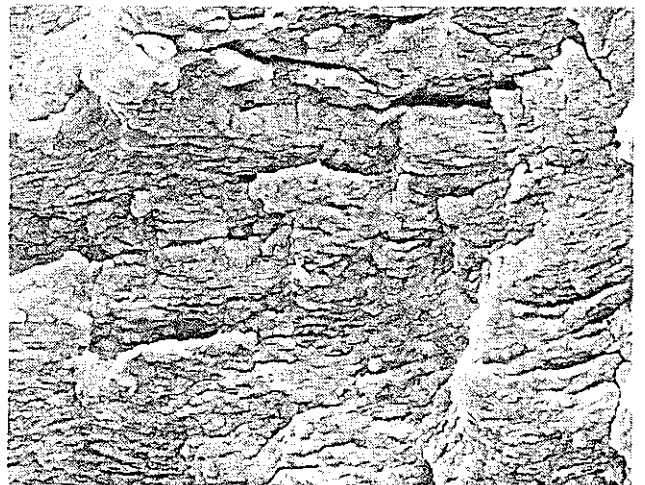
1.0mm form origin

10 μ m



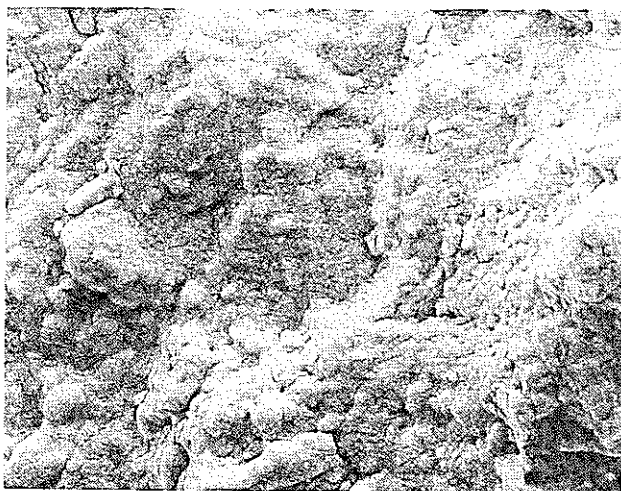
Crack origin

10 μ m



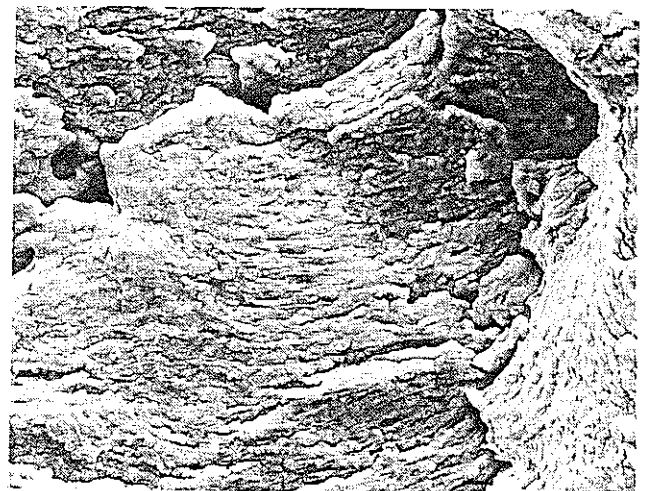
2.0mm form origin

10 μ m



0.5mm form origin

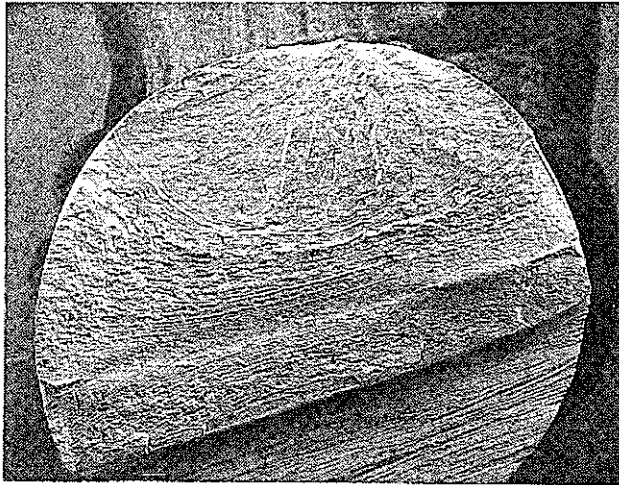
10 μ m



3.0mm form origin

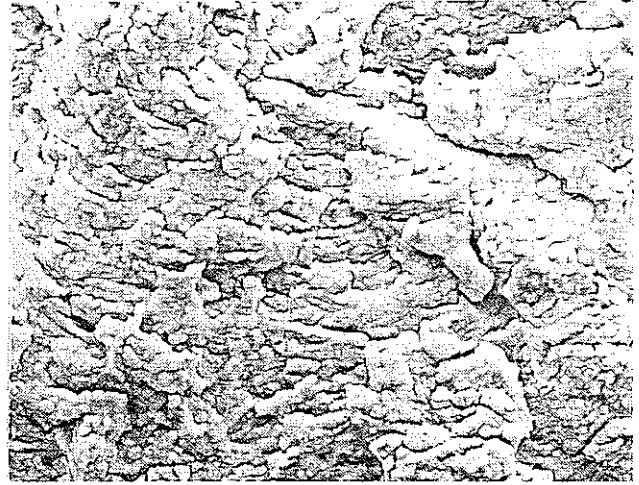
10 μ m

Photo. 8 Observation on the fracture surface of Mod. 9Cr-1Mo steel by SEM (HTH6B6)



F6Heat 650°C, $\Delta \epsilon t=0.5\%$

1 mm



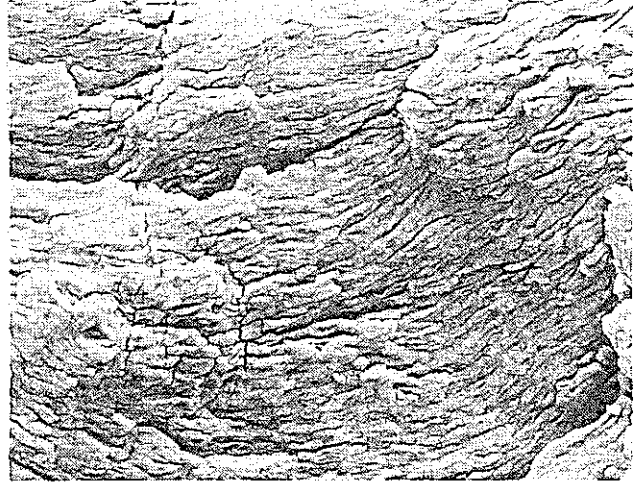
1.0mm form origin

10 μm



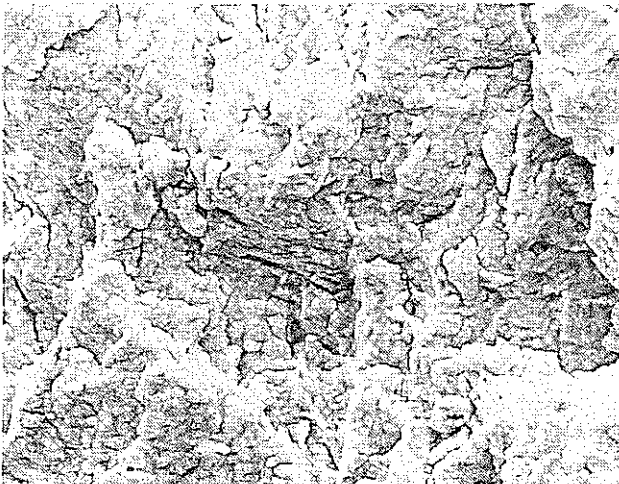
Crack origin

10 μm



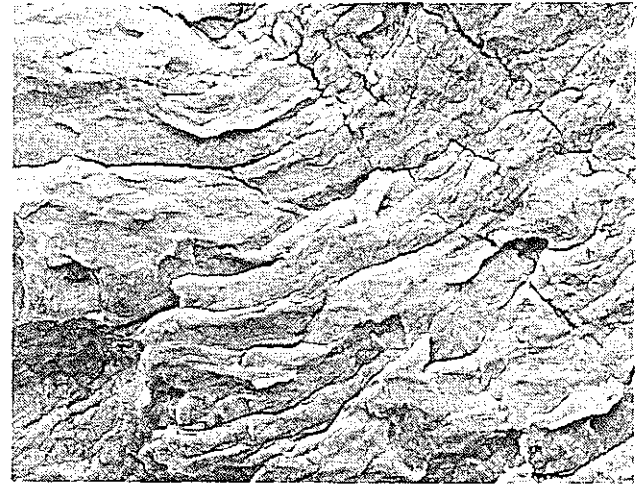
2.0mm form origin

10 μm



0.5mm form origin

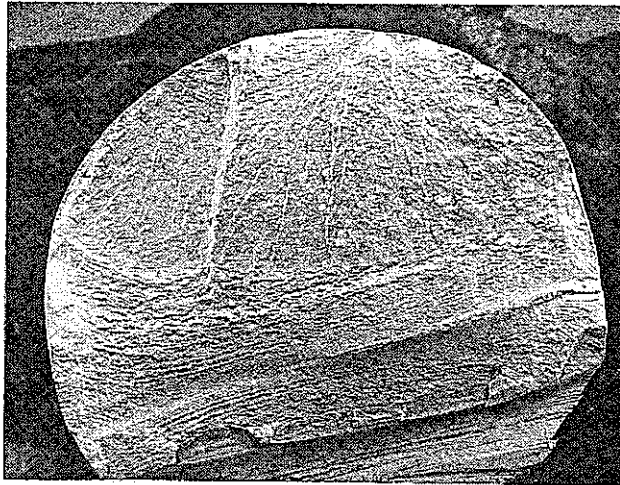
10 μm



3.0mm form origin

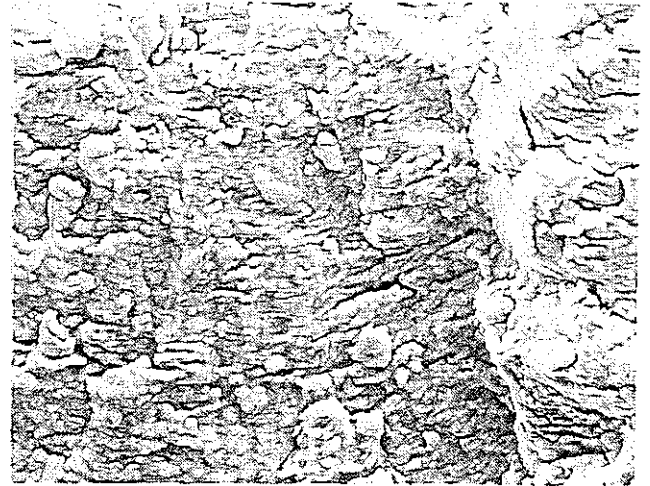
10 μm

Photo. 9 Observation on the fracture surface of Mod.9Cr-1Mo steel by SEM (HTH 6B0)



F6Heat 650°C, $\Delta \epsilon t=0.5\%$

1 mm



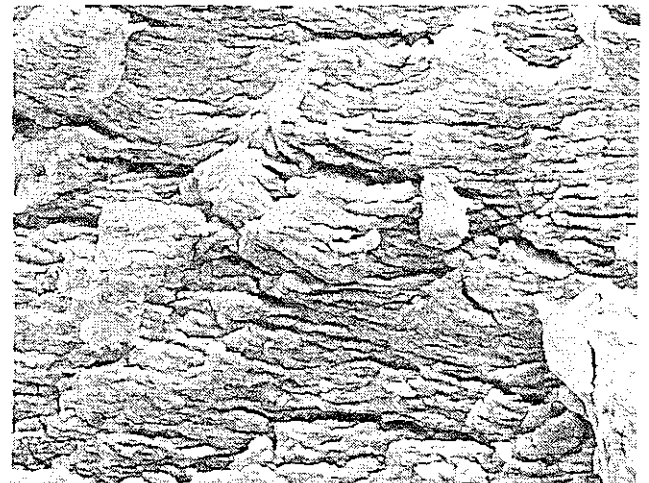
1.0mm form origin

10 μ m



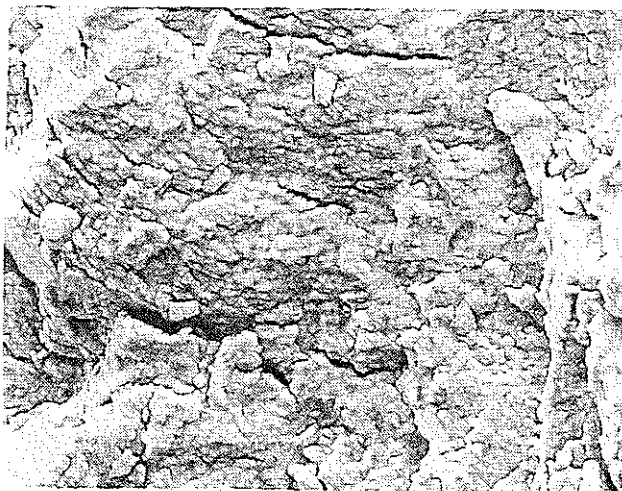
Crack origin

10 μ m



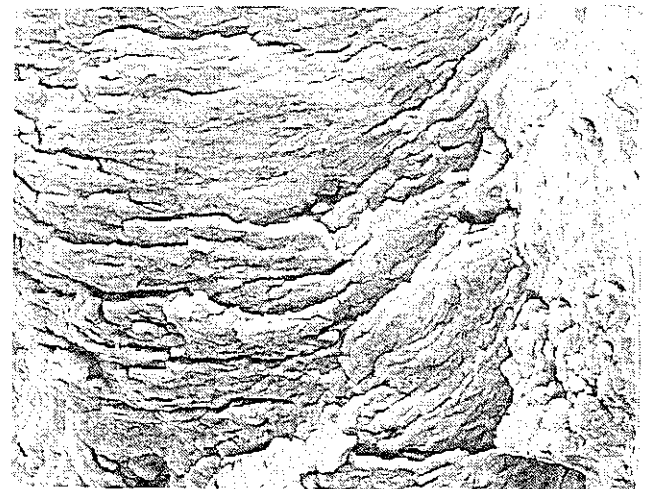
2.0mm form origin

10 μ m



0.5mm form origin

10 μ m



3.0mm form origin

10 μ m

Photo.10 Observation on the fracture surface of Mod.9Cr-1Mo steel by SEM (HTH6 CO)

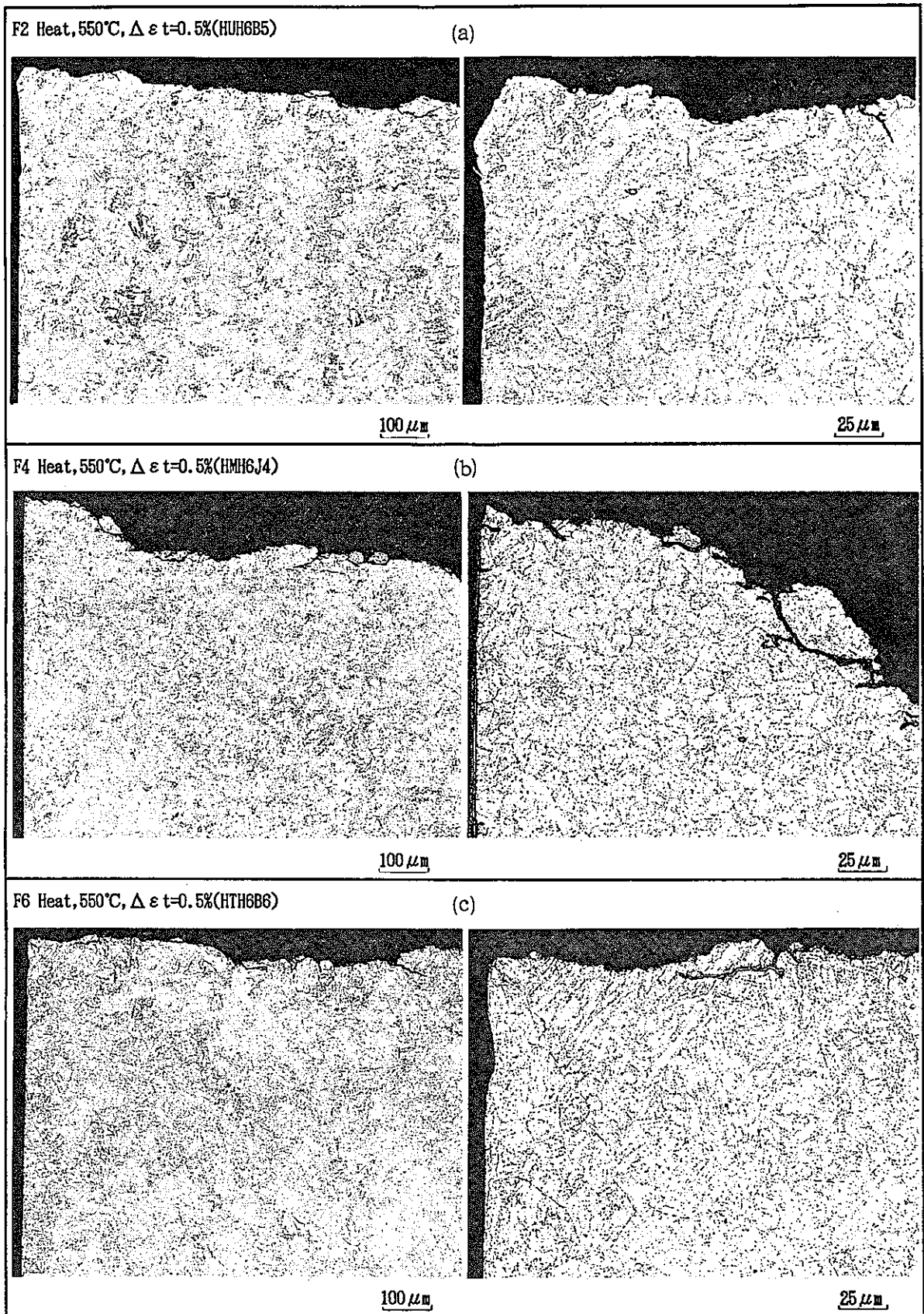


Photo.11 Microstructure of vertical sectioned fatigue specimen after test

付 録

付録A Tempalloy SW-9鋼の低サイクル疲労試験データ

Tempalloy SW-9鋼の250mmt鍛鋼品について、本編と同様の試験片、試験装置を用いて大気中疲労試験を実施した。なお、試験条件についても応力比-1、平均ひずみ零の単軸引張圧縮の三角波で定ひずみ速度制御である。試験データをTable A 1に、疲労試験結果をFig. A 1に示す。

付録B 9Cr-2Mo 鋼の低サイクル疲労試験データ

大型炉蒸気発生器候補材の1つであった9Cr-2Mo 鋼の250mmt鍛鋼品および12mmt伝熱管相当板について、本編と同様の試験片、試験装置を用いて大気中疲労試験を実施した。試験条件についても応力比-1、平均ひずみ零の単軸引張圧縮の三角波で定ひずみ制御である。試験データをTable A 2～3に、疲労試験結果をFig. A 2～3に示す。

Table A1 Low cycle fatigue data for Low-C 9Cr-1Mo-Nb-V steel

| Heat | Temp °C | TP No. | Sampling position | $\dot{\epsilon}$ %/sec | $\Delta \epsilon t$ % | $\Delta \epsilon p$ % | $\Delta \epsilon e$ % | σ_{max} kg/mm ² | σ_{min} kg/mm ² | σR kg/mm ² | Nf cycles | Failure position |
|--------|---------------|--------|----------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------|---------------------|
| 250t | 500 | HNH6J8 | 1/2t,Z | 0.1 | 0.399 | 0.076 | 0.323 | 25.459 | 24.184 | 49.643 | 18536 | A |
| | | HNH6J1 | 1/2t,Z | 0.1 | 0.497 | 0.162 | 0.335 | 24.930 | 27.013 | 51.943 | 8574 | A |
| | | HNH6J3 | 1/2t,Z | 0.1 | 0.703 | 0.346 | 0.357 | 26.547 | 27.976 | 54.523 | 3955 | A |
| | | HNH6J5 | 1/2t,Z | 0.1 | 1.050 | 0.630 | 0.420 | 28.257 | 29.779 | 58.036 | 1531 | B |
| | 550 | HNH6J7 | 1/2t,Z | 0.1 | 0.381 | 0.094 | 0.287 | 20.982 | 22.319 | 43.301 | 13677 | A |
| | | HNH6J0 | 1/2t,Z | 0.1 | 0.492 | 0.196 | 0.296 | 22.661 | 23.935 | 46.596 | 5012 | B |
| | | HNH6J2 | 1/2t,Z | 0.1 | 0.686 | 0.394 | 0.292 | 23.065 | 24.246 | 47.311 | 3096 | A |
| | | HNH6J4 | 1/2t,Z | 0.1 | 1.006 | 0.670 | 0.336 | 24.744 | 25.924 | 50.668 | 1093 | A |
| | 550 | HNH6A0 | 0/4t,L,outside | 0.1 | 0.50 | 0.25 | 0.25 | 22.6 | 22.9 | 45.5 | 6790 | A |
| | | HNH6B2 | 1/2t,L,outside | 0.1 | 0.50 | 0.25 | 0.25 | 22.9 | 23.1 | 46.0 | 4117 | A |
| | | HNH6C4 | 1/2t,Z,outside | 0.1 | 0.50 | 0.25 | 0.25 | 22.4 | 22.5 | 44.9 | 4195 | A |
| | | HNH6D6 | 0/4t,L,middle | 0.1 | 0.49 | 0.24 | 0.25 | 23.0 | 23.2 | 46.2 | 5368 | A |
| | | HNH6E8 | 1/4t,L,middle | 0.1 | 0.48 | 0.24 | 0.24 | 22.9 | 23.1 | 46.0 | 5851 | A |
| | | HNH6F6 | 1/4t,C,middle | 0.1 | 0.50 | 0.26 | 0.24 | 22.7 | 22.8 | 45.5 | 5514 | A |
| | | HNH6G3 | 1/2t,L,middle | 0.1 | 0.50 | 0.25 | 0.25 | 22.6 | 22.9 | 45.5 | 5062 | A |
| | | HNH6H5 | 3/4t,L,middle | 0.1 | 0.50 | 0.25 | 0.25 | 23.0 | 23.3 | 46.3 | 4648 | A |
| HNH6I3 | 3/4t,C,middle | 0.1 | 0.50 | 0.25 | 0.25 | 23.0 | 23.1 | 46.1 | 5504 | A | | |

$\dot{\epsilon}$ (%/sec) : strain rate
 $\Delta \epsilon t$ (%) : total strain range
 $\Delta \epsilon p$ (%) : plastic strain range
 $\Delta \epsilon e$ (%) : elastic strain range
 σ_{max} (kg/mm²) : max. stress
 σ_{min} (kg/mm²) : min. stress
 σR (kg/mm²) : stress range

Table A2 Low cycle fatigue data for 9Cr-2Mo steel

| Heat | Temp °C | TP No. | Sampling position | $\dot{\epsilon}$ %/sec | $\Delta \epsilon t$ % | $\Delta \epsilon p$ % | $\Delta \epsilon e$ % | σ_{max} kg/mm ² | σ_{min} kg/mm ² | σR kg/mm ² | Nf cycles | Failure position |
|------|------------|--------|----------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------|---------------------|
| 250t | 500 | HPH6J7 | 1/2t,Z | 0.1 | 0.386 | 0.130 | 0.256 | 23.065 | 24.122 | 47.187 | 56863 | B |
| | | HPH6J6 | 1/2t,Z | 0.1 | 0.501 | 0.199 | 0.302 | 24.029 | 25.459 | 49.488 | 15661 | B |
| | | HPH6J5 | 1/2t,Z | 0.1 | 0.704 | 0.369 | 0.335 | 25.490 | 26.981 | 52.471 | 6093 | A |
| | | HPH6J4 | 1/2t,Z | 0.1 | 1.009 | 0.658 | 0.351 | 27.790 | 29.251 | 57.041 | 2291 | A |
| | 550 | HPH6K0 | 1/2t,Z | 0.1 | 0.403 | 0.139 | 0.264 | 21.511 | 21.013 | 42.524 | 31770 | A |
| | | HPH6J1 | 1/2t,Z | 0.1 | 0.492 | 0.214 | 0.278 | 21.542 | 22.630 | 44.172 | 11734 | A |
| | | HPH6J2 | 1/2t,Z | 0.1 | 0.698 | 0.399 | 0.299 | 22.909 | 24.060 | 46.969 | 4318 | A |
| | | HPH6J3 | 1/2t,Z | 0.1 | 1.007 | 0.679 | 0.328 | 23.998 | 25.552 | 49.550 | 2023 | A |
| | 550 | HPH6A0 | 0/4t,L, outside | 0.1 | 0.50 | 0.26 | 0.24 | 22.7 | 22.9 | 45.6 | 7084 | A |
| | | HPH6B2 | 1/2t,L, outside | 0.1 | 0.50 | 0.27 | 0.23 | 21.8 | 21.9 | 43.7 | 7220 | A |
| | | HPH6C4 | 1/2t,Z, outside | 0.1 | 0.50 | 0.26 | 0.24 | 22.2 | 22.5 | 44.7 | 6080 | A |
| | | HPH6D6 | 0/4t,L, middle | 0.1 | 0.49 | 0.25 | 0.24 | 22.4 | 22.7 | 45.1 | 6484 | A |
| | | HPH6E8 | 1/4t,L, middle | 0.1 | 0.50 | 0.25 | 0.25 | 22.4 | 22.6 | 45.0 | 7222 | A |
| | | HPH6F6 | 1/4t,C, middle | 0.1 | 0.49 | 0.26 | 0.23 | 22.2 | 22.4 | 44.6 | 6014 | A |
| | | HPH6G3 | 1/2t,L, middle | 0.1 | 0.49 | 0.25 | 0.24 | 22.4 | 22.5 | 44.9 | 6147 | A |
| | | HPH6H5 | 3/4t,L, middle | 0.1 | 0.49 | 0.25 | 0.24 | 22.4 | 22.5 | 44.9 | 7087 | A |
| | | HPH6I3 | 3/4t,C, middle | 0.1 | 0.49 | 0.26 | 0.23 | 21.9 | 22.3 | 44.2 | 8658 | A |

$\dot{\epsilon}$ (%/sec) : strain rate
 $\Delta \epsilon t$ (%) : total strain range
 $\Delta \epsilon p$ (%) : plastic strain range
 $\Delta \epsilon e$ (%) : elastic strain range
 σ_{max} (kg/mm²) : max. stress
 σ_{min} (kg/mm²) : min. stress
 σR (kg/mm²) : stress range

Table A3 Low cycle fatigue data for 9Cr-2Mo steel

| Heat | Temp °C | TP No. | ϵ %/sec | $\Delta \epsilon t$ % | $\Delta \epsilon p$ % | $\Delta \epsilon e$ % | σ_{max} kg/mm ² | σ_{min} kg/mm ² | σR kg/mm ² | Nf cycles | Failure position |
|------|------------|--------|---------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------|---------------------|
| 12t | 500 | HVH6A8 | 0.1 | 1.199 | 0.851 | 0.348 | 30.992 | 33.199 | 64.191 | 1428 | A |
| | | HVH6A5 | 0.1 | 1.000 | 0.657 | 0.343 | 30.121 | 31.862 | 61.983 | 2146 | B |
| | | HVH6A6 | 0.1 | 0.701 | 0.380 | 0.321 | 28.039 | 29.748 | 57.787 | 5643 | B |
| | | HVH6A7 | 0.1 | 0.498 | 0.187 | 0.311 | 28.536 | 26.484 | 55.020 | 11256 | B |
| | 550 | HVH6A4 | 0.1 | 1.200 | 0.879 | 0.321 | 27.293 | 28.909 | 56.202 | 1303 | B |
| | | HVH6A3 | 0.1 | 1.000 | 0.664 | 0.336 | 28.318 | 29.873 | 58.191 | 1966 | B |
| | | HVH6A1 | 0.1 | 0.700 | 0.394 | 0.306 | 25.645 | 27.199 | 52.844 | 4308 | B |
| | | HVA6A2 | 0.1 | 0.501 | 0.212 | 0.289 | 23.220 | 24.681 | 47.901 | 10334 | B |
| | 600 | HVH6B3 | 0.1 | 1.197 | 0.940 | 0.257 | 23.220 | 23.034 | 46.254 | 882 | A |
| | | HVH6B2 | 0.1 | 0.960 | 0.679 | 0.281 | 22.101 | 21.791 | 43.892 | 1595 | A |
| | | HVH6B1 | 0.1 | 0.703 | 0.444 | 0.259 | 21.728 | 21.946 | 43.674 | 2456 | A |
| | | HVH6B0 | 0.1 | 0.498 | 0.247 | 0.251 | 19.988 | 20.392 | 40.380 | 6849 | B |

ϵ (%/sec) : strain rate
 $\Delta \epsilon t$ (%) : total strain range
 $\Delta \epsilon p$ (%) : plastic strain range
 $\Delta \epsilon e$ (%) : elastic strain range
 σ_{max} (kg/mm²) : max.stress
 σ_{min} (kg/mm²) : min.stress
 σR (kg/mm²) : stress range

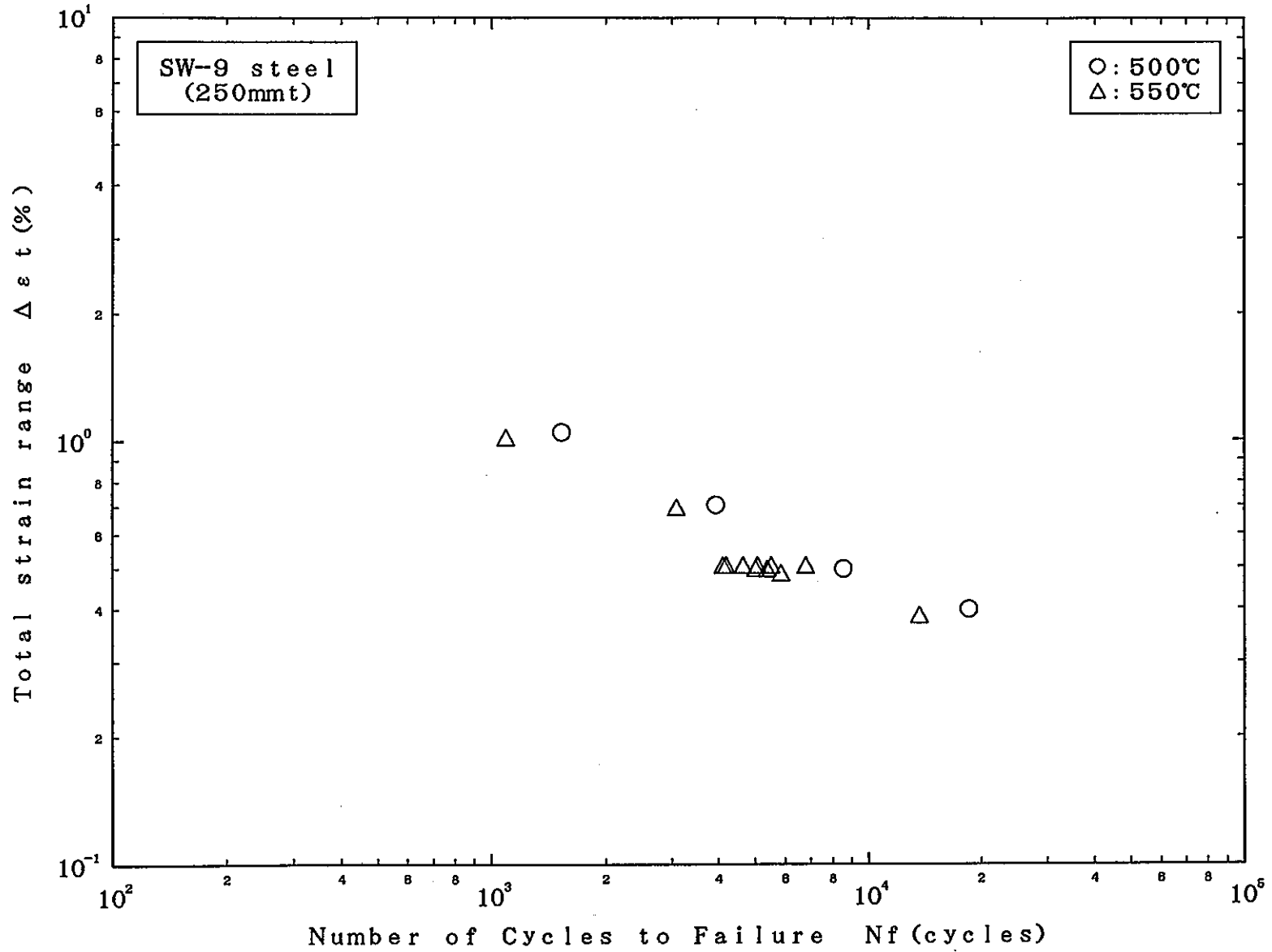


Fig.A1 Relation between total strain range and fatigue life for Tempalloy SW-9 steel (250mmt)

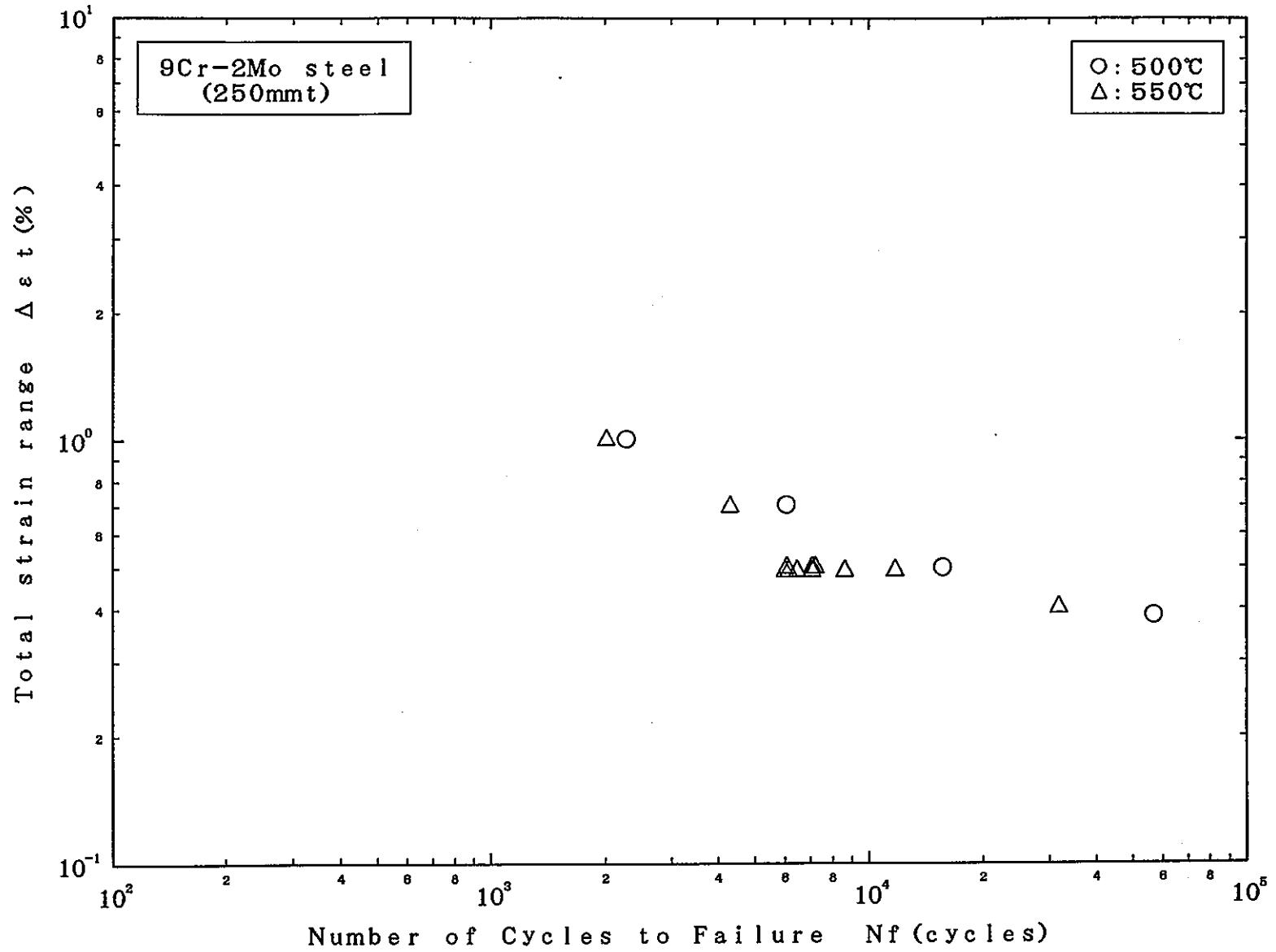


Fig.A2 Relation between total strain range and fatigue life for 9Cr-2Mo steel (250mmt)

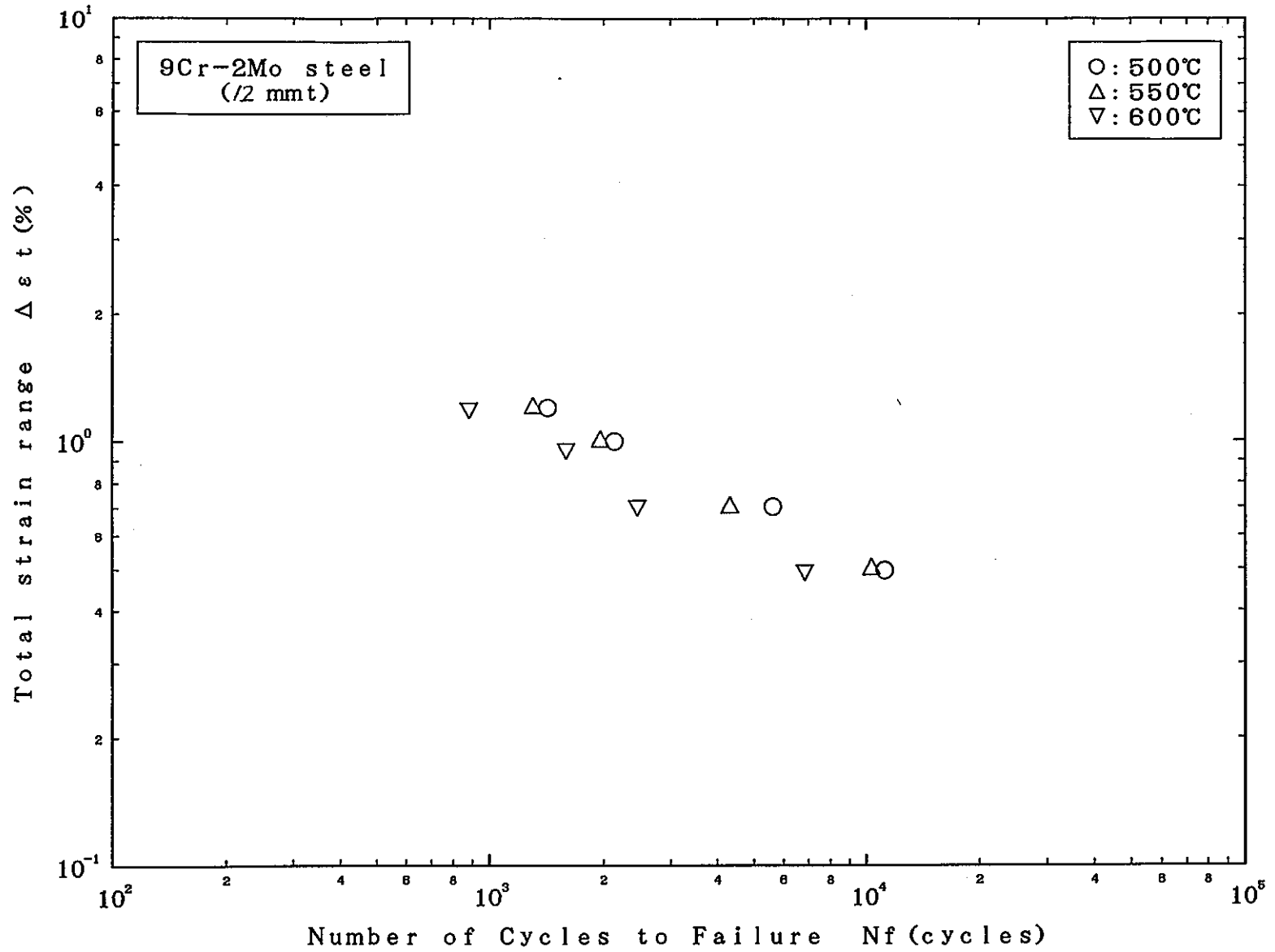


Fig. A3 Relation between total strain range and fatigue life for 9Cr-2Mo steel (12mmt)