SUS 316 切欠き材の高温低サイクル疲労 および破面に及ぼす保持時間の影響*

藤 原 昌 晴** 佐 近 淑 郎** 砂 本 大 造**

Effect of Stress Hold Time on High Temperature Low-cycle Fatigue
Fracture Mode for Notched 18 Cr-8 Ni-Mo Stainless Steel Specimens

by

Masaharu FUJIWARA, Toshio SAKON and Daizo SUNAMOTO

(Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Takasago)

The low-cycle fatigue tests with varying stress hold time at the tensile maximum stress were conducted on the circumferentially grooved specimens of 18 Cr-8 Ni-Mo stainless steel (SUS 316) at 550°C. The results of micro-fractographical study are as follows:

(1) In general, the shorter hold time condition gave the transgranular fracture mode, and the longer hold condition gave the intergranular mode. Intergranular facets appeared when the average propagation rate ($4S/t_H$) became less than 10^{-3} mm/min.

(2) The striation spacing was not affected by the duration of stress hold. Therefore, the stress hold time seems to affect the crack propagation rate only during the initial fatigue stage where the striation pattern is unobservable.

(Received June 27, 1977)

キー・ワード：疲労・クリープ相互効果，フラクトグラフィ，SUS 316，粒界破面率，切欠き効果

1 緒 言

クリープが重畳する領域での疲労問題に関しては，近年かなりの研究結果が報告されており，設計面でも ASME Code Case 1592 の累積損傷則が指針となって応用されているが，その妥当性を示すデータは必ずしも充分でない。また，疲労とクリープの相互作用下の挙動を把握するためには，強度データの収集と同時にフラクトグラフィによる破壊機構の解明も必要であるが，そのデータは現在とくに少ない。

そこで，SUS 316，切欠き試験片を用いて，荷重保持高温低サイクル疲労試験を行い，保持時間が寿命に与える影響を検討したが，本報ではその破面観察を行った結果についてまとめたものである。

2 供試材および試験方法

供試材は SUS 316 ステンレス鋼板（板厚 25 mm，1100°C-50分-WQ）であり，その成分を Table I に示す。

試験片は，Fig. 1 に示す環状切欠き付き丸棒型であり，Peterson の弾性応力集中係数 $K_t=5$ および 3 の 2 種類を用いた。疲労試験は，高周波誘導方式により

Table I. Chemical compositions (%).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.05	0.53	1.53	0.015	0.010	17.52	11.80	2.59

Fig. 1. Dimensions of fatigue specimens.

試験片を 550°C に加熱し，電気油圧サーボ方式の疲労試験機で荷重制御の試験を行った。波形は引張側のみに荷重保持時間を有する完全両振りの台形波である。保持時間は 1，10，60 分の 3 種類とし，繰返し部は公称応力速度がほぼ $1 \text{ kg/mm}^2/\text{sec}$ である。

3 実験結果

得られた結果をまとめて Table II に示す。また，公称保持応力 S_H と破断繰返し数 N_f の関係を Fig.

* 原稿受理 昭和52年6月27日

** 正 会 員 三菱重工業(株)高砂研究所 高砂市荒井町

Table II. Summary of fatigue test results.

K_t	t_H (min)	NO.	S_H (kg/mm ²)	N_f	Σt_H (h)
5	1	E 1	32.0	302	5.0
		E 2	28.0	538	9.0
		B 2	25.0	716	11.9
		B 4	22.5	1897	31.6
		B 5	20.0	2630	43.8
	10	B 1	18.0	3291	54.9
		D 2	32.4	118	19.7
		D 3	28.0	184	30.7
		D 1	25.0	333	55.5
		D 5	23.5	695	115.8
		D 4	21.0	962	160.3
	60	D 7	28.0	48	48.0
		D 9	25.0	109	109.0
		D10	23.5	94	94.0
3	1	C 6	32.0	374	6.2
		A 8	28.0	578	9.6
		C 7	25.0	1126	18.8
		A 9	22.5	1258	21.0
		C 8	20.0	2056	34.3
	10	A10	19.0	2572	42.9
		C 1	32.0	186	31.0
		C 2	28.0	209	34.8
		C 5	25.0	730	121.7
		C 3	23.5	960	160.0
		C 4	22.0	709	118.2

Fig. 2. Relation between nominal hold stress and number of cycles to failure.

2 に示す。ここに公称応力は試験片の原最小断面積で荷重を除いた値である。図中の破線は同じ条件で行った平滑材の荷重制御低サイクル疲労寿命を示している。Fig. 2 より次のことがわかる。

- (1) 荷重保持時間 t_H が長いほど N_f は減少する。
- (2) 応力集中係数 ($K_t=5, 3$) の違いによる N_f の差はほとんどない。

(3) 切欠き材は全般に平滑材よりも長寿命 (切欠き強化) である。ただし、1 分保持の長寿命側でのみ切欠き弱化的傾向がみられる。

切欠き材の破断繰返し数 N_f に関しては、上記のような特徴があるが、機器の設計上重要となるのは、不連続でのき裂発生寿命であるので、今回の実験でも約 10 倍の望遠鏡によりき裂発生を観察を行った。しかし、環状切欠き試験片を用いているため、き裂が見にくく正確な N_c の決定は困難であった。ただし、初めてき裂が発見された繰返し数は、Fig. 3 に示すように、ほぼ $0.1 \sim 0.4 N_f$ となっているので、 N_c ペースでは全般に切欠き弱化的となる。

Fig. 3. Relation between number cycle to initiation of crack and number of cycles to failure.

4 破面観察結果

走査電子顕微鏡による破面写真例を Fig. 4~8 に示す。試験片 B2, D1, D10 は公称応力がほぼ等しくて、保持時間がそれぞれ $t_H=1, 10, 60$ min と異なるものであるが、破面様相は保持時間の長短によって、かなり相違している。保持時間の短い B2 の破面は、Fig. 4 のようにき裂発生域約 50μ を除いて完全なストライエーションが認められ、以後ストライエーション間隔が広くなるとともに、ディンプル面積率が増し、急速破壊へ移る通常の低サイクル疲労破壊の形態をとっている。これに対して、保持時間の長い D1, D10 の破面については、Fig. 5, 6 のように初期き裂領域が粒界ファセットで占められており、保持時間の比較的短い D1 では、ストライエーションを経て急進破壊に移行するが、保持時間の長い D10 では、ストライエーションはなく、急進破壊に移行する形態をとっている。

このように、保持時間が長くなると、粒界支配の破壊傾向が強くなってくるが、とくに、き裂の初期には

Fig. 4. Fracture surface of No. B2 specimen.
($t_H=1$ min, $N_f=716$)

Fig. 5. Fracture surface of No. D1 specimen.
($t_H=10$ min, $N_f=333$)

粒界上にストライエーション状の模様（以下擬ストライエーションとよぶ、Fig.5~7 にISとして示す）が認められ、保持時間のある低サイクル疲労破面の特徴を示している。

$t_H=1$ min の破面でも、破断繰返し数の多い側 ($N_f \geq 2000$) では、Fig.8 のように粒内ストライエーションが粒界微小クラックを伴い、1 結晶粒単位で方向を変えて進む傾向があり、粒界や結晶方位などの影響を

(a) $t=0.24$ mm

(b) $t=1.4$ mm

Fig. 6. Fracture surface of No. D10 specimen.
($t_H=60$ min, $N_f=94$)

Fig. 7. Stereo fractograph of No. B1 specimen by SEM.
($t_H=1$ min, $N_f=3291$)

$t=0.66$ mm

Fig. 8. Fracture surface of No. B4 specimen. ($t_H=1$ min, $N_f=1897$)

受けやすくなると思われる。

粒内ストライエーションは、極めて明瞭であるので、中実丸棒に同芯円状のき裂が進行したと仮定して、次式に基づいて応力拡大係数を計算した。

$$K = \frac{P}{D^{3/2}} \cdot Y \quad (1)$$

$$Y = 1.72 \frac{D}{D_0 - 2t} - 1.27$$

ここで、 D は外径、 d_0 は切欠き底直径、 t はき裂深さを示す。

粒内ストライエーションの間隔 ΔS は、Fig. 9 に示すように、低サイクル疲労であるにもかかわらず、 $4K/2$ との両対数グラフ上で直線となり、次に示す指数則が成立する。

Fig. 9. Relation between striation spacing and stress intensity factor.

$$\Delta S = 1.1 \times 10^{-9} \left(\frac{\Delta K}{2} \right)^{3.5} \quad (2)$$

保持時間が異っても(2)式の定数はほぼ一定であり、粒内ストライエーション間隔には、保持時間があまり影響しない time independent であることを示している。しかし、破断繰返し数は、長時間保持ほど短くなっていることから、き裂の発生およびストライエーションの生ずるまでの、低速伝ば域に主として、保持時間が影響していると考えられる。なお、粒界に生じた疑ストライエーション(図中ぬりつぶし印)の間隔は、いずれも 1μ 以上あり、総体的に粒内ストライエーションよりも数倍広い。また、 K 値との対応も不充分であることから、その間隔が1サイクル毎に生じたものとは考えにくい。

粒界ファセットは、破面初期に生じやすいが、Fig.

Fig. 10. Relation between the ratio of intergranular, and dimple fracture.

10 のように保持時間 t_H によって分布が異り、長時間保持ほど粒界破面率が増し、その範囲も広がっているこの粒界破面率と K 値の関係を Fig. 11 に示したが、 $4K/2 \div 100 \text{ kg/mm}^{3/2}$ 以下から急増し、 $4K/2 \div 50 \text{ kg/mm}^{3/2}$ 付近でピークとなっている。しかし、保持時間によっては、粒界破面率が0のものもあり、必ずしも良い対応がない。粒界破面率の K 値依存に対しては、その振幅が影響し、き裂先端の動的な塑性域の大きさが1結晶粒大になったときに、ピークを生ずるケースが報告されている。しかし、今回のケースでは繰返し応力振幅の他に、クリープ要因が重畳しており、単に $4K$ のみでき裂進展を規定することができなくなっていることを示している。

き裂の進展速度を実測していないので、ストライエーションを保持時間で除して、平均的なき裂速度 $\Delta S/t_H$ を算出し、粒界破面率との関係を Fig. 12 に示した。

Fig. 11. Relation between the ratio of intergranular fracture and stress intensity factor.

Fig. 12. Relation between the ratio of intergranular fracture and mean crack propagation rate.

これによると、 $\Delta S/t_H$ が約 10^{-3} mm/min 以下になると粒界破断を生じはじめ、き裂速度が遅くなるほど粒界破断率の増す傾向が認められる。これは平均的なき裂伝ば速度が遅くなるほど、クリープによる粒界のすべりもしくはボイドの生長などが影響しやすくなり、クリープ支配型の破壊へ移行しつつあることを示すものとする。

急進破壊部を除いた破面形態の分類図を Fig. 13 に示す。全般に保持時間 Σt_H が短いと粒内破壊形が支配的であるが、 Σt_H が長くなるに従って粒界破壊形となる。また、繰返し数が増すと粒内破壊しやすくなる。ストライエーションは $N_f \div 10^2$ 以上で認められている。

Fig. 13. Change of fracture mode in fatigue specimens.

5 結 言

SUS 316 ステンレス鋼の応力保持低サイクル疲労破面の観察を行い、次のような結果を得た。

(1) 破面は短時間保持時間側が粒内破壊、長時間保持時間側が粒界破壊となり、粒界ファセットは平均伝ば速度 $\Delta S/t_H \div 10^{-3}$ mm/min 以下で生じやすい。

(2) ストライエーションの間隔は、保持時間によってあまり変わらず、ストライエーションの生じない低速伝ば域で保持時間の影響が大きくなる。

(昭和52年5月27日 日本材料学会第1回フラクグラフィシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) ASME, B&PV, Code case, 1592-9 (1977).
- 2) 日本溶接協会 FCI 小委員会, 昭和48年度成果報告書 (1975).
- 3) Brwon, W.F. Jr., J.E. Srawley, ASME STP, **410**, 1 (1967).
- 4) 村上理一, 小林英男, 小峰厚友, 中沢 一, 日本機械学会講演論文集, **760-2**, 233 (1976).