炭素鋼の疲労強度に及ぼすねじり塑性加工の影響*

林 建 吉** 土 居 俊 一***

The Effect of Torsional Deformation on the Fatigue Strength of Carbon Steel

by

Kenkichi HAYASHI and Shun'ichi DOI

(Nagoya Institute of Technology, Nagoya)

Hereunder is presented a report of studies made on the influence of preliminary workings on the fatigue strength of carbon steel. The effects of residual stress and structural change that are produced by cold-workings on the fatigue strength are discussed. For the increase of fatigue strength, in the case of uniaxial deformation like tension or compression, as previously reported, the structural change is considered to be more responsible than residual stress. In the case of biaxial deformation like torsion, however, these fatigue behaviours are not clarified yet.

In this paper, the effect of torsional preliminary working on the fatigue strength of S45C steel is discussed in comparison with that of tensile and compressive preliminary workings. The results obtained are summarized as follows:

(1) The residual stress produced by torsional deformation assumes a shearing state in the direction counter to the twisting direction that has been previously given.

(2) The materials subjected to preliminary workings, in plastic deformation by three kinds of strain, twisting, stretching and compressing, each to equal level of degrees, have shown increase in fatigue strength quantitatively in the descending order as follows;

twisting strain > stretching strain > compressing strain

(3) The fatigue limit of twisted specimen continues to increase until such a straining as $\epsilon^* = 0.400$, and then it tends steeply to decrease. Considering the stress state of twisted specimens, it is concluded that the residual stress due to the preliminary working does not affect the fatigue limit, although the apparent stress amplitude increases with the shearing residual stress. The fractured surface is considered as apt to be preliminary influenced by the shearing residual stress.

(4) From the results of the tension test and the compression test of each strained specimen, it is apparent that the yield point for reversal direction of the deformed direction is lower than that of the annealed specimen because of Bauschinger's effect in the case of stretched and compressed specimen. On the other hand, the yield points in both the tensile and the compressive directions in the case of twisted specimen increase over that of the annealed specimen. These anisotropy of work-hardening is considered to contribute to the result that the fatigue strength of twisted specimen is largest among the preliminary strained specimens in the same amount of equivalent plastic strain by the three kinds of straining processes.

(Received Aug. 24, 1971)

1 緒 言

筆者らは、塑性変形による疲労強度上昇に関する基礎的研究として、予加工によって生ずる残留応力と組織変化の疲労強度への影響について、実験的検討を試みた。前報に示したように、回転曲げ疲労試験片に、

あらかじめ、引張塑性変形と圧縮塑性変形を与えたものを用意し、それらの疲労強度を比較すると、予加工材の疲労強度は、焼なまし材に比べて上昇し、同一予加工量を付与した予加工材の耐久限については、引張予加工材の方が、圧縮予加工材の場合を上まわる傾向となった。また、予加工によって生ずる残留応力と、それ以外の組織変化による加工硬化の疲労強度への寄与を分離して考察した結果、前者より、むしろ後者の方が、予加工材の疲労強度上昇に、より貢献することがわかった。さらに、同一の塑性ひずみを与えた材料に

* 本報を「炭素鋼の疲労強度に及ぼす予加工の影響に関する研究 (第2報)」(The Effect of Preliminary Working on Fatigue Strength of Carbon Steel, II) とする。

原稿受理 昭和46年8月24日

** 正 会 員 名古屋工業大学 名古屋市昭和区御器所町

*** 学生会員 名古屋工業大学 名古屋市昭和区御器所町

において、ひずみを与えた方向によって、かたさ測定値に差異が現われることより、すでに、バウシナ効果として知られている、加工硬化の異方性を考慮する必要があることがわかった。

一方、塑性変形に伴って生ずる加工硬化の異方性については、引張りおよび圧縮塑性加工のような、加工軸方向の異方性を生ずる場合の他に、ねじり塑性加工のような、軸方向に対して、 $\pm 45^\circ$ の異方性を生ずる場合が考えられる。また、ねじり塑性加工においては、材料の軸心付近と表面付近の変形量に差が生じることも考慮する必要がある。

そこで、本報告においては、炭素鋼の疲労強度に及ぼす予加工の影響について、ねじり塑性加工による場合を取り上げた、そして、引張りおよび圧縮塑性加工によるものとの回転曲げ疲労強度の比較から、予加工材の疲労強度上昇理由について定量的考察を加えた。

2 実験方法

2.1 試験片および疲労試験

使用した材料は、前報と同じく S45C 丸棒材であり、その化学成分および焼なまし状態の機械的性質は、Table I に示すとおりである。

Table I. Chemical composition and mechanical properties.

Composition	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr
(%)	0.45	0.21	0.58	0.016	0.012	0.09	0.01
Yielding point	Tensile strength	Fracture stress	Elongation	Reduction of area			
33.6 kg/mm ²	59.4 kg/mm ²	123.7 kg/mm ²	24%	54%

Fig. 1. Dimension of specimen.

試験片は、まず Fig. 1 に示す形状寸法に切削加工後、880°C にて 30 分の真空炉中焼なまし処理を行ない、試験片平行部を電解研磨により仕上げた。

疲労試験は、小野式回転曲げ疲労試験により行なった。回転速度は、約 2000 r. p. m. である。

2.2 ねじり予加工材の作製

予加工として、ねじり塑性変形を焼なまし材に付与したが、引張材あるいは圧縮材と塑性変形の程度を同一にして比較する必要がある。そこで、付与する仕事を一定にするという考え方より、Mises 型の相当ひずみ ($\epsilon^* = (\sqrt{2}/3)[(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]^{1/2}$)、ね

じりでは $\epsilon^* = \gamma/\sqrt{3}$ が同一になるようねじり塑性変形を付与した。すなわち、相当ひずみを、前報と同じく、0.0488、0.0952 および 0.182 の 3 つに選び、東京衝機製ねじり試験機によって、焼なまし材にねじり塑性変形を付与した。

2.3 X線による応力測定条件と残留応力解析

残留応力測定に用いた特性 X 線は、Cr-K α 線であり、自動記録式平行ビーム型 X 線応力測定装置を用い、回折面依存性の影響の少ない、試料の (211) 面より回折線を得て $\sin^2\psi$ 法により残留応力を得た。その他の X 線応力測定条件は、Table II に示すとおりである。

Table II. Condition of X-ray stress measurement.

Characteristic line	Cr-K α
Diffraction plane of specimen	(211)
Tube voltage	30 kV
Tube current	8 mA
Filter	Vanadium
Area	2 mm $\times$ 4 mm
Incident angle of X-ray ϕ	0, 15, 30, 45 deg.
Peak determination	Half value breadth method

X 線法は、応力成分を測定するものであるから、残留応力についても応力解析を行なうことができる。すなわち、試験片軸方向残留応力 σ_x 、これに 45° 方向の 2 つの残留応力 σ_{+45° および σ_{-45° を測定し、これらより応力解析して、残留応力の主応力 σ_1 、 σ_2 および最大せん断残留応力 $\tau_{\max}$ ならびに、 σ_1 と σ_{-45° のなす角度 ϕ を求めた。

3 実験結果

3.1 ねじり予加工による残留応力、かたさおよび回折線積分幅の変化

ねじり塑性変形による残留応力を解析した結果、相当ひずみに対する、残留応力の主応力 σ_1 、 σ_2 、および最大せん断残留応力 $\tau_{\max}$ の変化を示したのが Fig. 2 である。図より明らかなように、負荷応力方向とは逆のせん断残留応力が生じており、ほぼ純粋なせん断応力状態となっていることがわかる。

Fig. 2. Change of residual stress due to torsional deformation.

Fig. 3. Residual stress and hardness distribution on the revealed surface ($\epsilon^* = 0.182$ twisted).

また、ねじり塑性加工材の残留応力とかたさの、表面から内部への分布を求めた結果がFig. 3である。これらは、試験片表層を順次電解研磨で除去し、現われた面について、X線応力測定により残留応力を測定したが、除去に伴う応力解放の補正は行っていない。また、表層除去により試験片直径が減少するので、これに比例してX線照射面積を小さくせねばならないため、除去層厚さは約1mmまでで測定を打ち切った。一方、かたさは、荷重200gのマイクロビッカースかたさ計により測定し、10回の測定値の平均値を採用した。前報に示した引張り予加工材および圧縮予加工材の場合と比較して、ねじり予加工材の残留応力およびかたさ分布は、表面付近で急なこう配を持ち、内部に進むに従って減少していくことがわかる。これは、引張り予加工材および圧縮予加工材において現われた表面効果^{7,8)}に加えて、ねじり塑性加工における変形量の半径方向の分布によるものと考えられる。すなわち、ねじり塑性加工材の軸心近傍の組織は、ほとんど焼きなまし

Fig. 4. Changes of hardness and integral breadth due to prestraining.

材と同じものであると考えられる。

次に、予加工による組織変化の様子を調べるために、相当ひずみに対して、かたさとX線回折線積分幅の変化を求めたのがFig. 4である。比較のために、引張り予加工材および圧縮予加工材の場合も図中に示してある。かたさについては、図より明らかなように、 $\epsilon^* = 0.10$ 近辺までは、ほぼ一致しているが、その後、ねじり変形による方がかたさ測定値が高くなる傾向を示している。また、X線回折線積分幅は、試料の(211)面より求めたものである。加工法によって、あまり差は現われないが、むしろ $\epsilon^* = 0.10$ までは引張り予加工による方がねじり予加工によるものよりわずかながら大きい傾向を示す。

3・2 疲労強度

相当ひずみ 0.0488, 0.0952 および 0.182 の3段階のねじり塑性加工材の疲労試験の結果、Fig. 5(a), (b) および(c)に示すような S-N 曲線が得られた。比較のため、前報で示した引張りおよび圧縮塑性加工材の S-N 曲線も図中に示した。時間強度については、いずれの場合も明確な傾向をは握し得ないが、耐久限については、焼きなまし材に比べて上昇し、その値はいずれの予加工量においても、ねじり材が、引張材および圧縮材を上まわる傾向を持っていることがわかる。また、図より明らかなように、それぞれの耐久限上昇

Fig. 5. (a) S-N curve for $\epsilon^* = 0.0488$, (b) S-N curve for $\epsilon^* = 0.0952$, (c) S-N curve for $\epsilon^* = 0.182$.

Fig. 6. S-N curves for various twisted specimens.

量の差は、予加工量の増加に伴って大きくなる傾向がみうけられる。

引張りおよび圧縮塑性加工では、局部収縮および座屈のため、与え得る予加工量に限度があるが、ねじり予加工材では、相当に大きな塑性加工を与えることができる。大きなねじり塑性変形まで付与した試験片についての疲労試験の結果がFig. 6である。これによると、 $\gamma=0.692$ ($\epsilon^*=0.400$) までは、耐久限は、加工量に応じて上昇し、焼なまし材の耐久限と比べて、約43%の上昇を示している。しかし、 $\gamma=1.038$ ($\epsilon^*=0.559$) という大きな加工量を与えると (⊗印の点)、バラツキが非常に大きくなり、耐久限は、返って減少するようである。この場合のバラツキは、ねじり変形によって形成される表面の大きな凹凸の応力集中、あるいは、すでにすべり面に沿って入った小さなき裂に起因していると考えられる。そこで、電解研摩によって、試片表層をごく少し除いた試片について疲労試験した実験点が*印を付したもので、これによると、バラツキは小さくなっているが、耐久限は約 29 kg/mm² となる。

一方、試験片の疲労破面について、典型的な3つの例を、Fig. 7 (a), (b)および(c)に示す。図(a)に示す $\gamma=0.173$ ($\epsilon^*=0.0952$) のねじり材では、破面は、軸方向にほぼ直角になっており、これは、前報の引張材および圧縮材の破面と同様である。これに対し、 $\gamma=0.692$ ($\epsilon^*=0.400$) のねじり材では、図(b)に示すように、破面は、軸直角方向に約 16~17° をなしており、一つのき裂が伝ばして破断に至らしめているのがわかる。次

(a) $\epsilon^*=0.0952$ $\sigma_a=33.6 \text{ kg/mm}^2$ $N_f=2.8 \times 10^5$ (b) $\epsilon^*=0.400$ $\sigma_a=35.3 \text{ kg/mm}^2$ $N_f=4.0 \times 10^5$ (c) $\epsilon^*=0.559$ $\sigma_a=38.3 \text{ kg/mm}^2$ $N_f=8.1 \times 10^5$

Fig. 7. Typical fracture surfaces of twisted specimens.

に、図(c)に示すように、 $\gamma=1.038$ ($\epsilon^*=0.559$) のねじり材では、全周よりいくつかのき裂が内部に進展しており、小さな最終破断面が破面の中央部に観察される。

4 考 察

4・1 ねじり予加工材における残留応力の疲労強度および疲労き裂伝ば方向に及ぼす影響

回転曲げ疲労試験における負荷応力状態に及ぼす表面残留応力の影響を明らかにするため、試験片表面のせん断要素と垂直要素について、Sines の方法⁹⁾で図示するとともに、その応力状態を Mohr 円で示すと、それぞれFig. 8 (a)および(b)ようになる。図中の文字で、添え字 r および矢印 $\leftarrow$ は、残留応力成分を示し、添え字 a および矢印 $\leftarrow$ は、負荷応力を示す。図より明らかなように、最大、最小のせん断応力 $\tau_{\max}$ お

Fig. 8. States of stresses for twisted specimen during fatigue test.

および $\tau_{\min}$ と、垂直応力 $\sigma_{\max}$ および $\sigma_{\min}$ 、また、応力振幅 τ_{amp} および σ_{amp} また、平均応力 τ_{mean} および σ_{mean} ならびに $\sigma_{\max}$ の方向 ϕ は、残留応力成分 τ_r を考慮すると、次のように表わされる。

せん断要素について、

$$\tau_{\max} = \sqrt{(\sigma_a/2)^2 + \tau_r^2} \quad (1)$$

$$\tau_{\min} = -\sqrt{(\sigma_a/2)^2 + \tau_r^2} \quad (2)$$

したがって、

$$\tau_{\text{amp}} = \sqrt{(\sigma_a/2)^2 + \tau_r^2} \quad (3)$$

$$\tau_{\text{mean}} = 0 \quad (4)$$

また、垂直要素について、

$$\sigma_{\max} = (\sigma_a/2) + \sqrt{(\sigma_a/2)^2 + \tau_r^2} \quad (5)$$

$$\sigma_{\min} = -(\sigma_a/2) - \sqrt{(\sigma_a/2)^2 + \tau_r^2} \quad (6)$$

したがって、

$$\sigma_{\text{amp}} = (\sigma_a/2) + \sqrt{(\sigma_a/2)^2 + \tau_r^2} \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{mean}} = 0 \quad (8)$$

また、

$$\left. \begin{aligned} \phi &= +\frac{1}{2} \tan^{-1}(2\tau_r/\sigma_a), \sigma_{\max} \text{ に対して} \\ &= -\frac{1}{2} \tan^{-1}(2\tau_r/\sigma_a), \sigma_{\min} \text{ に対して} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

すなわち、ねじり材の場合は、前報の引張材および圧縮材の場合と異なり、残留応力値は平均応力には影響を与えずに、その応力振幅のみに影響を与えることがわかる。したがって、ねじり材の最大および最小応力の値は、ねじりに伴って生ずるせん断残留応力 τ_r により、負荷応力振幅よりも大きくなると考えられる。しかし、図(b)の Mohr 円中の OA、OB または(9)式に示すように、最大垂直応力 $\sigma_{\max}$ の働く方向と最小垂直応力 $\sigma_{\min}$ の働く方向とは同一でない。すなわち、最大荷重の際に、最大垂直応力を受ける面は、最小荷重の際には、最小垂直応力を受けないことがわかる。しかも、最大および最小垂直応力の働く方向 ϕ は、残留応力によって変化するのであるから、ねじり材の疲労過程における応力状態は、一層複雑となる。同一面上の最大応力と最小応力の差、すなわち、応力振幅の最大値が、負荷応力振幅 σ_a となることを考えると、上式で示した応力振幅は、実際には意味がなく、ねじりに伴って生ずる残留応力は、回転曲げ疲労強度には、影響を与えないと考えた方がよいようである。

しかしながら、き裂伝ば方向が最大引張応力と直角方向になるかどうかを考察するのには、(9)式を考慮する必要がある。

Fig. 7 において示した疲労破面のき裂発生点での軸方向からの傾きを、残留応力の観点より考察すると、表面におけるき裂伝ばの方向が、せん断残留応力 τ_r と負荷応力 σ_a とのベクトル和、すなわち、最大垂直応力 $\sigma_{\max}$ の方向 ϕ と密接な関係にあると考えられる。

ここで、ねじり材の破断直前のせん断残留応力値を推定するために、耐久限直下で疲労試験を行ない、疲労過程における残留応力の減少比を求めた結果が、Table III である。前報に示した引張材および圧縮材の場合は、20~30%の減少比であったのに対し、ねじり材では、40~50%で、残留応力の減少が少ない。

次に、Fig. 7 (b) に一例を示した $r=0.692$ ($\epsilon=$

Table III. Decrease of residual stress due to fatigue test below fatigue limit for twisted specimen. (kg/mm²)

Pre-twisting ϵ^*	Before fatigue			After fatigue			Ratio
	σ_1	σ_2	τ	σ_1	σ_2	τ	
0.0488	11.6	-12.3	11.6	7.3	-7.3	7.3	0.59~0.63
0.0952	18.1	-18.9	18.0	8.3	-12.6	10.4	0.49~0.67
0.182	19.9	-21.7	20.8	7.9	-10.4	9.2	0.44~0.48
0.400	21.8	-23.8	22.3	10.5	-12.3	11.3	0.48~0.52

0.400) のねじり材について、(9)式より、応力振幅 $\sigma_a=35.3 \text{ kg/mm}^2$ 、および破断直前のせん断残留応力 τ_r として、Table III より、 $\tau_{\max}=11.3 \text{ kg/mm}^2$ を用いると、最大垂直応力 $\sigma_{\max}$ の方向は、 $\phi=16.3^\circ$ となる。この値は、破断面写真におけるき裂伝ば方向が、軸直角方向となす角度の観測値とほぼ一致する。また、写真にも明らかなように、破面が、らせん状に旋回するのは、残留応力の影響と考えられる。

しかし、より小さい加工度のねじり材については、この残留応力と負荷応力とが作る最大主応力方向と直角にき裂が伝ばするという結果は得られていない。これは、加工硬化量によって、残留応力がき裂伝ば方向に与える影響が異なるためか、ねじりによって形成されるであろう微小なき裂の有無と大きさが影響するためと考えられる。

4・2 ねじり予加工材の疲労強度上昇について

ねじり材の疲労強度が、同一変形量を付与した引張材および圧縮材を上まわる原因を考察するには、組織変化による加工硬化とその異方性を考慮に入れねばならない。そこで、各予加工材の引張りおよび圧縮試験によって得られた、応力-ひずみ関係を Fig. 9 に示す。これらは、前述の相当ひずみ 0.0952 の各予加工材についての結果であるが、図より明らかなように、引張材および圧縮材においては、加工方向と逆の方向には、降伏点の低下が生じているのに対し、ねじり材においては、加えたねじりの方向と逆方向のねじりに対しては、バウシニング効果が現われるであろうが、引張りおよび圧縮方向には、降伏点の上昇が生ずることがわかる。したがって、各予加工材の加工硬化の異方性は、疲労における応力-ひずみ関係のヒステリシス・ループの形状に影響を与えることになる。なお、ねじり予

Fig. 9. Stress-strain relations after pretraining.

Table IV. Estimated values of axial strains on the surface of specimen during fatigue test ($\varepsilon^* = 0.0952$).

Stress amplitude		$\sigma_a = 30 \text{ kg/mm}^2$			$\sigma_a = 28 \text{ kg/mm}^2$		
		0	4×10^4	4×10^5	0	5×10^5	5×10^6
Twisted specimen	Strain range	$-1.5 \sim +1.5$	$-1.92 \sim +1.92$	$-2.8 \sim +2.8$	$-1.2 \sim +1.2$	$-1.32 \sim +1.32$	$-2.4 \sim +2.4$
	Mean strain	0	0	0	0	0	0
	Strain amplitude	1.5	1.92	2.8	1.2	1.32	2.4
Stretched specimen	Strain range	$-3.5 \sim +0.01$	$-4.6 \sim +0.01$	$-7.0 \sim +0.01$	$-3.05 \sim +0.01$	$-4.0 \sim +0.01$	$-5.6 \sim +0.01$
	Mean strain	-1.75	-2.3	-3.5	-1.5	-2.0	-2.8
	Strain amplitude	1.75	2.3	3.5	1.5	2.0	2.8
Compressed specimen	Strain range	$-0.01 \sim +3.4$	$-0.01 \sim +4.5$	$-0.01 \sim +5.3$	$-0.01 \sim +3.0$	$-0.01 \sim +3.7$	$-0.01 \sim +4.3$
	Mean strain	+1.7	+2.25	+2.65	+1.5	+1.85	+2.15
	Strain amplitude	1.7	2.25	2.65	1.5	1.85	2.15

加工材は、中実丸棒であるため、表面から内部に向けて変形量の分布を生じているので、その引張りまたは圧縮変形挙動は、これによる強度分布の影響をも含んでいることになると考えられるが、定性的には考察が可能である。

各予加工材の加工硬化の異方性の疲労強度への影響を、疲労過程における試片表面のひずみ量について比較してみる。Table IV に示す計算結果は、2種の同一応力振幅で疲労させた各予加工材について、引張りおよび圧縮試験を行ない、真応力-真ひずみ曲線より、 $\sigma = c\varepsilon^n$ の関係式を適用し、両対数グラフ上での外挿によって求めた、試片表面における軸方向ひずみの推定値である。表より明らかなように、引張りおよび圧縮予加工による加工硬化の異方性は、疲労過程において、平均ひずみを生ずる結果となる。一方、ねじりの場合には、このようなことはない。また、表中に示すように、繰返し数の増加に伴い、平均ひずみと、ひずみ振幅が増大することより、疲労に伴って、予加工によって生じた加工硬化が緩和されていると考えられる。したがって、疲労過程において平均ひずみを持たないねじり予加工材は、引張材および圧縮材と比べて、疲労に伴う、加工硬化の緩和の程度が少ないと考えられる。

次に、この加工硬化の異方性の疲労強度への影響をさらに考察するために、ねじり予加工材と引張り予加工材について、予加工による表面組織が疲労に伴って、どのように変化するかを、S10C 材を用いて観察した結果を Fig. 10 に示す。一般によく知られているように、予加工によって生じたすべり線は、いずれの場合も、最大せん断方向に発達していることがわかる。一方、回転曲げの応力繰返しは、試料表面では、引張りおよび圧縮の応力繰返しと同じであるので、引張り予加工材のすべり帯は、疲労試験の時も、疲労に伴って増

Fig. 10. Changes of surface structure of prestrained specimens due to fatigue: photomicrograph of slip bands of S10C ($\times 400 \times 1/2$).

大し、成長するのがわかる。一方、ねじり予加工材のすべり帯は、応力繰返しに伴って変化せず、むしろ、試料表面での引張りおよび圧縮の応力繰返しによって生ずる新しいすべり帯が発達するのが認められる。これらは、回転曲げ疲労試験における負荷応力状態等より、充分に予想される結果ではあるが、ねじり予加工のときに働いたすべり系が、疲労過程においては、働いていないことは、前述のねじり材が平均ひずみを持たないこととともに、ねじり材の疲労強度の上昇に貢献しているものと考えられる。

5 結 言

S45C 炭素鋼の冷間加工の疲労強度に及ぼす影響について、前報の引張材および圧縮材と同一のねじり塑性変形を Mises 型の相当ひずみによって付与した予加工材を、常温にて、回転曲げ疲労試験に供し、かつ、以上の三種の予加工材の疲労強度について比較検討した結果、次の結論を得た。

(1) ねじり材の残留応力は、ねじり方向とは逆方向

のせん断残留応力であり、残留応力解析の結果より、ほぼ純粋なせん断応力状態であることがわかった。

(2) 疲労試験の結果として、疲労限上昇量は、いずれの予加工量においても、ねじり材が、引張材および圧縮材を上まわる傾向となった。

(3) ねじり材の疲労強度は、予加工量を増すにつれて上昇し、本実験においては、 $r=0.692(\epsilon^*=0.400)$ のねじり材について、焼なまし材の約43%の耐久限上昇を示し、さらに大きなねじり変形を付与すると返って耐久限は減少した。

(4) ねじり材の回転曲げ疲労試験における負荷応力状態の解析より、疲労強度には、ねじりに伴って発生する残留応力は影響を与えていないと考えられ、むしろ結晶組織変化にもとづく加工硬化によって決まるものと考えられる。ねじり材が、引張材および圧縮材よりも、疲労強度が上昇することは、予加工による加工硬化の異方性に関係があることが明らかとなった。

(5) ねじり材の疲労破面の軸方向からの傾きは、残留応力も考慮した最大垂直応力の方向と密接な関係があると考えられる。

終わりに、本研究に際し、試料提供を賜った、日本電装(株)および愛知製鋼(株)に厚く謝意を表する。

(昭和45年7月17日 第9回X線材料強度に関するシンポジウムにて講演；昭和46年8月23日 ICM. Extension セミナー (X線セミナー)にて講演)

参 考 文 献

- 1) 林 建吉, 土居俊一, 材料, **19**, 1 075 (1970).
- 2) Tabor, D., Sheet Metal Ind., **31**, 329 (1954).
- 3) 戸沢康寿, 中村雅勇, 塑性と加工, **8**, 631 (1967).
- 4) Oppel, G., Exp. Mech., **4**, 135 (1964).
- 5) 平 修二, 松木健次, 三木武司, 材料, **16**, 1 027(1967).
- 6) 田丸武好, 小島公平, 材料, **16**, 972 (1967).
- 7) 西原利夫, 平 修二, 青山威恒, 日本機械学会論文集, **14**, 1 (1948).
- 8) 西原利夫, 平 修二, 日本機械学会論文集, **14**, 49 (1948).
- 9) Sines, G., NACA Tech. Note, 3 495 (1955).
- 10) Sautter, W., A. Kochendorfer, and U. Dehlinger, Z. Metallk., **44**, 553 (1953).
- 11) Ludwik, P., "Elemente der Technologischen Mechanik" (1909) Springer, Berlin
- 12) Forsyth, P. J. E., "The Physical Basis of Metal Fatigue", Chap. 3, 34 (1969) Blackie and son limited. London and Grasmow