炭素鋼の低速振り疲労変形に及ぼす温度の影響*

桜井 忠一** 山田 巖** 柿内 正昭**

Effect of elevated Temperature on the Fatigue Deformation of Carbon Steel Caused by Slow Cyclic Torsional Stress

by

Tadakazu SAKURAI, Iwao YAMADA and Masaaki KAKIUCHI

(Himeji Technical College)

Machine parts often are subjected to repeated stresses at elevated temperatures and the fatigue deformation of the machine parts caused by repeated stresses may have undesirable effect upon the faculty and the accuracy of these machine parts.

In this paper, the effect of elevated temperatures (100°C, 250°C, 350°C) upon the fatigue deformations of cold worked and torsional stress-aged 0.37% C steels caused by slow cyclic torsional stress was investigated.

The results obtained are as follows:

(1) In cold worked specimen, the more temperature was elevated, the more fatigue yield strength increased, at the range of temperature from room temperature to 250°C, but at 350°C it decreased.

(2) In torsional stress-aged specimen, the more temperature was elevated, the more fatigue yield strength decreased, at the range of temperature up to 250°C in $\tau_a/\tau_m \leq 1$, but increased in $\tau_a/\tau_m > 1$. And at 350°C it decreased in the all values of τ_a/τ_m .

(3) It seems that the above behavior of the fatigue yield strength is related to a structural change caused by elevated temperatures and repeated stresses, and especially the remarkable change of the fatigue strength in $\tau_a/\tau_m > 1$ is related to the diminution of the Bauschinger effect caused by these factors.

(4) Torsional stress-aged steel is more useful in preventing the fatigue deformation than cold-worked one at the range of elevated temperature up to 350°C. (Received Dec. 15, 1958)

1. 緒 言

筆者らは 0.37% C-鋼の焼鈍材, 常温加工材, 振り応力時効処理材について, 常温の繰返し振り試験を行い, 振り応力時効処理が疲労変形の防止に有効であることを認め, その結果についてはすでに報告した¹⁾。

しかし機械部品の中には, ある程度の温度ふんい気中で繰返し応力を受け, しかもこの繰返し応力によって生ずる疲労変形がそれらの機能や精度に影響を及ぼす場合がしばしば見受けられるが, これらに関する研究はほとんど見当たらない。

ふんい気温度がある程度上昇した場合, 常温加工材では熱と繰返し応力とによって, 更に時効が促進され, 疲労変形の発生が抑制されるであろうと考えられる。これに反して振り応力時効処理材では一応時効が完了しているので, その後の加熱による Over aging など

のため, むしろ疲労変形が助長されるであろうと考えられる。したがって, 常温における応力繰返しの場合に得られたような結果が, ふんい気温度の上昇した状態にも, はたして適用しうるかどうかが疑問であるので, 前回同様 0.37% C-鋼の常温振り加工材, ならびに振り応力時効処理材について, 低速振り疲労変形に及ぼす温度の影響について調べた。

2. 試料および実験方法

実験に用いた材料, 試験片の形状および寸法は前回の実験の場合と同一である。繰返し振り試験に用いた試験片は 2 種類で, その一つは焼鈍後常温振り加工を施したもの (加工度は塑性せん断ひずみ $r_p = 0.1472^*$), 他の一つは振り応力時効処理 (加工度は常温振り加工したものと同一) したものである。試験温度は 100°C, 250°C および 350°C の 3 種類で, 応力繰返し速度は 5 回分で手動によった。繰返し振り試験の際の加熱およ

* 原稿受付 昭和33年12月15日, 当協会の他 2 学会の関西支部で講演

** 正員 姫路工業大学

* 焼鈍試験片の振り破断ひずみの 14 % に当る。

び試験片の固定には応力時効処理の際の装置をそのまま使用した。まず無負荷状態で加熱して所要の温度に達した後10分経過してから繰返し振り試験を始めた。この場合の加熱温度は電位差計式自動温度調節計によって100°Cでは±1°C, 250°Cおよび350°Cでは±2°Cの範囲に長時間一定に保つことができた。

疲労変形量は、常温での静振り試験からあらかじめ求めておいた試験機つかみ部分間の相対捩れ角と試験片平行部のせん断ひずみとの関係線図が本実験の温度範囲でもほとんど適用しうものと考え、それぞれの加熱温度のもとでの各繰返し数に対応したつかみ部分間の塑性的相対捩れ角を測定し、同線図を利用して試験片平行部の塑性残留ひずみを求めた。

なお、応力は振りモーメントから弾性式によって求めた公称応力を用いたが、これは本実験の一つの目標である1000回の応力繰返し後の塑性変形を0.2%与える程度の振りモーメントの大きさでは弾性式から求めたものと、Prandtlの塑性式から求めた応力との相違が、前加工と同方向の振りモーメントの場合にはほとんどなく、Bauschinger効果の影響の大きな前加工と逆方向の振りモーメントの場合でも、その差はわずか0.5 kg/mm²程度であることがわかったからである。

試験片の固定にキーを用いているので、キーと固定具の間に少しのガタがあっても疲労変形の測定誤差となりやすいので、工作およびはめ合いに充分注意しておこなった。

なお、 τ_a/τ_m の値としては100°Cおよび250°Cの場合には0(応力振幅 $\tau_a=0$)・0.4, 1, 3, ∞ (平均応力 $\tau_m=0$)の5種、350°Cの場合には、0, 1, ∞ の3種を選んで行った。また、疲労変形量は前処理の際の加工と同方向に現われるものを(+), 逆方向に現われるものを(-)として区別して取扱った。

3. 実験結果およびその考察

(a) 常温振り加工材の疲労変形

常温振り加工材が100°C, 250°C, 350°C, の温度ふんい気のもとで、1000回までの繰返し振り応力を受けた場合の疲労変形の現われ方は、常温で行った前回の結果とまったく同様であった。

Fig. 1は1例として、常温振り加工材に250°Cの温度ふんい気中で繰返し振り応力を加えた場合の繰返し数と疲労変形との関係を示したものである。同図から明かなように $\tau_a/\tau_m \leq 1$ の範囲では、疲労変形が常温加工と同方向(+)に進行するが、 τ_a/τ_m

=3の場合には、繰返し応力の大きさによって、疲労変形の起る方向が異なる。すなわち、繰返し振りの最大応力は前加工と同方向の振り比例限より小さいが最小応力が前加工と逆方向の比例限を超える場合には、加工と逆方向の疲労変形(-)を生じ、繰返しの最大および最小応力がそれぞれ前加工と同方向、および逆方向の比例限を超える場合には前加工と同方向の疲労変形(+)を生ずるようである。

$\tau_a/\tau_m = \infty$ の場合には、疲労変形は最小応力のみの影響を受け、そのために(-)の疲労変形を生ずる。

Fig. 1から明かなように疲労変形速度は繰返しの初期にやや大きいが、繰返し数の増加とともに減少し、ついに疲労変形の進行が停止するような傾向を示す。

この傾向は100°C, 350°Cの場合も同様であった。上述の結果を繰返し最大せん断応力-疲労変形線図にあらわしてみると、Fig. 2およびFig. 3のようである。Fig. 2は100°Cの場合、Fig. 3は250°Cの場合を示す。Fig. 2とFig. 3を比較して気がつくことは、100°Cの場合には、 $\tau_a/\tau_m \leq 1$ の範囲で τ_a/τ_m の値によって、それぞれ別個の線図が得られるにかかわらず、250°Cの場合にはほとんど一本の曲線に一致していることと、全般に250°Cの場合のほうが100°Cの場合

Fig. 1 Relation between permanent shear strain and number of stress cycles for cold worked specimen (250°C)

Fig. 2 Relation between maximum shear stress and permanent shear strain in fatigue test at 100°C (cold worked specimen)

より疲労変形が少く、ことにこの傾向は $\tau_a/\tau_m > 1$ の範囲でいちじるしい点である。

350°C の場合の最大せん断応力-疲労変形線図は省略するが、線図の傾向は 250°C の場合とまったく同様であった。しかし全般的に 250°C の場合より疲労変形が大きくなった。

(b) 応力時効処理材の疲労変形

350°C, 3 分の振り応力時効処理を行った材料の疲労変形の進行する様子は、Fig. 1 の常温加工材の場合と同様、繰返し数の進むにつれて一定になるという傾向を示した。これは応力時効処理材の常温における疲労変形が繰返し数とともにますます増加したのと比較してかなり相違している。

本実験の温度範囲では α 鉄中の C や N などの溶質原子の拡散速度が大きくなって、繰返し応力のもとで新生じた転位自身の移動速度に近づくために、転位の移動(疲労変形)が抑制されるためであろうと考えられる。

以上の結果を繰返し最大せん断応力-疲労変形線図に表わしてみると Fig. 4 および Fig. 5 のようで、Fig. 4 は 100°C の場合、Fig. 5 は 250°C の場合を示

Fig. 3 Relation between maximum shear stress and permanent shear strain in fatigue test at 250°C (cold worked specimen)

す。この場合にも、 $\tau_a/\tau_m \leq 1$ の範囲では 100°C の場合には τ_a/τ_m の値に応じて別個の曲線で表わされるに対し、250°C の場合には、データーのばらつきを考慮すると、一本の曲線で表わされる点は常温加工材の場合とまったく同様である。 $\tau_a/\tau_m \leq 1$ の範囲で、250°C の場合は 100°C の場合より、やや疲労変形が増す傾向を示すのにもかかわらず、 $\tau_a/\tau_m > 1$ の範囲ではむしろ 100°C の場合より疲労変形が減少する傾向を示していることはきわめて興味深い。

350°C の場合の最大せん断応力-疲労変形線図は省略するが、この場合には 250°C の場合より、全般的に疲労変形が増加した。

次に、常温振り加工材および振り応力時効処理材の疲労降伏強さ(1000 回の繰返し数における疲労変形量 $\gamma_{fp} = 0.2\%$ に対応する応力)が平均応力および応力振幅によってどのように変化するかを耐久限度線図で示してみると Fig. 6 のようになる。ただし、同図中に前回行った常温での疲労変形試験から得られた結果も併記して比較に便ならしめた。

Fig. 4 Relation between maximum shear stress and permanent shear strain in fatigue test at 100°C (stress aged specimen)

Fig. 6 から明かなように、常温振り加工材では、 τ_a/τ_m の値のいかんにかかわらず常温から 100°C および 250°C までふい気温度が上昇するにつれて疲労降伏強さが上昇し、 $\tau_a/\tau_m > 1$ の範囲で特にこの傾向がいちじるしい。しかし 350°C になると疲労降伏強さがかなり低下することがわかる。

また、振り応力時効処理材の疲労降伏強さは、ほぼ $\tau_a/\tau_m \leq 1$ の範囲内では、ふい気温度が上昇するにつれて低下するが、 $\tau_a/\tau_m > 1$ の範囲では、かえって疲労降伏強さが上昇することを示した。しかし、ふい気温度がさらに上昇して、350°C に達すると τ_a/τ_m の値のいかんにかかわらず疲労降伏強さが全般的に低下することは常温振り加工材の場合と同様である。

常温振り加工材および振り応力時効処理材とも、ふい気温度が 250°C 以上になると、 $\tau_a/\tau_m \leq 1$ の範囲で、疲労降伏強さを表す曲線はほとんど 45° の直線となり、また 250°C の場合のみ両振りの疲労降伏強さが焼鈍材のそれより高い値を示している。

Fig. 5 Relation between maximum shear stress and permanent shear strain in fatigue test at 250°C (stress aged specimen)

疲労変形に及ぼす温度の影響を明らかにするために、縦軸に疲労降伏強さを、横軸に加熱ふい気温度をとって示すと Fig. 7 のようになり、上述の傾向がさらに明瞭になる。

本実験の場合には、試験片は予熱に 10 分、1000 回の繰返し中に 3 時間 20 分、合計約 3 時間半の間、一定温度に加熱されているので、以上のような温度ふい気による疲労降伏強さの変化は、いずれも温度と繰返し応力による材質的な変化によるものと考えられる。

すなわち、常温振り加工材では、温度および繰返し応力による時効の促進と Bauschinger 効果の変化が、また振り応力時効処理材では、温度および繰返し応力による Over aging と Bauschinger 効果の変化が相互に関係しているものと考えられる。

繰返し応力またはひずみを加えた場合の金属の組織や機械的性質の変化に関する研究は、比較的最近よく行われているが、Cu-Al またはその合金の場合が多く、鋼に関するこの種の研究は特に少いようである。

- τ_{yc} : yield strength in pre-straining direction of cold worked specimen at room temp.
 τ_{ya} : yield strength in pre-straining direction of stress aged specimen at room temp.
 τ_{ya}' : yield strength in reverse direction as pre-straining of stress aged specimen at room temp.

Fig. 6 Diagram of fatigue deformation

Fig. 7 Effect of elevated temperature on the fatigue yield strength

したがって、温度および繰返し応力によって、上に推定したような変化が起るかどうかを簡単に断定することはできないが、1000回の応力繰返しによって、常温振り加工材および振り応力時効処理材の硬度がどのように変化するかを示すと、それぞれ Table 1 およ

Table 1 Hardness change caused by cyclic stress at elevated temperature (initially cold worked specimen)

τ_a/τ_m	Repeated maximum shear stress	Increased ratio of hardness $\frac{H_2-H_1}{H_0}$ (%)		
		100°C	250°C	350°C
0	$0.95\tau_{wc}$	+2.0	+4.6	+3.3
1	$0.95\tau_{wc}$	+3.6	+5.5	+4.8
∞	$0.4\tau_{wc}$	+4.1	+4.2	+3.8

τ_{wc} : Cold working stress of pre-straining

H_0 : Hardness of annealed specimen

H_1 : Hardness of cold worked specimen

H_2 : Hardness after fatigue test at each elevated temperature.

Table 2 Hardness change caused by cyclic stress at elevated temperature (initially stress aged specimen)

τ_a/τ_m	Repeated maximum shear stress	Increased ratio of hardness $\frac{H_2'-H_1'}{H_0}$ (%)		
		100°C	250°C	350°C
0	$0.95\tau_{wa}$	-1.3%	-3.4	-2.1
1	$0.95\tau_{wa}$	-1.7	-3.4	-3.8
∞	$0.4\tau_{wa}$	-0.2	-0.9	-1.1

τ_{wa} : Working stress of stress aging

H_0 : Hardness of annealed specimen

H_1' : Hardness of stress aged specimen

H_2' : Hardness after fatigue test at each elevated temperature.

び Table 2 のようである。

いずれも $r_{sp}=0.2\%$ 程度以下のものについて、応力繰返し前後の Rockwell 硬度を測定した結果から得られたものである。これらの Table から明かなように、疲労変形量をほぼ揃えて比較しようとしたために、 $\tau_a/\tau_m=\infty$ の場合のみ繰返し応力が低く、かつ常温振り加工材と振り応力時効処理材とは繰返し応力の値は異なっている。また、両処理材の硬度にも差があるので一律に比較することは困難である。しかし、常温振り加工材の 1000 回の応力繰返し後の硬度は、繰返しの際のふいひ気温度が 100°C から 250°C へ上昇するにつれて増加するが、350°C ではやや軟化していることがわかる。また、振り応力時効処理材では温度の上昇とともに軟化するが、両振り応力の繰返しの場合の軟化程度はやや小さいことがわかる。

以上の結果から、温度と繰返し応力とによって繰返し試験中に、なんらかの材質的な変化が起っていることが推定される。すなわち、常温加工材では温度 (250°C まで) と繰返し応力とによって、時効が促進されて硬化し、比例限および降伏強さが上昇する。また、振り応力時効処理材では Over aging または回復によ

Table 3 Change of proportional limit and yield strength in reverse direction as pre-straining caused by various treatments

Cold worked		
Treatment	Proportional limit τ_{pe}' (kg/mm ²)	Yield strength τ_{ye}' (kg/mm ²)
as cold worked	0	7.5
1 000 stress cycles at room temp.	15.5	21.8
1 000 stress cycles at 100°C	18.5	22.5
1 000 stress cycles at 250°C	22.7	26.5
1 000 stress cycles at 350°C	21.5	25.1

Stress aged		
Treatment	Proportional limit τ_{pa}' (kg/mm ²)	Yield strength τ_{ya}' (kg/mm ²)
as stress aged	17	26.5
1 000 stress cycles at room temp.	20.7	27.0
1 000 stress cycles at 100°C	23.0	27.0
1 000 stress cycles at 250°C	24.0	27.5
1 000 stress cycles at 350°C	21.8	25.5

τ_{pe}' , τ_{pa}' : proportional limit in reverse direction as pre-straining

τ_{ye}' , τ_{ya}' : yield strength in reverse direction as pre-straining

て軟化し, 比例限および降伏強さが低下してくる. そのため Fig. 6 の $\tau_a/\tau_m \leq 1$ の範囲の線図で示されるような疲労降伏強さの上昇(常温加工材), あるいは低下(応力時効材)を起すものと了解することができる.

しかし, 硬度は機械的性質の異方性を表わすことができないから, Fig. 6 の $\tau_a/\tau_m > 1$ の範囲の線図で示されるような, 疲労降伏強さの上昇を生ずるためには, 常温振り加工材および振り応力時効処理材共, 250°C までのふんい気温度と繰返し応力とによって, 前加工と逆方向の比例限や, 降伏強さが増加しなければならぬ.

各温度ふんい気で比例限や, 降伏強さを測定することは困難であるので, 各温度で 1 000 回の両振り振り繰返し応力を加えた, 常温振り加工材および振り応力時効処理材 (1 000 回繰返し後の疲労変形量 $r_{fp} = 0.2\%$ 以下のもの) について, 前加工と逆方向の常温静振り試験を行い, 振れ角を鏡と望遠鏡を使用して求め, 比例限および降伏強さを求めた結果を示すと Table 3

のようである.

これから常温振り加工材および振り応力時効処理材ともに, 温度および繰返し応力によって前加工と逆方向の比例限および降伏強さが上昇し, 350°C になって初めて低下することがわかる. したがって, 疲労降伏強さが温度によって, Fig. 6 や Fig. 7 に示すように変化することは, 温度と繰返し応力とによって, 繰返し試験中に起る材質的な変化と密接な関係があることが明かとなった.

4. 結果の総括

常温の場合に引続いて 100°C, 250°C および 350°C の温度ふんい気において 0.37% C-鋼の低速振り疲労変形がどのように変わるかを調べた.

その結果は次のように総括することができる.

(1) 常温振り加工材では常温から 250°C までは温度が上昇するにつれて, 疲労降伏強さが増加し, 350°C に達すると低下する.

(2) 振り応力時効処理材では, $\tau_a/\tau_m \leq 1$ の範囲では温度の上昇するにつれて, 疲労降伏強さが低下するが, $\tau_a/\tau_m > 1$ の範囲では, 250°C まで温度が上昇するにつれて, 疲労降伏強さが増加し, 350°C に達すると低下する.

(3) 以上のような疲労降伏強さの変化は, 温度と応力とによって, 繰返し試験中に起る材質的な変化と関係があり, ことに $\tau_a/\tau_m > 1$ の範囲での変化は温度と繰返し応力による Bauschinger 効果の減少と密接な関係があると考えられる.

(4) 本実験で行った程度の温度ふんい気のもとでは, 常温加工材に比較して, 振り応力時効処理材の方が疲労変形の防止に有効である.

終りに臨み種々御指導, 御批判を賜った大阪大学工学部篠田軍治教授に深甚なる謝意を表し, 実験に熱心に協力された, 表宗三, 岡田広次, 武内鏡の三君に感謝する.

参 考 文 献

- 1) 桜井, 山田, 柿内, 材料試験, 7, 618 (昭33)
- 2) F.P. Bullen, A.K. Head and W.A. Wood, Proc. Roy. Soc. A, 216, 332 (1953)
- 3) Polakowski and A. Palchoudhuri, Proc. A.S.T.M., 54, 701 (1954)
- 4) T. Broom, J.H. Molineux and V.N. Whittaker, J. Inst. Metals, 84, 357 (1955)
- 5) T. Broom and R.K. Ham, Proc. Roy. Soc. A., 242, 166 (1957)
- 6) W.A. Wood and R.L. Segall, Proc. Roy. Soc. A., 242, 180 (1957)