純鉄薄膜における疲労すべり線発生現象の温度依存性[†]

長瀬 康 男* 北岡 征一郎**

Temperature-Dependence of the Slip-Initiation Phenomenon
in Iron-Foil under Fatigue

by

Yasuo NAGASE* and Seiichirō KITAOKA**

It has been ascertained that the slip-initiation in iron-foil under fatigue is almost dominated by the linear cumulative damage rule $\sum n_i/N_i=1$ irrespective of temperature rise or fall when the ambient temperature varies stepwise. In this paper, in order to establish the rule dominating the slip-initiation under the condition of continuous temperature change, the validity of an integral form of the rule, $\int (1/N)dn=1$, was examined by the tests in which the temperature was varied linearly in the low temperature range. The following conclusions were drawn from the results obtained. The linear cumulative damage rule $\int (1/N)dn=1$ almost holds for the slip-initiation under the condition that the temperature varies linearly at low temperatures irrespective of temperature rise or fall. Therefore, it is considered that the rule is applicable to the slip-initiation under any temperature variation in such a temperature range that strain aging does not occur in iron-foil.

キー・ワード：疲労，すべり線，純鉄薄膜，線形被害則，温度変動

1 緒 言

純鉄薄膜による応力測定法は、電着めっきはくはに再結晶化の熱処理を施して作製した鉄の薄膜を、繰返し荷重を受ける試料に接着し、薄膜の疲労過程で発生する初期すべり線を観察して試料表面に作用する弾性応力を求める方法である。すなわち、純鉄薄膜の品質を一定にすれば、この初期疲労すべり線の発生が繰返し応力の大きさと繰返し数によって一義的に決定される点に着目し、これをひずみゲージとして利用するものであり、初期すべり線が発生する応力振幅と繰返し数の関係 (σ_f-N 曲線, τ_f-N 曲線) を測定 of 較正曲線として用いる。

この方法を種々の条件下で稼動する実機の応力測定に適用するには、初期すべり線発生に及ぼす雰囲気温度や繰返し速度などの影響をあらかじめ詳しく調査しておく必要があり、著者はすでに $-90 \sim 430^\circ\text{C}$ の温度範囲および $100 \sim 5500$ cpm の速度範囲においてこれらの点を明らかにした^{1)~3)}。さらに、測定期間中にこれらの要素が変動する場合に対する本方法の適応性を検討するため、まずその第一段階として、これらが段階的に変動する単純な場合を取り上げ、初期すべり線の発生に及ぼす影響を調査した。その結果、薄膜にひずみ時効が起らない温度領域では、段階的な温度変動および速度変動下のすべり線発生は線形被害則にほぼ支

配されることを明らかにした³⁾。しかしながら、一般に温度などの変動は上述のように単純ではなく、連続的かつ複雑に起るから、この場合のすべり線発生を支配する法則を明らかにし、一定温度下の較正值に基づいて変動温度下の較正值の推定を可能にすることが必要である。

以上の観点から、本研究では一定繰返し応力のもとで、温度が任意に連続的に変動する場合の純鉄薄膜のすべり線発生を支配する法則を明らかにすることを目的とした。すなわち、この場合のすべり線発生に線形被害則を拡張した一般式を提案し、この式の妥当性を実験的に検証した。この際、すべり線発生の限界応力の温度依存性が顕著に現れる温度領域を選ぶことが実証をより容易にすることは明白である。しかるに、従来の研究によれば、雰囲気温度が低下するにつれてこの温度依存性は著しくなるので、本実験では低温下において検討を加えることとしたが、これにより提案式の一般性が失われるものではない。

2 線形被害則の一般化

一定繰返し応力のもとで温度が段階的に変動する場合には、純鉄薄膜の初期すべり線発生が線形被害則

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (1)$$

ここで、 N_i = 温度 T_i におけるすべり線発生の限界

† 原稿受理 昭和59年5月8日 Received May 8, 1984

* 正会員 静岡大学工学部 浜松市城北, Faculty of Engineering, Shizuoka University, Johoku, Hamamatsu

** 正会員 名古屋大学工学部 名古屋市中千種区不老町, Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya

Fig. 1. Variation of temperature.

繰返し数

 n_i = 変動温度下において温度 T_i で受ける

繰返し数

に支配されることをすでに明らかにした。³⁾

温度が Fig. 1 に示すように連続的に変化する場合
には、式(1)は積分形

$$\int_0^{N^*} \frac{dn}{N} = 1 \quad (2)$$

ここで、 N^* = 温度変動下におけるすべり線発生
の限界繰返し数

N = 一定温度 T におけるすべり線発生
の限界繰返し数

に変形できるものと考えられる。いま温度変化を

$$T = f(n) \quad \text{または} \quad n = f^{-1}(T) \quad (3)$$

ここで、 T = 温度

n = 繰返し数

また、すべり線発生限界応力 σ_p を限界繰返し数 N
と T の関数として

$$\sigma_p = g(N, T) \quad (4)$$

で表す。一定繰返し応力下の温度変動を考えている
から、 $\sigma = \sigma_p$ = 一定とおき式(4)を N について解くと

$$N = h(T) \quad (5)$$

とおくことができる。したがって、式(2)は式(3)、(5)よ
り

$$\int_0^{N^*} \frac{dn}{N} = \int_0^{N^*} \frac{dn}{h(f(n))} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{h(T)} \frac{df^{-1}(T)}{dT} dT = 1 \quad (6)$$

ここで、 $T_1 = f(0)$ = 初期温度

$T_2 = f(N^*)$ = 最終温度

3 実験方法

3.1 試験機および試験片

使用した試験機はシェンク式疲労試験機(3 600 rpm,
39 N・m)であり、これに試験片冷却槽を取り付けて
低温下で繰返しねじり試験を行った。試験片素材には
炭素工具鋼 SK-3 の丸棒 ($\phi 19$ mm) を用い、Fig. 2
に示す形状・寸法のテーパ付き較正試験片に加工した。

3.2 冷却および温度制御装置

試験片の冷却には冷媒として液体窒素をガス化した

Fig. 2. Tapered calibration specimen.

Fig. 3. Cooling equipment.

ものを用い、Fig. 3 に示すようにこれを冷却槽に導い
て低温雰囲気を作った。³⁾ 試験片の温度を表面に取り付
けた C・C 熱電対により測定し、プログラム式温度制
御装置(データ・ロガー)を用いて窒素容器内のヒー
タに流す電流を断続することにより所定の温度制御を
行った。

3.3 純鉄薄膜の製作および接着

塩化第一鉄浴を用いた鉄めっきによりはくを製作し、
真空中でこれに再結晶化焼なましを施した³⁾ 後 3×20
mm の短冊形に細分して純鉄薄膜を製作した。Fig. 4
に薄膜の顕微鏡組織を示す。薄膜の接着にはシアノア
クリレート系瞬間接着剤を使用し、試験片の軸に沿っ
て対称位置に 2 枚接着した。³⁾

Fig. 4. Microstructure of iron-foil.

3.4 実験方法

一定温度 $T = -20, -50, -80^\circ\text{C}$ においてすべり線
発生限界応力曲線 (τ_p - N 曲線) を求めた。一定応
力、変動温度下で線形被割則が成立するか否かを調査
するため、 $-20 \sim -50^\circ\text{C}$ および $-50 \sim -80^\circ\text{C}$ の範囲で

それぞれ温度が直線的に上昇または下降する場合について薄膜の較正值を求めた。なお、すべり線の観察、限界応力の測定などは200倍の光学顕微鏡を用いて従来と同様な方法で行った。

4 実験結果および考察

$T = -20, -50, -80^\circ\text{C}$ の各温度における τ_p - N 曲線を Fig. 5 に示す。この図から τ_p と $\log_{10} N$ との関係はほぼ直線とみなせるので式(4)は

$$\tau_p = A(T) \log_{10} N + B(T) \quad (7)$$

ここで、 $A(T)$ および $B(T)$ は T の関数とおける。Fig. 5 には最小二乗法により近似した τ_p - N 関数を実線で示した。本実験では温度を連続的に変動させるため、中間の温度における τ_p - N 曲線を推定しておく必要がある。そこで、中間の温度においても τ_p - N 曲線が式(7)で表せると仮定し、 $A(T)$ および $B(T)$ をラグランジュの補間法により求めた。Fig. 6 にこの結果を示す。したがって、 τ_p を T と N の関数で表現できることになり、Fig. 7 はこのようにして求

Fig. 5. τ_p - N curves at constant temperature.

Fig. 6. Lagrange's interpolation of A and B .

Fig. 7. τ_p - N curves calculated.

めた τ_p - N 曲線の一例を示す。

いま温度が時間すなわち繰返し数に比例して変化するとすれば、式(3)は

$$T = f(n) = T_1 + (T_2 - T_1) \frac{n}{N^*} \quad (8)$$

ここで、 T_1 = 初期温度

T_2 = 最終温度

したがって、式(6)より

$$\int_0^{N^*} \frac{dn}{N} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{h(T)} \frac{N^*}{T_2 - T_1} dT = 1 \quad (9)$$

ここで、 $h(T)$ は式(7)を N について解いて

$$N = h(T) = \exp \left\{ \log_e 10 \cdot \frac{\tau_p - B(T)}{A(T)} \right\} \quad (10)$$

よって式(9)より

$$N^* = (T_2 - T_1) \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{h(T)} \quad (11)$$

となり、変動温度 ($T_1 \sim T_2$) 下における限界繰返し数 N^* が計算できる。種々の応力について、 $T = -50 \sim -80^\circ\text{C}$ および $T = -20 \sim -50^\circ\text{C}$ における N^* をそれぞれ計算し、結果を Table I に示した。ここで式(11)の積分項にはシンプソン則による数値積分を行った。

Table I. Critical number of cycles at the varying temperature.

$T = -50 \sim -80^\circ\text{C}$		$T = -20 \sim -50^\circ\text{C}$	
τ_p MPa	N^*	τ_p MPa	N^*
128	4.31×10^5	113	1.61×10^5
132	3.14×10^5	118	1.06×10^5
137	2.28×10^5	123	2.28×10^4
142	1.66×10^5	128	1.66×10^4

Table I の結果に基づき、Fig. 2 の試験片を用いてそれぞれの温度範囲で繰返し数 N^* の較正試験を行い、温度上昇または下降における限界応力 τ_p を求めた。いま、Fig. 8 に示すように、薄膜が温度 T (限界繰返し数: N) において微少回数 dn だけ負荷を受けたと

Fig. 8. Representation of experimental results.

き、最終温度 T_2 において $(dn/N) \cdot N_2$ だけ負荷を受けたものとみなせば、最終温度 T_2 における等価繰返し数 N_{eq} はこれを全区間にわたって積分することにより

$$N_{eq} = \int_0^{N^*} N_2 \frac{dn}{N} = N_2 \frac{N^*}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{h(T)} \quad (12)$$

で表すことができる。求めた τ_p を用いて式(12)により N_{eq} を計算し、整理した。Fig. 9 にその結果を示す。ここで、線形被害則(2)が成立すれば式(12)より N_{eq}

(a) $T = -50 \sim -80^\circ\text{C}$ (b) $T = -20 \sim -50^\circ\text{C}$ Fig. 9. τ_p -values at the varying temperature.

$= N_2$ となることは明らかである。図中の破線は一定温度下における τ_p のばらつきの最大幅 (約 $\pm 4\%$) を示している。変動温度下の較正值は温度上昇・下降にかかわらずその約80%がこの範囲に入り、このことからすべり線の発生に対して線形被害則がほぼ成立するといつて差しつかえない。なお、本実験は低温領域で線形被害則の成否を検討したが、すべり線発生にひずみ時効の影響が現れない温度のもとで作用応力が較正曲線の傾斜部分の値ならば、同様の結果が得られるものと考えられる。

5 結 言

連続的温度変動下における純鉄薄膜のすべり線発生を規定する式として積分形式で表した線形被害則を提案し、ついでこの式の妥当性を検討するため、低温下で直線温度変動試験を行い薄膜の較正值を求めた。得られた結果を要約すると以下ようになる。

(1) 低温域における直線温度変動下では、純鉄薄膜のすべり線発生に対して、温度上昇・下降に関係なく線形被害則 $\int (1/N) dn = 1$ が成り立つ。

(2) したがって、このことから一般的な温度変動下においても線形被害則が成立するものと考えられ、この場合の表示式として上式が妥当であるといえる。

(3) 本実験は低温域で実施したが、薄膜にひずみ時効が現れない温度ならば同様の結果が得られるものと考えられる。

なお、数値計算には名古屋大学大型計算機センタの FACOM-M200 を使用した。

終りに、本研究の一部は昭和56年度文部省科学研究費(一般C)の援助によるものであることを付記して、謝意を表す。また、本研究を行うにあたり終始懇篤なるご助言、ごべんたつを賜った名古屋大学工学部清家政一郎教授に厚くお礼申し上げるとともに、実験に協力いただいた当時名古屋大学工学部学生の伊東明君に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 北岡征一郎, 長瀬康男, 清家政一郎, 日本機械学会論文集, A-46, 1450 (1980).
- 2) 北岡征一郎, 長瀬康男, 清家政一郎, 日本機械学会論文集, A-47, 275 (1981).
- 3) 北岡征一郎, 長瀬康男, 前畑秀和, 清家政一郎, 日本機械学会論文集, A-48, 1315 (1982).