539.43:539.389.3/.4

疲れ過程における応力ひずみ履歴曲線について*

(II. 時効による強化)

佐々木 茂 美**

The Micro Plastic Stress-Strain Hysteresis Loops
of Steel during the Fatigue Process

(II. The Effects of Strain Aging)

by Shigemi SASAKI

In order to investigate the effects of strain aging on the fatigue process of steel, the stress-strain hysteresis loops were measured through all stages of fatigue process by wire strain gauges 3 mm in length.

Two kinds of killed steel have been used in the experiment; (e.g. 0.18 % C and 0.12 % C), all of them were sufficiently heat-treated to reduce the interstitial atoms C and N, thus varied the strain aging effects.

The main results obtained are as follows:

- (1) The magnitudes of hysteresis loop decrease, being caused by the strain aging effects.
- (2) The materials tested under the strain aging effects are stronger than the materials free from the effects and the hysteresis energy accumulating until fatigue failure increase.
- (3) At the initial stage on the fatigue process, the maximum value of the strain aging effects appear.

1. 緒 言

鋼材の疲れ過程を、微小部分 (3 mm 範囲) で測定したヒステリシスループの変化で示したところ、第1図が得られた。ループ面積 F は、不安定状態 ξ ならびに準安定状態 η の和から成るとして、定性的に説明された。また図のループ面積の変化傾向と寿命等との関係もすでに前報で判明している^{(1)~(3)}。したがって、本報では、疲れ過程における時効硬化の影響を、主として、ループ面積の変化を介して考えることにした。

実験には、熱処理条件を変えて時効の起る状態を加減したキルド鋼 (固溶原子の量を増減した) を用いた。そして、ループ面積の変化、疲れ被害と時効の熱による変化、活性化エネルギー等から疲れ過程における時効硬化の影響を調べた。

その結果、時効硬化と疲れ過程との関係ならびに疲れ寿命に及ぼす時効硬化の影響等を知ることができた。以上から、疲れ進行中の時効による材質強化の実験式が導かれ、時効によるループ面積の変化ならびに

寿命変化の計算を行なうことができた。

2. 時効硬化と疲れ過程

疲れ試験中に時効が起った場合には、材料は強化され、寿命が増加することが既に報告されている⁽⁴⁾。しかし、疲れ過程のいかなる段階 (第1図参照) において時効が起り、いかなる段階で材料が強くなるかは不明であった。本報では、主として、この点を検討することにした。

第 1 図

* 昭和 35 年 10 月 14 日 第 38 期東京秋期講演大会において講演，原稿受付 昭和 38 年 1 月 12 日。

** 正員，電気通信大学 (調布市小島町 14)。

鋼材の疲れ試験中に時効が起れば、Cottrell 効果等⁽⁵⁾により、転位等は加工硬化のみの場合よりもさらに動き難くなり、材料はさらに硬化する。したがって、かたさならびに降伏点等が著しく増加し、同時にスリップ等が減少し⁽⁶⁾、それらの結果として、第1図のループ面積 F が全般的に小さくなるものと推察される。すなわち、格子欠陥等が集り難くなるので破断核等が形成され難く、したがってマイクロクラックが発生し難く、その成長伝ばもおそくなり、材料は強化されて時効が起らない場合よりも寿命が延びるものと考えられる。

次は時効の起り方であるが、 α 鉄の時効は、浸入形固溶原子 C ならびに N の拡散によるものであり、C ならびに N 原子のジャンプの確率とエントロピ、ひん度等に関係することは周知である(内部摩擦の測定等⁽⁶⁾)。すなわち、内部の状態と外的条件に依存して起るとされている。疲れ過程の時効も同様であろうが、疲れに伴う特殊な格子欠陥(特殊な内部状態)の形成と応力ならびに温度等(外部条件)に関係すると考えられる。すなわち、疲れ過程では、ヒステリシスループの面積変化から推察される内部エネルギーの変化と蓄積があり、また材料内部の微視的状态も変化する(疲れの度合が変化する)ので、時効の起る量、割合、時間等も変化すると思われる。

以上、疲れ過程において、時効の起る割合ならびに寿命に及ぼす影響等を理論的に求めることは、現在のところ困難であるので、本報では実験的に求めることにした。

3. 実験結果と実験式

3.1 ヒステリシスループの実験結果 供試材の化学成分、試験片の形状、寸法ならびにひずみ測定用のひずみゲージ等は前報⁽¹⁾⁽²⁾と同じものを使用した。略述すると、材料は主として 0.18% C の Si-Al キルド鋼⁽¹⁾で、19 ϕ の圧延丸棒より平行部 11 ϕ の試験片に機械加工した。そして、#100 番紙やすりにて研磨仕上した。

第2図

試験片の熱処理は、真空焼なまし炉中において、860°C に1時間保持した後、冷却の速度を加減して焼なまし処理を行なった。すなわち、時効の起りやすさを加減するため、炉中で冷却する速度を変えて C, N 等の固溶度を変化させたものである⁽⁷⁾。

使用した試験機は片持式回転曲げ疲れ試験機である。回転数は前報と同様⁽¹⁾⁽²⁾、ひずみ測定の場合上、応力繰返し数約 1000 以上は 3000 rpm であり約 1000 以下は 220 rpm であった。

実験結果の S-N 曲線を第2図に示す。材料は 0.18% C の Si-Al キルド鋼⁽¹⁾である。図の○印は、真空焼なまし炉中において、860°C からの冷却速度が 5~10°C/h できわめておそく、したがって C, N 原子の固溶量がきわめて少なく、時効がきわめて起り難い場合の結果である。同様に◎印は、冷却速度が 30~40°C/h のものであり、C, N 固溶原子が存在し、時効が起り得る場合の結果である。また●印は、冷却速度が 250~300°C/h の場合で、時効がより起りやすい場合の結果である。図より、焼なましの冷却速度の速いものほど寿命が延びていることがわかる。これは後述等の理由により、C, N 固溶原子の拡散に基づく時効により材料が強化されたためであると考えられる。

次に第2図の実験点のそれぞれについて、疲れ試験中試験片の一部分(標点距離 3 mm)のヒステリシスループの変化を測定した。その結果の一例が第3図である。測定法は前報と同様で⁽¹⁾⁽²⁾、電気抵抗線ひずみ測定器により静的に測定した。図の縦軸の $(\sigma_p \lambda_n)/(\sigma_0 \lambda_0)$

第3図

はヒステリシスループの面積の変化割合を示したものである。 $\sigma_0 \lambda_0$ は最初のサイクルにおける全応力 $\sigma_0 = 2\sigma_g$ と全ひずみ λ_0 との積である。また $\sigma_p \lambda_n$ は、疲れ過程のあるサイクルにおけるループの応力軸方向の最大幅 σ_p と全ひずみ λ_n との積で、ループの面積に関係した値である。

K-14 は第 2 図の○印点に相当している。これは真空焼なまし炉中において注意深く徐冷した試験片によるもので、C, N 原子の固溶量がきわめて少なく、したがってきわめて時効が起り難い場合の結果である。なおこの試験片は、疲れ試験の途中において図中に記入された時間だけ運転休止を行ない、常温時効によるループ面積の変化を調べたが、図のごとくほとんど変化が認められなかった。したがって、後述の検討からも推定されるように、疲れ試験中もおそらく時効が起らなかったと考えられる場合である。

K-1 は第 2 図の◎印点に相当している。すなわち C, N 原子の固溶量が存在し、時効が起り得る場合の結果である。K-1 のループ面積の変化傾向を K-14 と比較すると、全般的にループ面積は小さくなっていた。また第 2 図より判断して寿命も延びていることがわかる。なお K-14 とは異なり、図示の運転休止時の常温時効により、ループ面積は減少した。したがって疲れ試験中も時効が起ったと考えられる場合である。なお運転休止の影響としては、(a) 寿命に及ぼす影響、(b) ループ面積の変化傾向に及ぼす影響が考えられる。しかし (a) の影響の無いことは周知である。また (b) の影響は第 3 図および後述の第 5 図等の実験から、わずかであると考えられることができる。

K-12 は第 2 図の●印点に相当している。すなわちキルド鋼としては、割合に時効の起りやすい試験片の結果である。この場合には、前述に比べループ面積の減少程度ならびに寿命の増大が著しかった。

これらの結果は、応力振幅が異なる場合の K-11, K-4 の場合にも、第 2, 3 図のごとく、同様に認められた。以上、キルド鋼については、焼なましの冷却速度を制限することにより、疲れ過程の時効を制限することが可能であると考えられる。次にこのことが普通のリムド鋼についてもいえるかどうかを調べるため次の実験を試みた。

0.07% C 鋼⁽¹⁾について、第 3 図と同じ実験を行なった。その結果が第 4 図である。すなわち材料の熱処理としては、910°C×1h だけ真空焼なまし炉中で保持した後、炉中冷却の速度を加減して焼なましした。リムド鋼によるこの

場合には、熱処理条件により、C, N 固溶原子を前述のキルド鋼ほどに減少させることは不可能で、したがっていずれの場合にも時効が起り得ると考えられるものである。熱処理条件としては、第 3 図の K-14, K-11, に相当するものが第 4 図の A-8 であり、第 3 図の K-1, K-4 に相当するものが第 4 図の A-7 である。第 3 図と第 4 図を比較すると、ループ面積の変化傾向と寿命の増大はキルド鋼の場合とほぼ同一であった。したがってリムド鋼の場合でも、熱処理条件により、鋼材の疲れ過程の時効を制限することがある程度可能である。

次に疲れ試験中の運転休止による常温時効が、ループ面積の変化傾向に及ぼす影響について検討を加えた。第 3 図のキルド鋼の場合には、図から判断されるように、その影響範囲はわずかであると考えられることができる。さらに念のため、材料を変えて検討したのが第 5 図である。

第 5 図の (a) は 0.47% C 鋼⁽¹⁾, (b) は 0.02% C 鋼⁽¹⁾ (市販純鉄) の結果である。試験片の熱処理は、(a) は 820°C×1h, (b) は 1050°C×1h だけそれぞれ

第 4 図

第 5 図

れ真空焼なまし炉中に保持した後、前述と同様、炉中冷却の速度を $30\sim 40^{\circ}\text{C/h}$ に限定して行なった。したがっていずれも時効が起り得ると考えられる場合である。図の (a), (b) いずれも図に記入された時間の運転休止による常温時効によりループ面積の減少が認められている。しかるに減少の影響範囲は、疲れ過程のループ面積の変化傾向からみると、ごくわずかであった。すなわち (a) についてみると、疲れ試験の途中において、15 h の運転休止後のループ面積の減少範囲 $\Delta n_1 = 2.5 \times 10^3$ であり、その後の 17 h 運転休止後の $\Delta n_2 = 5 \times 10^3$ であった。これらは破断時の繰返し数 $N = 3.1 \times 10^5$ の 1.6% 以内である。なお (b) についてみると、14 h 運転休止後の $\Delta n_1 = 1.5 \times 10^4$ であり、17 h 後の $\Delta n_2 = 3 \times 10^4$ であった。これらは $N = 1.6 \times 10^6$ の 1.3% 以内である。

結局、第3図ならびに第5図の実験結果から、疲れ試験の途中の運転休止時の常温時効が、疲れ過程のループ面積の変化傾向に及ぼす影響は、わずかであるといえることができる。

次に得られた実験結果を別の観点から検討することにした。

測定されたヒステリシスループの形を示したのが第6図である。第3～5図ならびに後述の第12図の実験点の記号○, ⊖, ●, は第6図のA形に相当し, ◊, ⊙, ⊕ はB形, ⊖, ⊙, ⊕ はC形に相当している。結局前報と同様^{(1)~(3)}, 疲れ試験中に観察されたヒステリシスループの形は、3形式の変化に分けられ、破断までに3形式が必ず表われた。また図において、疲れ過程のループ面積の変化が、3段階変化に分けられること^{(1)~(3)}が本報でも認められた(第1図参照)。なおループ面積の変動、3段階変化と疲れ過程との関係その他は前報^{(1)~(3)}と全く同様であった。

以上の実験結果をまとめてみた。

時効硬化の度合の表わし方であるが、応力一定の条件下において、第7図の $\eta_a = (k-a)/k$ を便宜的に疲れ過程の時効硬化度と称することにする。ただし、第7図の横軸には、それぞれの試験片の破断までの繰返し数比を%で示している。したがって破断点が100%

となっている。図の縦軸の k ならびに a はそれぞれ時効が起り難い材料ならびに時効を起しやすい材料のループ面積を表わしている。

疲れ過程の時効硬化度がどのような割合で現われるかを調べるために整理した結果が第8図である。図より、時効度のピークが疲れの初期過程(約10%以内)に存在することが認められた。図の傾向は、時効のかたさ対温度曲線等として一般に知られているものと類似しており、両者の関係を考えることもあるいは可能かと思われる。

3.2 寿命変化の実験式 時効によるループ面積の変化と寿命との関係を検討した。

上述の第8図は、後述等の理由により、疲れ過程における時効の現われ方を調べたものと考えることができる。図に示された疲れ過程の時効硬化度 η_a は、第8図の実験を検討した結果、次の(1)の実験式で表示されることがわかった。

$$\eta_a = \frac{k-a}{k} = 0.039 \left\{ \log \left(\frac{n}{N} \right) - 1 \right\}^2 + \tanh \left\{ 1.05 \log \left(\frac{n}{N} \right) + g \right\} + m, \quad k > a$$

.....(1)

第7図

第8図

第6図

ただし, n はループ面積測定時, N は破断時の応力繰返し数であり, g, m は時効の程度を示す定数である。

次に疲れ過程の時効硬化度と内部仕事(ループ面積)の和との関係を検討した。材料は時効によりある定まった割合だけ強化されて, その結果破断までになされる内部仕事(ループ面積)の総和 U_a が増加すると考えて結果をまとめてみた。その結果実験範囲内で次の(2)式の成立することが判明した。

$$U_a = 5 \sum \gamma_a k = 5 \sum \gamma_a \left(\frac{\sigma_p \lambda_n}{\sigma_0 \lambda_0} \right)_k = \sum \left(\frac{\sigma_p \lambda_n}{\sigma_0 \lambda_0} \right)_a \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし, 添字の a は時効が起りやすい場合, k は時効が起り難い場合を示している。

次に実験結果を整理して内部仕事の総和と寿命との関係を求めたところ, 第 9 図が得られた。

図はばらつきの少ない直線関係であるから, 次の(3)式で表示される。

$$N_a = \{3.2U_a - 7.4\} \times 10^4 \quad \dots\dots\dots (3)$$

以上, (1), (2), (3) 式から時効による寿命変化が計算されることになる。

3.3 ループ面積の変化の実験式 以上の検討の結果から, 疲れ過程のループ面積の変化は次の(4)式で表わすことができる。

$$a = k(1 - \gamma_a) = k \left[1 - 0.039 \left\{ \log \left(\frac{n}{N} \right) - 1 \right\}^2 + \tanh \left\{ 1.05 \log \left(\frac{n}{N} \right) + g \right\} + m \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし, a ならびに k はそれぞれ時効が起りやすい材料ならびに時効が起り難い材料のループ面積の変化を示す(第 7 図参照)。

3.4 計算結果 以上により計算が可能になった。実験式から時効の影響を算定する場合, 時効の起り難い材料のループ面積の変化 k が理論的または数値的に求まっていれば, (1) 式の g と m を決定することにより, 以上の計算が可能となる。しかし, 現在のところは理論的に求まっていないので, 計算の一例として, 時効の起り難い材料の第 3 図の K-14 ならびに K-11 の点線(実験結果の平均値)を基準にして計算を試みた。時効が起る材料について, 疲れの初期過程におけるループ面積の変化を測定することにより, (1) 式の g, m が求まる。たとえば計算の一例として, 第 3 図の K-14, K-1 および K-11, K-4 の組合せの場合には, それぞれ $g=3.61, m=-0.87$ ならびに $g=3.51, m=-0.83$ であり, K-14, K-12 の組合せの場合には $g=3.23, m=-0.67$ であった。

上記による(1)式の計算結果は第 8 図の実線で示されている。(2)式によりそれぞれの U_a を計算し, (3)式により N_a を求めると, K-1, K-12, K-4 はそれぞれ $8.8 \times 10^4, 2.24 \times 10^5, 2.05 \times 10^5$ とおのおの破断までの繰返し数が計算によって求められる。(4)式よりループ面積の変化を計算で求め, 実線で表わし, 実験点と重ねて第 3 図に示した。図より計算値と実験値とは良く一致することが認められた。

以上の検討の結果, 理論または実験により, 時効の起り難い材料のループ面積の変化が判明している場合には, 時効の起る材料の疲れの初期段階のループ面積を測定することにより, 時効による強化割合と寿命変化との関係が計算可能であることがわかった。

4. 実験結果に対する検討と考察

4.1 時効硬化が起り得ることの検証 室温の疲れ過程の初期等に前述のごとき時効が起るかどうかを検討することにした。

温度の点に関しては, 内部摩擦の実験等により, 20°C 拡散ピーク(Snoek peak, 20~50°C, 1 c/s)の存在が認められている⁽⁶⁾ので, 本報の疲れの場合にも拡散が起り得ると考えられる。

機構の点に関しては, 転位論説が有力であるが⁽⁵⁾⁽⁹⁾室温の疲れの場合の詳細は不明である。

次に, 時効の起ったことを確かめるための実験を行った。

4.1.1 再結晶法による検討 疲れ試験の途中において, 再結晶温度程度の熱を加えた後再び疲れ試験を続けた場合には, (1) 時効が増加して転位等が動き難くなる。それと同時に(2)疲れ被害の回復もある程度増加して, 材料は比較的安定な状態となる。結

第 9 図

局(1),(2)の理由により転位等が動き難くなるので、その後の疲れ試験において、マイクロクラックの発生伝ぱが少なくなり、したがって寿命はながくなると考えられる。したがって場合によっては、途中で熱を加えなかったものよりもむしろ寿命が増加する場合も考えられる。以上の観点から実験を試みた。

応力 σ_g の疲れ試験の途中のある繰返し数 n_1 で試験を中止し、 $600^\circ\text{C}\times 1\text{h}$ の再真空焼なまし処理(普通の炉中冷却)を行ない、引続き同じ応力で試験を続け n_2 で破断したとし、このときの n_2/N を求めた。ただし、再真空焼なまし処理を行なわなかった場合(σ_g 応力の)の破断までの繰返し数を N とした。この方法は、最初に Sinclair, Dolan が用いた方法⁽⁹⁾を応用したもので、再結晶法と呼ぶことにする。

この実験結果から第10図が得られた。図において、 $n_1/N + n_2/N = 1$ の直線は、再結晶法の影響が無かった場合を仮定して引いた線である。時効の起りやすい材料(0.07% C リムド鋼で炉中の冷却速度の速いもの)の(a)をみると、疲れのきわめて初期段階の実験点は直線の外側に出ており、再結晶法を行なわなかったものより寿命が延びている。なお寿命の約10%を越すあたりから($n_1/N + n_2/N < 1$)となり、寿命が短くなっていた。その後は繰返し数比が増しても直線からの寿命減少程度はあまり変らなかった。したがって、この場合には、マイクロクラックは疲れの初期段階で比較的発生し難く、またその伝ぱも非常におそいと考えられる。他方、時効の起り難い材料(0.12% C キルド鋼で炉中冷却速度のおそいもの)の(b)では、実験点は疲れのきわめて初期から直線の内側に存在し

直線からの寿命減少程度が大であった。すなわち疲れ過程の初期からマイクロクラックが発生しやすく、また伝ぱも著しいと考えられる。これら第10図(a),(b)の差の原因としては、前述の(1),(2)が考えられる。(2)の回復の影響は再結晶法の熱処理条件が(a),(b)それぞれ等しいことから判断して、ほぼ等しいと考えられる。他方(1)の時効の影響は(a)が大で(b)がきわめて小である⁽⁷⁾。したがって時効が(a),(b)の差の原因であると考えられる。結局、第10図の実験はマイクロクラックの発生や成長に時効が大きく影響することを示したものと考えることができる。また以上の実験から、疲れの初期段階の時効硬化が寿命に支配的な影響を持ち、またその影響を持続するものと推察される。ただし、本報では、上記の再結晶法によっても回復し得ない疲れ被害をマイクロクラックと称することにした。

これらの結果は、本報の、時効硬化を扱った第8図等の説明を支持するものと考えられる。

4.1.2 拡散の活性化エネルギーによる検討 一般に、鋼材時効の拡散の活性化エネルギーは18000~23000 cal/mol であることは周知である。筆者はかたさの測定結果から拡散の活性化エネルギーを計算した。

疲れ試験の途中のある繰返し数で試験を中止し、試験機より試験片を取りはずし、一定温度の条件下において、かたさ変化と時間との関係を調べることにする。この場合、かたさの最大値が表われるまでの時間 t と温度 T (°K) との間には次の関係が成立する⁽¹⁰⁾。

$$t^{-1} = 2D_0 x^{-2} \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 D_0 は拡散定数、 x は原子の移動距離、 ΔH は拡散の活性化エネルギー、 R は気体定数である。

(a) 0.07% C 鋼
910°C×1h 真空焼なまし
冷却速度 30~40°C/h

(b) 0.12% C キルド鋼
880°C×1h 真空焼なまし
冷却速度 5~10°C/h

第10図

一定温度 T_1, T_2 においてかたさの最大値が表われるまでの時間をそれぞれ t_1, t_2 とすると、拡散の活性化エネルギーは(5)式を変形した(6)式によって計算される。

$$\Delta H = \frac{R}{\log_{10} e} \left[\frac{\log_{10} t_1^{-1} - \log_{10} t_2^{-1}}{1/T_2 - 1/T_1} \right] \dots \dots \dots (6)$$

実験には 0.07% C 鋼の普通の焼なまし材⁽¹⁾を使用した。ひずみ計の標点距離に相当する長さ 3 mm の試験片表面を、ビッカース微小かたさ計 200 g により測定した。寿命の約 5% ならびに約 10% まで疲れ試験を続け、その後それぞれ 100°C ならびに 200°C の油そう内に試験片を移し、経過時間とかたさとの関係を調べた。その結果第 11 図が得られた。図の実験点はそれぞれ約 20 点の平均値である。第 11 図の 5% 寿命の実験結果から活性化エネルギーを計算したところ、 $\Delta H = 23\,000 \text{ cal/mol}$ であった。

したがって本報の第 3, 4 図等の疲れの初期段階でも時効が起り得るはずである。

4.2 時効硬化が起り難い材料による検討 組織ならびに応力の相違が本報第 8 図のピークの原因となるかどうかを検討した。

本報の、焼なましの冷却速度の変化による組織変化はわずかで、第 8 図等のピークの原因ではないらしいことが別報⁽³⁾ (重複荷重による強化と時効) で検討されている。また疲れ強さに及ぼす結晶粒の大きさの影響は、 α 鉄の室温中では、あまり大したことが無いとされている⁽¹¹⁾。本報では、念のため時効の起り難い材料 (キルド鋼⁽¹⁾) で焼なましの冷却速度 5~10°C/h のものである) により検討を加えた。

実験結果を第 12 図に示す。図は第 3 図等と同様な方法により、疲れ過程のループ面積の変化を測定したものである。第 7 図と同様に、縦軸をループ面積で表わし、横軸を繰返し数比で表わした。K-43 は 0.12% C キルド鋼⁽¹⁾ で応力 $\sigma_g = 30.7 \text{ kg/mm}^2$ 寿命 $N = 5.8 \times 10^4$ のものである。K-14, K-11 はいずれも 0.18% C キルド鋼⁽¹⁾ で、それぞれ $\sigma_g = 28.5 \text{ kg/mm}^2$, $N = 6.5 \times 10^4$, ならびに $\sigma_g = 26.0 \text{ kg/mm}^2$, $N = 1.3 \times 10^5$

第 11 図

の場合である。本報の第 3 図を整理して第 8 図を求めた場合と同じ方法により、第 12 図から、疲れ過程の時効硬化度を求めたのが第 13 図である。組織と応力が異なる場合の (a) ならびに応力が異なる場合の (b)、いずれも第 8 図のごときピークは認められなかった。したがって、本報第 8 図のピークの原因は、組織ならびに応力の相違によるものではなくて、時効によるものであることが確かめられた。他方、ひずみ計の疲れ試験結果から、ひずみ計は本報の実験範囲内で正確であることが、前報により、確かめられている⁽¹⁾⁽²⁾。結局、本報の特徴あるループ面積の変化が時効によるものであることが確かめられた。

5. 結 論

鋼材疲れの各段階と時効硬化との関係を調べた実験結果から、次の結論が得られた。

1) 疲れ試験中の時効硬化によりヒステリシスループ

第 12 図

第 13 図

ブの面積が減少する。そして寿命が延びる。

2) 時効の起りやすい材料では、破断までになされる内部仕事(ヒステリシスループの面積)の和が増加する。

3) 疲れの初期段階の非回復性の被害発生点付近において、時効による強化現象のピークが存在する。

4) 疲れ過程の時効による強化割合と寿命増加との関係を示す実験式が導かれた。

5) 熱処理条件により、鋼材の疲れ過程の時効を制限することがある程度可能である。

6) 運転休止時の常温時効が、疲れ過程のループ面積の変化傾向に及ぼす影響はわずかである。

以上により、疲れ試験中の時効硬化が強化現象の一因であることが判明した。終りに、本報の一部は防衛大学校において行なわれた。本研究の遂行にあたりご指導ならびにご援助をいただいた防衛大学校教授 郡利矩博士に厚く感謝申し上げます。なおご指導ならびにご援助をいただいた電気通信大学教授 田中 栄博士に厚く感謝申し上げます。また多くの先輩各位ならびに実験に協力された学生諸君にも感謝する次第である。

これらの方々のご好意によって本報が完成された。

文 献

- (1) 郡・佐々木, 機械学会論文集, 29-200 (昭 38-4), 681.
- (2) 郡・佐々木, 材料試験, 11-106 (昭 37-7), 434.
- (3) 佐々木, 本論文集, 1 515ページ; 郡・佐々木, 機械学会 第

- 38 期通 常総会 講演会前副集, No.37 (昭 36-4), 59; 機械学会第 39 期通 常総会 講演会前副集 No.62 (昭 37-4), 49.
- (4) たとえば J.C. Levy & G.M. Sinclair, *Proc. ASTM*, 55(1955), 866; N.P. Allen & P.G. Forrest, *Inter. Conf. Fatigue of Metals*, (1956-9), Session 4, Paper 1, London; P.G. Forrest, *Proc. Roy. Soc. Lond.*, Ser. A, 242 (1957), 223; 桜井・川崎, 機械学会論文集, 24-143 (昭 33-7), 532; 機械の研究, 11-5 (昭 34-5), 647; 西原・ほか 4 名, 機械学会論文集, 24-143 (昭 33-7), 445.
- (5) たとえば A.H. Cottrell, *Dislocation and Plastic Flow in Crystals*, (1953), 133, 147, Oxford; 日本金属学会編, 幸田・鈴木, 転位論の金属学への応用, (昭 32), 103, 丸善.
- (6) たとえば T.S. Kê, *Phys. Rev.*, 71 (1947), 553; *Trans. AIME*, 176 (1948), 448; C. Zener, *Phys. Rev.*, 74 (1948), 639; C. Wert & C. Zener, *Phys. Rev.*, 76 (1949), 1169; C. Wert, *Acta Metallurgica*, 2 (1954), 361; W. Köster u.L. Banger, *Acta Metallurgica*, 3(1955), 274; F. Garofalo & G.V. Smith, *Trans. ASM.*, 47 (1955), 958; K. Kamber & others, *Acta Metallurgica*, 9 (1961), 403; 高橋, 金属学会誌, 16-3 (昭 27-3), A-59; 市山・ほか 3 名, 金属学会誌, 23-12 (昭 34-12), 717; 阿部・井形, 応用金属物理学実験法, (昭 36), 198, コロナ社.
- (7) たとえば W.C. Leslie & R.L. Rickett, *J. Metals*, 5 (1953), 1021; B.E. Hopkins & H.R. Tipler, *J. Iron & Steel Inst.*, 177 (1954), 110; W.C. Leslie, & others, *Trans AIME*, 218 (1960), 699; J.F. Butler, *Trans. AIME*, 224 (1962), 89; 桜井・ほか 2 名, 機械学会論文集, 23-131 (昭32-7), 489,
- (8) たとえば石崎, 金属学会誌, 25-6 (昭 36-6), A-167.
- (9) G.M. Sinclair & T.J. Dolan, *Proc. 1st U.S. Nat. Congr. Appl. Mech.*, (1952), 647.
- (10) F.R.N. Nabarro, *Rep. of Conf. on Strength of Solid* (1948), 38, London.
- (11) たとえば H. Hendus u.G. Krause, *Z. Metall-kde.*, 46 (1955), 716; 横堀・材料強度学 (昭 30), 210, 技報堂; 横堀・前川, 機械学会第 38 期通 常総会 講演会前副集, No.37 (昭 36-4), 21.

昭和37年度の機械金属輸出検査実績

日本機械金属検査協会では、このほど昭和 37 年度の機械金属関係輸出検査実績の詳細をまとめた。

大要つぎのとおり。

1. 輸出の状況=げんざい同協会において機械金属関係として取扱っている指定貨物は、大分類で 9 品目、中分類で 59 品目の多品種にわたっている。

昭和 37 年度におけるこれら指定貨物の輸出数量は前年に比べ 2 割かた増加している。

輸出増の著しかったものは金属加工機械 87% 増、手編機械 50% 増、ねじ類 33% 増となっている。その他の品目にも幾らか増加しているものがあるが、一部犬くぎ、繊維機械用品など、はなはだしく減少しているものもある。

こんごの輸出の傾向としては消費物資から生産設備、あるいは建設関係の機械類へ、部品から完成品へ移行しつつある。

2. 検査の状況=37 年度の輸出検査ロット数は 24 万 6 556 件で、このうち不合格となったものは 8 674 件、不合格率 3.5% となっている。

個々の品目について不合格率を前年度と対照してみると、増減はあるが全体では前年度も 3.5% で品質程度は横ばいとなっている。

検査ロット数は前年度に比べ 2 割増加しているが、不合格ロットも増加している。このうち、金属加工機械 8.9%、繊維機械用品 7.2% の不合格率が大い。

(服部 敏夫)