軟鋼の疲労中の加工硬化とひずみ時効*

中 川 隆 夫** 猪 飼 靖*** 前 田 隆 雄****

Workhardening and Strain Ageing during Fatigue of Mild Steel

by

Takao NAKAGAWA, Yasushi IKAI

(Faculty of Engineering, Kobe University, Kobe)

and Takao MAEDA

(Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Ind., Ltd., Ibaragi)

The fatigue process of steel is characterized by the existence of fatigue limit and coxing effect. Many researches have been made from the viewpoint of strain ageing brought about by interstitial solute atoms of carbon and nitrogen. The effect of strain ageing on fatigue limit, however, is not fully understood.

This experiment is undertaken from the viewpoint that fatigue is a competitive process of two mechanisms of damage and strengthening of the material. Two techniques are applied for this purpose. The change in the solute content of C and N atoms is measured by internal friction. Artificial ageing and reversion are applied in order to change the density of Cottrell atmosphere at dislocations.

The experimental results are as follows :

The solute atomic content in Ferrite decreases as the fatigue process advances. The material is hardened by strain ageing to the extent of 1~1/2 times of strain hardening. The fatigue limit is explained by the competitive relation between active slip systems and strain ageing.

(Received Feb. 13, 1976)

1 緒 言

鉄鋼材料の疲労挙動の特徴的な現象として、明りょうな耐久限度の存在と過小応力効果を挙げるができる。これらはこの材料における明りょうな降伏点の存在とともに注目され古くから研究がなされてきた。そして転位線上に集積するCやNの侵入型固溶原子によるコットレル^{1)~3)}ふん囲気がこれらの現象を支配しているとする考えがかなり強く主張されてきている。一方これに対して耐久限度の存在はその応力⁴⁾下で生じた微小き裂先端の鈍化に起因するという考え⁵⁾や、結晶粒界部の破壊強度に支配されているという考えも示されているのであって、耐久限度を存在せしめている機構については充分に解明がなされているとはいいがたいのが現状であるといえよう。

本実験ではひずみ時効が鋼の疲労強度に及ぼす影響

を明らかにするため次の三つの手法を用いて研究を進めることにした。

(1) ひずみ時効能の異なる材料の疲労挙動を比較する。

(2) 疲労の進行に伴う侵入型固溶元素の量の変化と硬度変化とから、ひずみ時効の進行の程度をチェックする。

(3) 一たん形成されたコットレル¹⁾ふん囲気を、材料内で他に変化をもたらすことなく消去させる処理(復元処理)法を得て、疲労過程の加工硬化量とひずみ時効量との分離を試みる。

2 試料および実験方法

CH10A および CH10R の丸棒を素材とした。その化学組成を Table I に示す。これを圧延して Fig. 1 に示す試片形状に加工した。CH10R はひずみ時効能を増すために 700℃ 1時間保持後水焼入れを行ない、CH10A はひずみ時効能を低下させるため 850℃ の湿水素ふん囲気中で48時間保持して脱炭を施した。この材料の化学組成は改めて分析しなかった。R材, A材

* 原稿受理 昭和51年2月13日

** 正 会 員 神戸大学工学部 神戸市灘区六甲台町

*** 神戸大学工学部 神戸市灘区六甲台町

**** 住友金属工業(株)鹿島製鉄所 茨城県鹿島郡鹿島町大字光

Table I. Chemical composition of materials.

	C	Si	Mn	P	S	Al
CH10A	0.09	0.03	0.46	0.013	0.016	0.031
CH10R	0.11	0.01	0.39	0.016	0.018	—

Fig. 1. Shape and dimensions of the specimen.

Table II. Mechanical properties of specimens.

Properties	Yield stress	Tensile strength	Elongation	Reduction of area	Hardness
	(kg/mm ²)	(kg/mm ²)	(%)	(%)	H _V
Specimens					
Quenched	30.1	39.7	40.0	34.3	126.0
Decarburized	7.6	21.6	49.0	95.9	76.5

ともに結晶粒径は約20 μ であった。試料の機械的性質を Table II に示す。

疲労試験は 1 000 c. p. m. の繰返し速度で片振り引張負荷を与えた。

疲労試験の後、試片をさらに整形して内部摩擦測定に使用した。内部摩擦測定は横振動法で行ない自由振動の対数減衰率 Q^{-1} を求めた。内部摩擦量の温度依存性より、そのピーク高さの Q^{-1} とピーク温度 T_{peak} とから次式により侵入型固溶元素の濃度を算出した。ここでは C と N とを分離しないで求めていることになる。

$$C \& N (w\%) = 0.0043 \times T_{peak} \times Q^{-1} \quad (1)$$

復元処理の温度と時間はビッカースかたさの変化および Granato-Lücke の理論による転位密度の測定を通して求めた。すなわち 5% および 20% 加工した試料を 100°C 1 時間人工時効した後加熱し、加工時のかたさに戻るかつ再時効で再び加工後時効のかたさに回復する温度と時間を復元処理条件とした。またこの処理によって転位密度が変化していないことを確かめた。

3 実験結果および考察

3・1 S-N 曲線

CH10A に脱炭処理を施した試料の S-N 曲線を Fig. 2 に示す。耐久限度は降伏点 (7.6 kg/mm²) の約 2 倍であった。Fig. 3 に示す焼入材では降伏点 (30.1 kg/mm²) よりかなり上に耐久限度が存在している。ただし負荷応力はすべて最大応力で記述することとした。

3・2 復元処理

加工材に時効と復元とを繰返し施し、硬度の変化を調べた結果を Figs. 4 および 5 に示す。これらの図から

Fig. 2. S-N curve of decarburized specimen stress vs. number of cycles.

Fig. 3. S-N curve of quenched specimen stress vs. number of cycles.

Fig. 4. Repetition of artificial ageing and reversion on quenched specimen strained 5%.

Fig. 5. Repetition of artificial ageing and reversion on decarburized specimen strained 5%

復元条件として焼入材 (CH10R) については 270℃ 5 分, 脱炭材については 300℃ 60 分がふさわしいものと判断される. 時効と復元を繰り返すとやがて硬度に再現性が乏しくなってくるのは, C や N が安定な析出物となって母相から消失していくためと考えられる. またこの復元処理は加工度 5% および 20% ともに有効である. なおこの復元処理を通じて転位密度に変化がないことを確かめた. Granato-Lücke によると内部摩擦 Q^{-1} , ひずみ振幅 ϵ および転位密度 A との間に次のような関係が成り立つとされている.

$$\ln(Q^{-1}\epsilon) = C_1 A + C_2 1/\epsilon \quad (2)$$

(C_1, C_2 定数)

Fig. 6 に示す Granato-Lücke プロットの縦軸との交点が転位密度に対応するものである. 加工前の材料と比べて, 加工材は時効・復元の処理を通じて転位密度に大きな変動を生じていない. このようにして復元処理に根拠を与えることができた.

Fig. 6. Granato-Lücke plot of heat treated specimen.

3・3 共振周波数の変化

疲労の進行に伴い試料の共振周波数は Fig. 7 のように変化する. 一方試片の引張加工に伴う共振周波数の変化は加工度に対して直線的であり, かつこの加工材に時効を施しても共振周波数に変化がないことをあらかじめ確かめてあるので共振周波数は疲労の進行を

Fig. 7. Changes in resonant frequency in fatigue process.

示すメジャーとならないことがわかる. また疲労の進行に伴う大きな塑性変形は 10^4 回までの繰返し数ですでに終わってしまっていることがわかる.

3・4 疲労の進行に伴う固溶元素量の変化

疲労途上の試片の内部摩擦を温度を変化させて測定し, Fig. 8 (耐久限度直上) および Fig. 9 (同直下) を得た. (1)式より C, N 原子の固溶量を求め Fig. 10 にその変化を示した. 疲労の進行に伴って C, N 原子のフェライト中よりの減少すなわちひずみ時効が確実に進行していることが明らかにされた. 耐久限度以下ではひずみ時効がかなり効果的に進行しているようである.

Fig. 8. Changes in Snoek peaks in fatigue process above fatigue limit (quenched specimen).

Fig. 9. Changes in Snoek peaks in fatigue process below fatigue limit (quenched specimen).

Fig. 10. Decreases of solute atom contents in fatigue process (quenched specimen).

3・5 疲労途上の加工硬化量とひずみ時効量

疲労の進行に伴って試料は Figs. 11 および 12 に示すような硬度上昇を示す。この硬度上昇量のうち、一部は加工硬化に、残りはひずみ時効によるものと考えて、疲労途上の試料に 3・2 で得られた復元処理を施したところ、その硬度はかなり低下する。Fig. 13 にその大きさを示す。この硬度の低下量がすなわちひずみ時効に相当するものと考えられ、残りの硬化量は加工硬化によるものと判断される。

Fig. 11. Changes in hardness in fatigue process (quenched specimen).

Fig. 12. Changes in hardness in fatigue process (decarburized specimen).

Fig. 13. Decrease in hardness by reversion (quenched specimen).

3・6 推論

以上の結果をもとにして耐久限度の機構として次のようなものを考えてみた。

疲労の過程では材料の塑性変形とくに転位の往復運動によって損傷がもたらされる。一方加工硬化とひずみ時効とが同時に進行して材料を強化する。結局損傷と強化との競合過程が疲労であると考えてみると、両

者の釣り合ったところで耐久限が現われることになる。耐久限度以下では、塑性変形により生じた転位はひずみ時効により充分トラップされるようになると、それ以後の繰返し負荷に対して材料はもはや塑性変形を受けなくなる。ひずみ時効量は Fig. 13 によると加工硬化量の 1~1/3 倍あるので塑性変形抑止の効果は充分にあると考える。ただし耐久限度以上での活発なすべり帯の働きはひずみ時効によっては充分にトラップしがたいものと考ええる。

以上の推論を次のようにして検討した。

3・7 疲労途上に加えた時効と復元の効果

耐久限度以上で破断近くまで疲労させた試料に人工時効を施せばひずみ時効が充分に進行するため活発なすべり帯が乏しくなる結果、寿命は増大するものと期待される。実験によれば 1×10^5 回の寿命レベルで 10 および 80% 疲労させた後 100℃ 1 時間の時効を施すと破断寿命はそれぞれ 4 倍および 10 倍増加した。一方同様に疲労させた後復元処理を施したところ寿命はほとんど変化しなかった。これは再負荷後の加工硬化とひずみ時効が速やかに進行するものであることを示していると考えられる。

4 結 論

以上の実験結果をまとめて次のような結論を得た。

- (1) 疲労の進行に伴って母相中の C, N 原子の固溶量が低下する。
- (2) 疲労の進行に伴う共振周波数の変化は損傷を示すメジャーとならない。
- (3) 疲労途上の試料の硬化量のうち 1/2~1/4 がひずみ時効による硬化量であると測定された。
- (4) 疲労途上の試料に人工時効を施すことによりその寿命は約 10 倍増加した。また復元処理ではその寿命をほとんど変化させない。

(昭和50年11月20日 シンポジウム「疲労における最近の諸問題」にて講演)

参 考 文 献

- 1) Sinclair, G. M., Proc. ASTM, **52**, 743 (1952).
- 2) Lipsitt, H. A., and G. T. Horne, Proc. ASTM, **57**, 587 (1957).
- 3) Lipsitt, H. A., and D. Y. Wang, Trans. AIME, **221**, 918 (1961).
- 4) 大久保肇, 池内一郎, 北岡征一郎, 機論, **34**, 1349 (1968).
- 5) Yoshikawa, A., et T. Sugeno, Trans. AIME, **233**, 1314 (1965).
- 6) Snoek, J., Physica, **6**, 591 (1939); **8**, 711 (1941).
- 7) Granato, A., and K. Lücke, J. Appl. Phys., **27**, 789 (1956).
- 8) Wood, W. A., Bull. Inst. Metals, **3**, 5 (1955).