洋白線の疲労破壊における顕微鏡組織とかたさ変化*

西畑 三樹 男** 山 浦 將 甫***

On the Variation of Hardness Value and Microstructure due to Fatigue Fracture in Nickel Silver Wire

by

Mikio NISHIHATA and Masatoshi YAMAURA

(The Electrical Communication Laboratory)

The authors have investigated upon the variation of hardness value and microstructure due to fatigue fracture in nickel silver wire. Both cold-drawn and low annealed specimens with 2m/m in diameter were used. Also, Haigh-Robertson testing machine was used.

The followings are the results obtained:

(1) The cold-worked nickel silver wire may be decreased in hardness value due to fatigue fracture, but it is not affected by the amount of repeated stress. It would be because of the softening phenomena where the nonuniform worked structure may be turned into grain growth states due to the repeated stress.

(2) The 600°C×1hr annealed nickel silver wire may be increased in hardness value due to fatigue fracture but it is not affected by the amount of repeated stress.

(3) The low annealed nickel silver wire may be increased or/and decreased in hardness value, which is governed by the amount of repeated stress and the annealing temperature.

(Received Sep. 13, 1960)

1. 緒 言

疲労試験の際には試験片の性質は、疲労の進行につれていろいろ変化するが、その中からかたさの問題を取り扱ってみると、(1)繰返応力¹⁾²⁾によって硬化するもの、(2)逆に軟化するもの、(3)あまり変化の起こらないものなどに大別することができる。これらの変化はいずれも疲労試験に用いた試料の諸条件(材質の種類、加工、熱処理)と試験条件(繰返応力の種類と大きさ、繰返速度、試験温度)などによるものと思われる。したがって、これらの要因について個々に究明すれば、S-N 曲線のほかにかたさ変化からみた疲労破壊条件をある程度見きわめることが可能となると考えられる。そこで今回は、既に報告したばね用洋白線の回転曲げ疲労において破壊した試料の破面のかたさに対し、繰返応力の大きさ、加工度、低温焼鈍温度の要因がどのような影響を及ぼすかについて、顕微鏡組織の変化とあわせて検討した。その実験結果について報告する。

2. 実験試料および実験方法

用いた試料は洋白線で、Table 1 にその化学成分を

示す。加工度は20, 60%の2種類で、いずれも最終線径 2m/mφ に線引加工後、所定の直線性加工⁷⁾を施したものである。低温焼鈍し 200~400°C×1 hr はアルゴンふんい気中で行なった。疲労試験には、ヘイ・ロバートソン式繰返曲げ疲労試験機を用いた。回転数は毎分4000回とし、応力計算に必要なヤング率は13000 kg/mm²の値を採用した。かたさ測定は、ライツ製微小かたさ試験機(荷重200 gr)を用い、繰返応力比(σ/σ_w : 繰返応力/耐久限度)約0, 1.0, 2.0, 3.0付近で破壊した面から0.5m/mはいった横断面を研磨し測定した(Fig. 1)。Table 2 に試料の機械的特性を示す。また顕微鏡組織を調べるために用いた腐食液は、CrO₃ 40 gr, NH₄Cl 7.5 gr, HNO₃ 50 ml, H₂SO₄ 50 ml を水に溶かし全量を1 lにしたものである。

3. 実験結果および考察

(I) 疲労破壊面のかたさ変化

(i) 冷間加工材 加工度0, 20, 60%の各試料について S-N 曲線を求め、耐久限度より大きい繰返応

Table 1 Chemical composition of specimens

Mark	Components		
	Ni	Zn	Cu
WA-NSW	18	27	55

* 原稿受付 昭和35年9月13日

** 正員 日本電信電話公社電気通信研究所

*** 日本電信電話公社電気通信研究所

x x : Hardness was measured along this line

Fig. 1 The location where the hardness values were measured

Fig. 2 The variation of the hardness values with the distance from the center of the wire specimen after fatigue fracture

力 (σ/σ_w 約 1.1, 1.7, 2.3 付近) で破壊した面について, かたさを測定し Fig. 2 (a) (b) (c) の結果を得た. これによると加工度 0 % のものは疲労破壊によりかたさは増加している (Fig. 2 (a)). 加工度 20 %, 60 % のものは逆にかたさは低下しており, その低下の割合は 60 % 加工のほうが大きい. またかたさ分布は表面が低く, 中心部が高い山形の傾向が認められる (Fig. 2 (b) (c)). そこでこれらの結果を, 要因を A. 繰返応力の大きさ, B. 線径断面の測定場所, C. 加工度にとり, 分散分析により三元配置で検討し Fig. 3, 4 の結果を得た.

すなわち, 繰返応力の大きさの影響を各加工度についてみると, 加工度 0 % のものは繰返応力を与えることによりかたさは増加するが, その割合は応力比 1.1 付近までは応力の大きさとともに増加するが, それ以

Table 2 Mechanical properties of the specimen used

Reduction (%)	Annealing temperature (°C·1 hr)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Fatigue strength at 10 ⁷ cycles (kg/mm ²)
0	600	54.5	35.0	18.8
20	—	74.5	7.8	26.0
60	—	82.8	5.1	28.0
"	200	88.2	2.0	22.0
"	250	88.5	2.0	21.0
"	300	90.8	2.0	23.5
"	350	90.4	3.0	18.5
"	400	83.8	4.0	16.5

Fig. 3 Relation between the hardness values and the repeated stress ratio in the case of the cold drawn specimens

上では応力の大きさには関係しない。また加工度 20, 60% のものは繰返応力により逆にかたさは低下する。その低下のしかたは繰返応力比 1.7 までは応力の大きさとともに直線的に低下するが、それ以上では繰返応力の大きさには関係しない (Fig. 3)。またこれらのかたさ変化を加工度の主効果について示すと、加工度 0% ではわずかに増加し、加工度 60% では低下している (Fig. 4)。なお、図中 $\bullet$ 印の値は各応力におけ

Fig. 4 Relation between the hardness values and the reduction factor

る平均かたさを示したものである。

(ii) 低温焼鈍材 Fig. 5 (a)(b)(c)(d)(e) は 200~400°C の各低温焼鈍材の疲労破壊面 (繰返応力比 1.1, 1.8, 3.5) について、かたさを測定した結果であ

Fig. 5 The variation of the hardness values with the distance from the center of the wire specimen after fatigue fracture

る。これによると各温度における焼鈍材のかたさは一樣でない。すなわち、200, 400°C 焼鈍試料のものは疲労前後においてはあまり差異はない (Fig. 5 (a)(c))。

250~350°C 焼鈍試料では、疲労破壊によりかなりの低下が認められる (Fig. 5 (b)(c)(d))。そこでこれらの結果を前と同様に、要因を、A. 繰返応力の大きさ、B. 繰返断面の測定場所、C. 焼鈍温度とし、三元配置により検討し、Fig. 6, 7 の結果を得た。すなわち、繰返応力の大きさの影響を各低温焼鈍温度についてみると、200°C 焼鈍材では、繰返応力が小さいときはわずかにかたさは増加するが、応力比が1.8以上になると再び低下する。250~350°C 焼鈍材のものは、繰返応力を与えることによりかたさは低下する。その割合は応力比1.1付近までは応力の大きさとともに低下するが、それ以上では応力の大きさには関係しない。また、400°C 焼鈍材では、繰返応力1.1まで急激に低下し、それ以上の応力になると再び増加する (Fig. 6)。このようにして得られた各焼鈍温度における試料のか

たさは、疲労したあととはかなり低下していることがわかる (Fig. 7)。

(II) 疲労破壊面の顕微鏡組織の変化

(i) 冷間加工材 Photo. 1 は0, 20, 60%加工材の横断面の組織と各繰返応力のもとで破壊したあとの組織変化を示したものである。これによると疲労前は、加工度0%は均一な結晶粒が現われているが、加工度20, 60%では完全な加工組織を呈し、特に繰返の表面付近に繰引および直線加工の影響が残っている。疲労破壊後は加工度0%ではあまり顕著な差異はないが、20, 60%加工材では疲労破壊による変化が認められる。特に加工度20%のものは疲労破壊により双晶組織がより明らに現われ、60%加工のものは結晶粒の成長が認められる。

(ii) 低温焼鈍材 Photo. 2 は加工度60%低温焼鈍材について、疲労前後の組織を横断面について示したものである。これによると明らかに各温度において疲労破壊による組織変化が認められるが、加工材のように明らでない。また低温焼鈍組織においても表面付近は加工の影響がわずかに残っているのがみられる。

(iii) 観察されたクラックについて 各試料の破壊面に生じたクラックについて、系統的に観察を行なったが、小さいクラックが表面からわずかにいった所に1~2個程度しか認められなかった。Photo. 3 のクラックは、数10個の試料から偶然に見出されたものである。クラックが集中している場所は、表面から1/3~1/4離れた所であり、かなり規則性のある模様を示している。特にこの近傍(傍)の結晶粒は微細化している。クラックの幅の大きい所は表面に近く、表面と内部からへのクラックが重なり合ったと思われる所が一番大きい。また縦方向には破面から、きれいな割れが生じている。この割れはクラックの集中している中心と一致している。

以上の結果をかたさおよび顕微鏡組織の変化とあわせて考えると、洋白線の冷間加工材は疲労破壊によりかたさは低下する。その原因は顕微鏡組織にも現われたように繰返応力により不均一な加工組織が双晶組織または結晶粒成長へと移行し、疲労によって生じた一種の加工軟化現象によるものと思われる。そのしかたは繰返応力の小さい範囲(応力比1.1以下)では大きさに関係するが、それ以上の応力では大きさに関係しない。また、これらの試料のクラックの発生箇所は、繰引または直線加工を受けた部分に発生しやすい。また、完全焼鈍材では、疲労破壊によりかたさは増加するが、そのしかたはごく小さい応力(耐久限度付近以下)では大きさに応じて増加するが、それ以上の応力では大きさに関係しない。低温焼鈍材では疲労破壊により、かたさは低下または増加し、そのしかたは繰返

Fig. 6 The variation of the hardness values and repeated stress ratio in the case of low temperature specimens

Fig. 7 Relation between the hardness values and low temperature

---x--- before fatigue test
—○— after fatigue

応力の大きさおよび焼鈍温度によって異なる。特に低温焼鈍効果の現われる $250\sim 350^{\circ}\text{C}$ の付近では、かなさは著しく低下する。

4. 総 括

洋白線の冷間加工材および低温焼鈍した試料の回転曲げ疲労破壊によるかなさおよび顕微鏡組織の変化を検討した結果、次のことがわかった。

(1) 冷間加工した洋白線は、疲労破壊によりかな

さは低下する。それは繰返応力を与えることにより不均一な加工組織が明りょうな双晶組織または結晶粒成長へと移行し、一種の加工軟化現象の現われとみられる。そのしかたは繰返応力の小さい(耐久限度付近以下)ところでは、応力の大きさに関係するが、それ以上の応力では大きさに関係しない。

(2) 完全焼鈍材 ($600^{\circ}\text{C}\times 1\text{ hr}$) した洋白線は、疲労破壊によりかなさは増加する。そのしかたは耐久限

Photo. 1 Micrograph of transverse section

Photo. 2 Micrograph of transverse section (60% reduction)

Transverse section ($\times 100 \times 1/2$) (A) High magnification of cracks ($\times 400 \times 1/2$) Longitudinal section ($\times 50 \times 1/2$)
 Rotating bending stress $\sigma=66 \text{ kg/mm}^2$. Number of cycles $N=5.1 \times 10^4$

Photo. 3 Micrograph of cracks

度付近より小さい所では応力の大きさに関係するが、それ以上の応力では大きさに関係しない。

(3) 低温焼鈍材では、疲労破壊により硬化または軟化あるいは両現象が組み合わさって現われる。その割合は繰返応力の大きさと焼鈍温度によって異なる。

(4) 洋白線のクラックは線の表面からわずかはいった所に生じ、その発生箇所はいずれも線引加工および直線加工の影響を受けた不均一部分に発生しやすい。

終りにのぞみ、電気通信研究所早坂次長、窪小谷調

査役ならびに東京大学吉沢教授の御指導に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 加藤, 安藤, 第3回材料試験連合講演会前刷 (1959.9)
- 2) N.H. Polakowski, A. Plachoudhuri, Proc. ASTM, 701/716 (1954)
- 4) 西畑, 材料試験, 9, 82, 470 (1960)
- 5) John, N. Kenyon, Proc. ASTM, 1 073/1 084 (1950)
- 6) 西畑, 山浦, 材料試験, 10, 88, 40 (1961)
- 7) 仲田, 通研実用化報告, 7, 5 (1958)

金 属 材 料 (つづき)

疲労と累積被害則における応力相互作用について (On Stress Interaction in Fatigue and a Cumulative Damage Rule) A.M. Freudenthal and R.A. Heller, Aero/Space Sci., J., 431/442 (July, 1959)

航空機が飛行中に遭遇する突風のように、時間的に不規則な変動応力に対する疲労寿命の算定式の修正について述べられている。実験結果と合わない線型累積被害則 (Palmgren の仮説) $\sum \frac{n}{N} = 1$ に基づく疲労寿命の算定式を干渉係数 (interaction factor) の導入によって修正したものである。ある応力 S_i に対する寿命 N_{Si} はこれより高い応力 S_{i+m} の作用で被害が促進された結果 N'_{Si} に減じたとする。S-N' 線図を仮空の (fictitious) S-N 曲線と呼んでいる。干渉係数 w_i は $N_{Si}/N'_{Si} > 1$ なる比で定義される。応力 S_i のひん(頻)度分布を p_i とすると繰返変動応力に対する寿命 $N = 1 / \sum_i (p_i / N_{Si})$ は $N' = 1 / \sum_i (p_i w_i / N_{Si})$ と修正される。突風荷重のひん度分布は $p(S) = he^{-hs}$ で表わされる。また、S-N_s, S-N'_s の両曲線は両対数目盛で直線関係にあり、この両曲線の各係数と荷重のひん度分

布, N, N' を表わす式および疲労寿命の分布関数 (極小値分布 $L(N) = \exp \left\{ - \left(\frac{N - N_0}{V - N_0} \right)^a \right\}$) を用いて変動応力に対する疲労寿命の算定式を求めている。(ただし、それに含まれる係数のあるものに対しては種々試験条件を含む実験式を与えているから、結局は一定応力振幅の S-N 曲線より変動応力の場合の寿命は推定されないこととなる。) 著者らは 2024 アルミニウム合金および SAE 4340 鋼について、プログラム制御片持ばり回転曲げ試験機に、上記のひん度分布をもつ荷重スペクトルをプログラムに組込んで変動応力疲労試験を行ない、結果として $\sum \frac{n}{N} < 1$ であり、著者の提案した計算式と良く一致すると述べているが、航空機のように高い荷重のひん度がきわめて小さいような場合についてのみ一致したに過ぎないのであって、2 段重複荷重試験のような極端な応力変動の場合に、切欠や加工硬化、時効などにより材料が強化され $\sum \frac{n}{N} > 1$ となる場合には合わないことを著者自ら認めているようである。

(中川隆夫)