熱疲労における損傷について*

平 修 二** 藤 野 宗 昭**

Fatigue Damage in Thermal Fatigue

by

Shuji TAIRA and Motoaki FUJINO

(Department of Engineering Science, Kyoto University, Kyoto)

In-phase- and out-of-phase-thermal fatigue tests under several combinations of the minimum and the maximum cycle temperatures were carried out on a low carbon steel and 304 stainless steel, in order to investigate the effect of the difference in temperature between the tension going and compression going periods on the fatigue life. In the study, the maximum cycle temperature T_2 and the minimum cycle temperature T_1 were regarded as the temperature in the tension going period and that in the compression going period, respectively, in the case of in-phase thermal fatigue, because a tensile plastic strain was induced at the temperature close to T_2 and a compressive plastic strain at the temperature close to T_1 . For the similar reason, T_1 and T_2 were regarded as the temperature in the tension going period and that in the compression going period in the case of out-of-phase thermal fatigue.

For both steels, the thermal fatigue life was found to be longest under the strain cycling at $T_1=T_2$ (i. e., isothermal fatigue), a larger difference in temperature between the two periods gave the shorter fatigue life. The results of the thermal fatigue life obtained were summarized by the following damage concept.

The thermal fatigue damage in one cycle $\Delta\phi$, which is defined as the inverse of the cycle number to failure, can be given by the equation: $\Delta\phi = (\Delta\phi' + \Delta\phi'')/2 + \eta(\Delta\phi' - \Delta\phi'')/2$, where $\Delta\phi'$ and $\Delta\phi''$ are isothermal fatigue damages at the temperatures equal to those in the tension going and compression going periods of thermal fatigue. The value of parameter η is about 7.9 in the case of in-phase thermal fatigue and about -4.2 in out-of-phase thermal fatigue, which seems to be independent not only of the cycle temperature condition but also of the material.

(Received Aug. 19, 1977)

キー・ワード：熱疲労，温度変動効果，疲労損傷

1 緒 言

複雑なひずみ波形および温度波形にさらされる高温用機械部材の疲労特性を推定する場合には、単に三角ひずみ波形下の高温低サイクル疲労特性を調べるだけでなく、その疲労特性に及ぼす周期の影響、ひずみ波形の影響、および1サイクル中の温度変動の影響を明らかにする必要がある。しかしながら、前報の緒言でも述べたように、この分野の多くの研究にもかかわらず、未解決の部分が残されているので、筆者らは鋼の高温低サイクル疲労特性に及ぼすひずみ波形の影響を明らかにすることを目的として、鋸歯状ひずみ波形下の高温低サイクル疲労特性を詳細に調べた。その結果、三角ひずみ波形下の場合に比べて、鋸歯状ひずみ波形

下では、引張期間と圧縮期間のひずみ速度の差に依存して、付加的損傷の発生することが前報で明らかとなった。

本報では、鋼の低サイクル疲労特性に及ぼす1サイクル中の温度変動の影響、すなわち熱疲労特性を明らかにするために、まず、従来からやや断片的に報告してきた低炭素鋼とオーステナイト系ステンレス鋼に関する熱疲労試験の結果をとりまとめて報告する。次いで、熱疲労寿命と高温低サイクル疲労寿命を比較することによって引張期間と圧縮期間の温度差に依存して付加的な損傷が発生するかどうかを検討する。

2 実験方法

2・1 供試材料および試験片

供試材料は前報と同じく、機械構造用低炭素鋼 (S15C) およびオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304)

* 原稿受理 昭和52年8月19日

** 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

である。

熱疲労試験には均一加熱・冷却の容易な中空円筒形状の試験片を使用した。試験片の形状・寸法を Fig. 1 に示す。また、高温低サイクル疲労および熱疲労試験の結果が試験片の形状に影響されとの報告がある⁽¹⁴⁾ので、熱疲労寿命との対比を意図して実施した高温低サイクル疲労試験にも、中空円筒形状の試験片を用いた。なお、試験片の内表面はホーニング研磨、外表面は 600 番エメリー紙で研磨した。

Fig. 1. Shape and dimension of the specimen.

2・2 試験装置および試験方法

本研究に使用した試験装置は高温低サイクル疲労試験と併用できる型式であって、電気・油圧サーボ方式の引張り・圧縮疲労試験機、高周波発振器、空気圧縮機、温度制御系、ひずみ制御系および関数発生器から構成される。

熱疲労試験の場合には、試験片に一定電力の高周波および一定流量の空気が交互に供給され、ほぼ三角波形状の温度波形 (1 cpm あるいは 0.5 cpm) が発生する。さらに、繰返し加熱・冷却される試験片の温度を熱電対で検出し、その熱起電力を定数倍してひずみ制御器の指令信号とすると、試験片には自由膨張・収縮以上に繰返し伸縮が加えられ、Fig. 2 に示すように、ひずみと温度が同期して変化するときの in-phase 熱疲労試験が実施される。熱起電力を減衰あるいは反転してひずみ制御器の信号とすると、ひずみと温度とが 180° の位相差を保って変化するときの out-of-phase 熱疲労試験が実施される。高温低サイクル疲労試験の方法、熱疲労試験における温度分布その他については前報に記述した。なお、本報における破損繰返し数 (以後、疲労寿命と称する) は疲労試験において荷重振幅が最大値を示した後に最大値の 3/4 に減少し

Fig. 2. Two types of cyclic temperature.

たときの繰返し数である。

2・3 試験条件

S15C 鋼の熱疲労試験の温度サイクル条件は、温度範囲 ΔT が一定で上限温度 T_2 が異なるもの、平均温度 T_m が一定で温度範囲が異なるもの、および上限温度が一定で温度範囲の異なるものの 3 系統である。SUS 304 鋼の熱疲労試験は S15C 鋼の熱疲労寿命が上限温度に

Table I. Thermal fatigue test results of S15C (1 cpm).

(a) Out-of-phase						
T_1-T_2 (°C)	$\Delta\epsilon$ (%)	$\Delta\epsilon_p$ (%)	$\Delta\sigma$ (kg/mm ²)	$\sigma(T_1)$ (kg/mm ²)	$\sigma(T_2)$ (kg/mm ²)	N_f (cycle)
100-400	0.38	0.13	49.7	29.7	-20.7	14 230
	0.52	0.25	57.0	—	—	6 890
	0.64	0.24	59.0	31.2	-25.2	5 405
	0.71	0.33	58.5	32.8	-25.6	5 283
	0.87	0.48	70.6	38.8	-31.8	3 170
	0.92	0.51	71.8	39.6	-32.2	3 515
200-500	0.43	0.14	44.0	30.0	-14.0	6 011
	0.44	0.21	45.9	30.0	-15.9	4 197
	0.54	0.26	49.6	31.5	-18.1	3 978
	0.73	0.39	63.4	—	—	898
	0.70	0.40	59.0	41.0	-17.0	815
	0.70	0.41	55.8	35.5	-19.3	1 314
	0.68	0.43	61.0	40.7	-19.3	1 277
	0.72	0.44	60.3	—	—	892
	0.83	0.47	56.8	33.0	-22.8	1 601
	0.93	0.62	61.6	37.6	-21.8	730
	1.08	0.68	64.4	38.9	-22.1	500
	1.15	0.88	64.7	39.9	-24.0	511
300-600	0.48	0.25	32.4	20.4	-11.1	1 715
	0.58	0.35	33.8	21.5	-11.4	1 509
	0.74	0.48	39.3	25.2	-11.2	932
	0.87	0.62	46.7	30.5	-15.4	481
150-550	0.58	0.31	53.4	33.4	-18.1	1 423
	0.81	0.51	51.0	32.0	-16.2	760
	0.86	0.60	52.3	31.8	-19.0	741
	1.08	0.85	60.0	35.2	-18.5	600
100-600	0.63	0.36	48.1	31.4	-14.7	900
	0.82	0.60	48.1	27.0	-11.8	310
	0.89	0.63	48.9	30.9	-10.4	387
	0.96	0.68	57.5	35.6	-17.4	500
(b) In-phase						
T_1-T_2 (°C)	$\Delta\epsilon$ (%)	$\Delta\epsilon_p$ (%)	$\Delta\sigma$ (kg/mm ²)	$\sigma(T_1)$ (kg/mm ²)	$\sigma(T_2)$ (kg/mm ²)	N_f (cycle)
100-400	0.60	0.30	68.7	-40.8	27.9	7 040
	0.70	0.35	63.6	-39.5	24.1	5 766
	0.86	0.59	82.8	-49.9	32.9	1 511
	0.90	0.54	72.2	-45.0	27.2	1 944
200-500	0.42	0.17	51.4	-34.3	—	3 550
	0.51	0.24	49.2	-33.9	—	1 090
	0.53	0.26	52.6	-36.1	—	1 000
	0.60	0.33	64.4	-41.6	—	1 918
	0.70	0.41	59.0	-38.2	—	694
	0.71	0.42	59.2	-37.7	—	458
	0.75	0.46	58.0	-37.8	—	710
	0.85	0.55	71.0	-45.4	—	804
300-600	0.70	0.40	39.5	-29.9	—	594
300-500	0.70	0.35	44.5	-29.7	—	1 062
400-500	0.70	0.39	33.9	-21.4	—	1 162

T_1 : Minimum cycle temperature,
 T_2 : Maximum cycle temperature,
 $\Delta\epsilon$: Total strain range, $\Delta\epsilon_p$: Plastic strain range,
 $\Delta\sigma$: Stress range, $\sigma(T_1)$: Stress at T_1 ,
 $\sigma(T_2)$: Stress at T_2 ,
 N_f : Number of cycles to failure.

著しく依存することが判明した後に実施したので、下限温度を一定として上限温度の異なる温度サイクル条件下で実施した。なお、高温低サイクル疲労における寿命および温度範囲の温度依存性が400℃以上（S15C）、あるいは600℃以上（SUS 304）で顕著であるので、主たる上限温度はS15C鋼に関しては400℃および500℃、SUS 304 鋼に関しては550℃および750℃である。

また、高温低サイクル疲労試験は原則として熱疲労の下限温度、平均温度および上限温度に相当する温度下で周波数を等しくして実施した。ただしS15C鋼については300℃以下、SUS 304 鋼については600℃以下の温度域では疲労寿命に及ぼす周波数の影響の少ないことが前報で明らかとなったので、300℃以下の温度域における低サイクル疲労試験の周波数は5 cpm 以上の場合が多い。

3 熱疲労試験結果

out-of-phase 熱疲労および in-phase 熱疲労の試験条件と試験結果をS15C鋼についてはTable Iに、SUS 304 鋼についてはTable IIに示す。また、同一形状の中空円筒試験片を用いて実施した高温低サイクル疲労試験の結果をTable IIIに示す。

熱疲労における全ひずみ範囲と疲労寿命の関係を調べるために、表に記載された実験結果の中からS15C鋼については温度サイクル条件が200～500℃の場合の結果を、SUS 304 鋼については200～750℃の場合の

Table II. Thermal fatigue test results of SUS 304 (0.5 cpm).

(a) Out-of-phase						
T_1-T_2 (°C)	$\Delta\epsilon$ (%)	$\Delta\epsilon_p$ (%)	$\Delta\sigma$ (kg/mm ²)	$\sigma(T_1)$ (kg/mm ²)	$\sigma(T_2)$ (kg/mm ²)	N_f (cycle)
200-550	0.62	0.23	60.6	33.3	-27.3	2 110
	0.66	0.28	57.2	32.2	-25.0	2 000
	0.67	0.27	60.0	34.0	-26.0	2 000
	0.98	0.47	76.8	40.9	-35.9	1 000
	1.02	0.52	75.7	40.2	-35.4	580
	1.07	0.45	81.0	42.4	-38.6	340
	1.51	0.88	89.6	49.7	-39.9	352
200-750	0.41	0.12	34.6	20.9	-12.4	3 970
	0.60	0.30	41.3	25.6	-13.7	2 115
	0.53	0.26	—	—	—	670
	0.71	0.39	42.8	24.9	-11.4	170
	0.78	0.45	50.3	30.4	-17.9	1 650
	1.00	0.67	—	—	—	108
	1.06	0.74	52.8	30.3	-17.9	493
(b) In-phase						
T_1-T_2 (°C)	$\Delta\epsilon$ (%)	$\Delta\epsilon_p$ (%)	$\Delta\sigma$ (kg/mm ²)	$\sigma(T_1)$ (kg/mm ²)	$\sigma(T_2)$ (kg/mm ²)	N_f (cycle)
200-550	0.40	0.12	48.1	-32.7	15.4	7 500
	0.60	0.24	53.5	-35.0	18.5	2 100
	0.81	0.37	70.8	-46.9	23.9	1 026
	0.89	0.42	72.9	-47.4	27.5	400
200-750	0.20	0.05	—	—	—	1 780
	0.40	0.16	38.0	—	—	540
	0.50	0.29	36.5	-25.5	—	585
	0.71	0.44	39.3	-26.8	—	311
300-700	0.70	0.38	33.0	—	—	390

Table III. Isothermal fatigue test results of two steels.

(a) S15C					
T (°C)	ν (cpm)	$\Delta\epsilon$ (%)	$\Delta\epsilon_p$ (%)	$\Delta\sigma$ (kg/mm ²)	N_f (cycle)
R T.	30	0.5	0.22	47.4	27 600
	30	0.7	0.42	—	12 520
	30	1.0	0.65	64.2	5 500
	30	1.0	0.65	63.8	3 840
200	5	1.04	0.66	55.0	5 200
300	1	0.70	0.39	63.0	4 900
	1	1.0	0.63	70.0	2 030
400	1	0.71	0.50	43.6	4 100
	1	1.0	0.75	48.2	2 056
500	1	0.5	0.40	26.2	5 080
	1	0.7	0.57	—	2 034
	1	0.8	0.60	29.3	1 452
	1	1.0	0.84	—	1 066
	1	1.0	0.84	—	1 216
600	1	0.51	0.39	15.6	1 270
	1	1.00	0.86	17.7	750
(b) SUS 304					
T (°C)	ν (cpm)	$\Delta\epsilon$ (%)	$\Delta\epsilon_p$ (%)	$\Delta\sigma$ (kg/mm ²)	N_f (cycle)
R T.	10	1.01	0.66	60.6	3 360
	10	1.98	1.43	92.2	760
200	0.5	0.70	0.47	46.3	9 580
425	0.5	0.70	0.37	55.7	4 110
	0.5	0.98	0.58	63.3	2 340
550	0.5	0.53	0.25	43.5	2 350
	0.5	0.73	0.31	56.8	1 360
	0.5	1.04	0.67	62.8	440
700	1	0.70	0.47	—	1 350
750	0.5	0.40	0.26	—	1 500
	0.5	0.50	0.35	18.3	2 640
	0.5	1.0	0.81	22.1	510

T : Temperature, ν : Frequency,
 $\Delta\epsilon$: Total strain range, $\Delta\epsilon_p$: Plastic strain range
 $\Delta\sigma$: Stress range, N_f : Number of cycles to failure.

結果を $\log \Delta\epsilon$ - $\log N_f$ 関係としてプロットしたものが Fig. 3 (a)および(b)である。また、比較のために、熱疲労の平均温度に近い一定温度下で実施された高温低サイクル疲労試験の結果 (Table III に記載) を×印で、熱疲労の上限温度に等しい一定温度下で実施された高温低サイクル疲労試験の結果を+印で示す。

これらの図から、両鋼種ともに、熱疲労の平均温度に等しい温度下の高温低サイクル疲労に比べて熱疲労寿命はより短寿命であり、その短寿命傾向は in-phase 熱疲労の方が out-of-phase 熱疲労よりも顕著であることがわかる。

さらにこれらの関係をより明らかに把握するために、引張期間の材料の変形挙動が疲労損傷に密接に関係するのではないかと考え、熱疲労寿命 N_f と引張期間の温度 T_i との関係を以下のようにして調べた。ここで、out-of-phase 熱疲労では下限温度に近い温度で引張りの塑性ひずみを発生するので、下限温度 T_1 を引張期間の温度 T_i とみなし、同様の理由で in-phase 熱疲労では上限温度 T_2 を引張期間の温度とみなす。また Table I, II および III から明らかかな

Fig. 3(a). $\Delta\epsilon$ - N_f relationships in thermal fatigue (S15C).

Fig. 3(b). $\Delta\epsilon$ - N_f relationships in thermal fatigue (SUS 304).

うに、塑性ひずみ範囲の全ひずみ範囲に対する比は上限温度あるいは試験温度に依って約 0.3~0.8 の間で変化するので、塑性ひずみ範囲一定の条件下で、熱疲労寿命に及ぼす引張期間の温度の影響あるいは高温低サイクル疲労寿命に及ぼす試験温度の影響を検討する。

まず、塑性ひずみ範囲が 0.4% の場合の熱疲労寿命および高温低サイクル疲労寿命を求め Table IV に示す。この表中の寿命は、Table I, II および III に記された実験結果を $\log \Delta\epsilon_p$ - $\log N_f$ 関係としてプロッ

トし、最小二乗法によって引いた直線から $\Delta\epsilon_p=0.4\%$ における寿命を求めた値である。なお、 $\Delta\epsilon_p=0.4\%$ は、今回の実験結果を $\log \Delta\epsilon_p$ - $\log N_f$ 関係にプロットした場合の平均的な値であって、これに対応する全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon$ の値は約 0.5~0.8% である。さらに、熱疲労寿命と比較すべき高温低サイクル疲労寿命の温度依存性を調べるために、Table IV の高温低サイクル疲労寿命 N_f を試験温度 T に対してプロットしたものが Fig. 4 である。○印の実験点を結ぶ滑らかな曲線によって、任意の温度下の高温低サイクル疲労寿命を読みとることができる。

つぎに、Table IV に記された S15C 鋼の熱疲労の温度サイクル条件の中から平均温度が 350℃ のものを抽出して、それらの熱疲労寿命 N_f を引張期間の温度 T_i に対してプロットしたものが Fig. 5 である。さら

Fig. 4. Temperature dependence of isothermal fatigue lives of two steels.

Table IV. Thermal and isothermal fatigue lives determined by the average lines by least squares method in $\log \Delta\epsilon_p$ - $\log N_f$ plots ($\Delta\epsilon_p=0.4\%$).

(a) Thermal fatigue life (S15C, 1 cpm)										
T_1-T_2 (°C)	100-400	200-500	300-600	150-550	100-600	300-500	400-500			
Phase										
Out-of-phase	3 990	1 320	1 040	1 080	901					
In-phase	3 880	699	594			(850)	(1 110)			
(b) Thermal fatigue life (SUS 304, 0.5 cpm)										
T_1-T_2 (°C)	200-550		300-700		200-750					
Phase										
Out-of-phase	937				512					
In-phase	600		(358)		360					
(c) Isothermal fatigue lives (S15C, 1 cpm & SUS 304, 0.5 cpm)										
T (°C)	R. T.	200	300	400	425	500	550	600	700	750
Material										
S15C	11 100*	(12 000)**	4 680	6 000		4 710		1 260		
SUS 304	8 850***	(12 500)			3 720		987		(1 770)	1 370

Values in bracket: Determined by the extrapolated line of which slope is -0.6 in $\log \Delta\epsilon_p$ - $\log N_f$ plots.

*: 30 cpm, **: 5 cpm, ***: 10 cpm.

Fig. 5. Relation between thermal fatigue life and the temperature in tension going period (S15C).

に比較のために Fig. 4 で得られた 高温低 サイクル 疲労寿命 N_f と試験温度 T との関係を図中に右下りの細線で示している。

図中の P 点 ($T_t = 200^\circ\text{C}$, $T_c = 500^\circ\text{C}$, ただし T_t および T_c はそれぞれ引張期間の温度および圧縮期間の温度) を A 点 ($T_t = T_c = 200^\circ\text{C}$) と比較し, Q 点 ($T_t = 500^\circ\text{C}$, $T_c = 200^\circ\text{C}$) を B 点 ($T_t = T_c = 500^\circ\text{C}$) と比較すると熱疲労寿命は熱疲労の引張期間の温度に等しい一定温度下の高温低サイクル疲労に比べて短寿命であることがわかる。また, P 点および Q 点を C 点 ($T_t = T_c = 350^\circ\text{C}$) と比較すると, 熱疲労寿命は熱疲労の平均温度に等しい一定温度下の高温低サイクル疲労に比べて短寿命であることがわかる。また, SUS 304 鋼についても同様の結果が得られるが図は省略する。

4 疲労損傷に関する考察

熱疲労寿命は塑性ひずみ範囲と平均温度, あるいは塑性ひずみ範囲と引張期間の温度 T_t のみでは決らず, 圧縮期間の温度 T_c に影響されることが Fig. 5 で示された。また T_t と T_c の差の増加に伴って熱疲労寿命が減少することも明らかとなった。本章では, このような熱疲労寿命と温度サイクル条件との複雑な相互関係を疲労寿命の逆数で定義される 1 サイクルあたりの損傷に着目して解析する。

鋸歯状ひずみ波形下の高温低サイクル疲労における損傷を解析する際に前報で用いた仮定, すなわち「引張り・圧縮の低サイクル疲労における 1 サイクルあたりの損傷は引張期間の損傷と圧縮期間の損傷が独立に加算されたものであり, かつ, 各期間の損傷はひずみ速度の大きさと温度に依存する」に従うと, 熱疲労における 1 サイクルあたりの損傷は引張期間の温度 (3 章で述べたように out-of-phase 熱疲労では下限温度 T_1 , in-phase 熱疲労では上限温度 T_2) に等しい一定

温度下の高温低サイクル疲労における 1 サイクルあたりの損傷 $\Delta\phi'$ の半分 (これを引張期間の相当損傷と称する) と圧縮期間の温度 (out-of-phase 熱疲労では T_2 , in-phase 熱疲労では T_1) に等しい一定温度下の高温低サイクル疲労における 1 サイクルあたりの損傷 $\Delta\phi''$ の半分 (これを圧縮期間の相当損傷と称する) の和 $\Delta\phi'/2 + \Delta\phi''/2$ に等しい。

Fig. 6 は実際の損傷と上記の仮定に基づく損傷 (これを以後基本的損傷と称する) との差異を検討するために, Fig. 5 に示した熱疲労寿命 N_f と引張期間の温度 T_t の関係を 1 サイクルあたりの損傷 $\Delta\phi (= 1/N_f)$ と T_t の関係に書き直したものである。P, A, Q, B および C はそれぞれ Fig. 5 の各点に対応する。温度サイクルが $200 \sim 500^\circ\text{C}$, 位相が out-of-phase の場合の 1 サイクルあたりの損傷を示す P 点に対応して, 仮定に基づいて推定した基本的損傷の大きさは P' 点で示され, 同様に in-phase の場合の Q 点に対しては Q' 点で示される。P 点および Q 点以外の温度サイクル条件の場合についても, 同様の方法で基本的損傷を計算して図中の破線で示す。

Fig. 6. Fatigue damage per cycle and its components in thermal fatigue (S15C).

同図からわかるように, 熱疲労における実際の損傷 $\Delta\phi$ (○, ◎, ◎', ◎印) は仮定に基づく基本的損傷 $\Delta\phi'/2 + \Delta\phi''/2$ よりも大きく, その差

$$\delta\Delta\phi = \Delta\phi - \left(\frac{\Delta\phi'}{2} + \frac{\Delta\phi''}{2} \right) \geq 0 \quad (1)$$

は引張期間と圧縮期間の温度差の大きい場合に大きい。すなわち, 熱疲労においては基本的損傷以外に 1 サイクル中の温度変動によってもたらされた損傷が付加されていることがわかる。そこで, 鋸歯状ひずみ波形の場合と同様に, この損傷差 $\delta\Delta\phi$ を付加的損傷と称する。

Fig. 7. Relation between additional damage and the difference in equivalent damage between tension going and compression going periods.

さらに付加的損傷と疲労寿命の温度依存性（材料特性）との関係を検討するために、付加的損傷 $\delta\Delta\phi$ を引張期間の相当損傷と圧縮期間の相当損傷との差 $\Delta\phi'/2 - \Delta\phi''/2$ に対してプロットしたものが Fig. 7 である。同図によると、out-of-phase および in-phase のおのおの場合について付加的損傷を示す点は材料によらずほぼ原点を通る直線上に位置する傾向が見出される。すなわち、鋸歯状ひずみ波形下の高温低サイクル疲労におけると同様に、熱疲労においても、

$$\delta\Delta\phi = \eta \left(\frac{\Delta\phi'}{2} - \frac{\Delta\phi''}{2} \right) \quad (2)$$

の関係式が成立する。係数 η は最小二乗法によって求められる直線のこう配であり、その値は in-phase 熱疲労の場合に 7.9, out-of-phase 熱疲労の場合に -4.2 である。ちなみに、前報で得られた η の値は、低速-高速鋸歯状波形の場合には 3.4~7.2, 高速-低速鋸歯状波形の場合には -1.8~-2.4 であった。

以上の解析によって付加的損傷の発生は 1 サイクル中にひずみ速度あるいは温度が変動する場合の疲労、すなわち低速-高速鋸歯状波形下の疲労、高速-低速鋸歯状波形下の疲労、in-phase 熱疲労 および out-of-phase 熱疲労に共通の現象であることがわかった。さらに以下のことが明らかとなった。これら 4 形式の疲労のうち、低速-高速鋸歯状波形下の高温低サイクル疲労および in-phase 熱疲労はともに引張期間の相当損傷 $\Delta\phi'/2$ が圧縮期間の相当損傷 $\Delta\phi''/2$ よりも大

きい場合であり、高速-低速鋸歯状波形下の高温低サイクル疲労および out-of-phase 熱疲労はともに $\Delta\phi'/2$ が $\Delta\phi''/2$ よりも小さい場合である。かつ、前二者の疲労においては付加的損傷 $\delta\Delta\phi$ と相当損傷の差 $(\Delta\phi'/2 - \Delta\phi''/2)$ の間の比例定数 η は約 3~8 であって比較的大きいが、後二者の疲労における η は約 -2~-4 であって小さい。このように、低速-高速鋸歯状波形下の高温低サイクル疲労と in-phase 熱疲労、高速-低速鋸歯状波形下の高温低サイクル疲労と out-of-phase 熱疲労はそれぞれ類似の疲労破損特性を有し、それぞれに共通の損傷発生機構のあることを示唆するようである。これらの点については次報で検討する。

5 結 言

低サイクル疲労破損過程に及ぼす 1 サイクル中の温度変動の影響を明らかにするために種々の温度サイクル条件および位相条件下の熱疲労特性を調べ、高温低サイクル疲労特性と比較することによって付加的損傷を解析した。本研究の結果と鋸歯状ひずみ波形下の高温低サイクル疲労に関する前報の結果から、以下の結論が得られた。

(1) 熱疲労寿命は平均温度における同一ひずみ範囲の高温低サイクル疲労寿命よりも短く、その傾向は引張期間の温度 T_t と圧縮期間の温度 T_c との差の大きいほど助長される。ただし out-of-phase 熱疲労において $T_t = T_1$ (T_1 : 下限温度), in-phase 熱疲労において $T_t = T_2$ (T_2 : 上限温度) とみなす。

(2) 疲労寿命の逆数で定義される 1 サイクルあたりの損傷に着目すると、熱疲労における損傷 $\Delta\phi$ と引張期間の温度に等しい一定温度下の高温低サイクル疲労における損傷 $\Delta\phi'$ および圧縮期間の温度に等しい一定温度下の高温低サイクル疲労における損傷 $\Delta\phi''$ との間に次式の関係が成立する。

$$\delta\Delta\phi = \Delta\phi - \left(\frac{\Delta\phi'}{2} + \frac{\Delta\phi''}{2} \right) \geq 0$$

すなわち、 $\Delta\phi'/2 + \Delta\phi''/2$ を基本的損傷とみなせば、 $\delta\Delta\phi$ は 1 サイクル中の温度変動に起因する付加的損傷である。

(3) $\Delta\phi'$ と $\Delta\phi''$ との差の大きい温度サイクル条件下で付加的損傷 $\delta\Delta\phi$ の発生は著しく、次式の関係が成立する。

$$\delta\Delta\phi = \eta \left(\frac{\Delta\phi'}{2} - \frac{\Delta\phi''}{2} \right)$$

ここで η は in-phase 熱疲労の場合に約 7.9, out-of-phase 熱疲労の場合に約 -4.2 の値をとり、温度サイクル条件および材料に依存しないようである。

(4) 鋸歯状ひずみ波形下の高温低サイクル疲労における損傷と三角ひずみ波形下の高温低サイクル疲労における損傷との関係は、上記文中の温度をひずみ速度

に変更することによって同様に表示されることが前報²⁾で示された。かつ, in-phase 熱疲労および低速-高速鋸歯状ひずみ波形下の高温低サイクル疲労における η は 3 ~ 8 で比較的大きく, 一方, out-of-phase 熱疲労および高速-低速鋸歯状ひずみ波形下の高温低サイクル疲労における η は -4 ~ -2 であって小さい。前二者の疲労および後二者の疲労にそれぞれ共通の損傷発生機構のあることが示唆されるので, 次報ではこれらの疲労における粒界すべりと粒界き裂発生挙動の類似点あるいは相異点について述べる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり, 終始有益な助言を賜りました京都大学工学部大谷隆一助教授に謝意を表します。
(昭和52年5月24日 日本材料学会第26期総会学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 木下 勝, 山内英和, 宍岐哲夫, 肥爪彰夫, 材料試験, **12**, 191 (1962).
- 2) 平 修二, 藤野宗昭, 高橋 務, 材料, **27**, 434 (1978).
- 3) Coffin, L.F. Jr., Proc. 2nd Intern. Conf. on Fracture, p. 643 (1969).
- 4) Berling, J. T., and J. E. Conway, Draft of First Intern. Conf. on Pressure Vessel Technology (1969).
- 5) White, D. J., The Inst. of Mechanical Engineer, 184, Part I, 223 (1969).
- 6) Manson, S. S., ASTM STP, **520**, 744 (1973).
- 7) Paterson, A. J. F., and E. G. Ellison, Proc. Instn. Mech. Engrs., **190**, 12 (1976).
- 8) 日本鉄鋼協会ジェットエンジン用耐熱合金研究委員会, “ジェットエンジン用耐熱合金の製造に関する応用研究”, (1974).
- 9) 日本材料学会高温強度部門委員会, 耐熱合金の高温熱疲労に関する共同研究報告書, (1977).
- 10) Sheffler, K. D., NASA-CR-134524 (1974).
- 11) 桑原和夫, 新田明人, 第14回高温強度シンポジウム前刷集, p. 33 (1976).
- 12) 平 修二, 藤野宗昭, 土師 隆, 材料, **22**, 235 (1973).
- 13) 平 修二, 藤野宗昭, 檜垣 博, 材料, **25**, 375 (1976).
- 14) 高温強度部門委員会熱疲労共通試験小委員会, 材料, **24**, 254 (1975).
- 15) 平 修二, 藤野宗昭, 土師 隆, 材料, **22**, 110 (1973).