炭素鋼の高温および室温における疲労強度に 及ぼす表面あらさの影響*

安 藤 善 司** 土 田 幸 滋*** 中 野 典 彦**

The Influence of Surface Roughness on the Fatigue Strength of Carbon Steel at Elevated and Room Temperatures

by

Zenji ANDO

(Faculty of Engineering, Gifu University, Kagamigahara)

Kōji TSUCHIDA

(Faculty of Technology, Tokyo Metropolitan University, Tokyo)

and Norihiko NAKANO

(Faculty of Engineering, Gifu University, Kagamigahara)

The rotating bending and push-pull fatigue tests were carried out on 0.29 % carbon steel specimens with four kinds of surface roughness at room temperature, 250°C and 350°C, where the strain aging is most remarkable.

The results obtained are as follows :

(1) At room temperature, the fatigue strength decreases as the degree of the surface roughness increases.

(2) At 250°C and 350°C, it is not possible to find any general tendency for the relation between the surface roughness and the fatigue strength, because of the scatter of fatigue strength data, the difference in stress level between the rotating bending and push-pull, the change in surface roughness caused by the formation of oxide scale, the change of hardness by repeated stress and so on.

(3) At 250°C and 350°C, in spite of the difference in surface roughness, the S-N curves can be divided remarkably into two groups, one for the mechanically finished specimens and the other for the specimens annealed in vacuum after mechanical finishing.

(Received Mar. 30, 1974)

1 緒 言

機械部品の表面仕上は、一般に、切削、研削あるいはたく摩などの機械的な方法で行なわれる。このような仕上げ加工は表面あらさをはじめとして、加工硬化あるいは残留応力などにより、疲労強度に影響を及ぼすことが広く知られている。筆者らの一人は先に、0.09% C, 0.29% C および 0.51% C 炭素鋼について、それぞれ 4 種類のあらさに機械仕上げした試験片、および機械仕上げ後低温真空焼なましした試験片を用いて、回転曲げ疲労試験を行ない、0.29% C 炭素鋼の場合に、疲労強度に及ぼす表面あらさの影響が最も大き

いという結果を得た。¹⁾ なお、先の研究は室温で疲労試験を行なったが、従来のこの分野の研究も室温の場合がほとんどである。²⁾

しかし、高温ではひずみ時効による複雑な現象の生じることも考えられるが、このことをも考慮した研究はほとんどなされていない。そこで本研究は、高温および室温において、表面あらさとそのあらさの製作に伴う加工変質層が疲労強度に及ぼす影響を調べるため、次のような研究を行なった。すなわち、室温において表面あらさが回転曲げ疲労強度に及ぼす影響の最も大きい 0.29% C 炭素鋼を用いて、ひずみ時効の最も著しい 350°C、および 350°C と室温との中間の温度として 250°C を選び、4 種類のあらさの試験片について回転曲げ疲労試験を行なった。また、試験片表面部の加工

* 原稿受理 昭和49年 3 月30日

** 正 会 員 岐阜大学工学部 各務原市那加門前町

*** 学生会員 東京都立大学大学院 東京都世田谷区深沢

硬化と残留応力, および残留応力の疲労過程に伴う変化を調べた。これと同様な実験を室温, 250℃ および 350℃ において, 引張圧縮についても行ない, これらの結果に室温における回転曲げ疲労試験結果を加えて比較検討した。

2 試験片および実験方法

供試材は0.29% C 炭素鋼で, その化学成分および機械的性質を Table I に示す。素材を Table II に示す最終加工条件により, エメリー紙あるいはノーズ半径 1mm の剣バイトを用い, 1S, 3S, 7S および 12S の4種類の表面あらさで, Fig. 1 の形状寸法に仕上げた。ここで各あらさは, それぞれ所定の範囲のあらさを代表するものである。表面のあらさは触針式仕上面検査器で測定し, 所定のあらさ範囲以外のものは除外した。試験片の約半数は加工に伴う残留応力をできるだけ除去するため, 650℃ で1時間の低温真空焼なましを行なった。以下, 機械仕上のままの試験片を非焼なまし材, 機械仕上げ後低温真空焼なました試験片を焼なまし材と呼ぶこととする。使用した試験機は小野式回転曲げ疲労試験機 (3 200 rpm) および共振型 1-ton 引張圧縮疲労試験機 (1 800 rpm) である。

Table I. Chemical composition and mechanical properties of the material.

C	Si	Mn	P	S	Cu	N
0.29	0.31	0.69	0.011	0.019	0.19	0.011
Upper yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Breaking stress on final area (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)		
42.6	58.9	107.7	28	60		

Table II. Finishing condition.

Roughness	Range of roughness	Finishing condition
1S	0.5~1.3μ	Polished with #120, #240 and #320 emery paper (Depth of cut) (Feed)
3	2~4	0.05 mm 0.01 mm/rev.
7	5~9	0.05 0.09
12	9~15	0.05 0.18

Fig. 1. Specimens for fatigue test.

試験片の表面より電解研磨で逐次薄層を除去し, 微小かたさ計で各深さのかたさを測定した。測定荷重は表面あらさ 12S についてもかたさ測定ができるように 500 g とした。かたさは各深さにおいて10点の平均値で示した。加工層の残留応力は電解研磨で逐次薄層を除去し, 軸方向の残留応力を平行ビーム型X線回折装置で計数管法により測定した。その測定条件は, 特性X線 Cr-Kα 線, 管電圧 28 KV, 管電流 10 mA, 時定数 20 sec., ピーク位置決定は半幅幅法とし, $\sin^2\psi$ 法で残留応力を求めた。

3 実験結果および考察

3.1 回転曲げ疲労試験

3.1.1 かたさ分布 非焼なまし材および焼なまし材の表面付近のかたさの測定結果を Fig. 2 に示す。加工硬化層は表面あらさの大きいものほど増大する。また, 焼なましにより表面の加工硬化はほぼ半減するが, 加工硬化層の深さはあまり変わらず, 約 10~50μ である。

Fig. 2. Hardness distributions of specimens (rotating bending).

3.1.2 残留応力の分布 残留応力の測定結果を Fig. 3 に示す。非焼なまし材の場合, エメリー紙仕上げた 1S は, 旋削仕上げた 3S, 7S および 12S より大きな圧縮残留応力を生じている。これらの残留応力は焼なましによりほぼ消滅する。

3.1.3 温度と疲労強度の関係 Fig. 4 はあらさ 1S の非焼なまし材を用いて, 室温より 450℃ までの温度において回転曲げ疲労試験を行なった結果である。後述するが, 高温の場合にはかなりのばらつきを生じている。Fig. 4 を温度と時間強度について整理すると Fig. 5 のようになり, どの時間強度についてもよく一致した傾向を示す。ほぼ 350℃ 付近で疲労強度が最大となり, ひずみ時効は 350℃ で最も著しく, 250℃ ではそれよりやや劣る。

Fig. 3. Distributions of residual stress of specimens (rotating bending).

Fig. 4. S-N curves at various temperatures (rotating bending).

Fig. 5. Relation between fatigue strength and temperature (rotating bending).

3・1・4 室温、250°C および 350°C における疲労試験 室温における疲労試験結果を Fig. 6 に示す。非焼なまし材、焼なまし材ともにあらさのほど疲労強度が低下し、そのあらさによる疲労限度の差は非焼なまし材と焼なまし材においてほぼ同じである。

Fig. 7(a) に 1S の試験片の室温での疲労過程に伴う残留応力の変化を示す。10³~10⁷ 回および疲労試験前 (10⁰ 回にプロットする) の残留応力はほぼ直線上にのっており、指数関数的に減少し、その減少割合は繰返し応力が高いほど大きい。Fig. 7(b) は 7S の非焼なまし材の場合である。エメリー紙仕上げした 1S とほぼ同じ傾向を示す。Fig. 7 にみられるように、非焼な

Fig. 6. S-N curves at room temperature (rotating bending).

Fig. 7. Change of residual stress during fatigue test (rotating bending).

まし材の圧縮残留応力は、応力繰返しとともに指数関数的に減少する。しかし、疲労限度付近の応力で繰返しした場合の圧縮残留応力はほとんど変わらないが、1S と 7S ではその絶対値に差があり、1S の方が疲労限度の上昇に寄与しているはずである。一方、加工硬化層はあらさのほど大きく、それに比例して疲労限度を上昇させるはずである。この両者はあらさによる疲労限度の差を打ち消し合う方向にある。また、焼なまし材では、残留応力と加工硬化がほぼ消滅している。したがって、室温において両材であらさによる疲労限度の低下の程度がほぼ等しいのは、非焼なまし材において上述の二つの効果が相殺し、あらさの切欠き作用だけが効果的であったと考えられる。

250°C における試験結果を Fig. 8 に示す。非焼な

Fig. 8. S-N curves at 250°C (rotating bending).

し材と焼なまし材では、はっきり2群に分かれ、それぞれあらいものほど疲労強度が低下する。非焼なまし材の1Sと2Sの疲労限度の差は 6.0 kg/mm^2 、焼なまし材のそれは 1.0 kg/mm^2 である。焼なまし材の方があらさ、すなわち、切欠きによる疲労限度の低下が少ないのは、焼なましにより切欠き感度が低下しているためと考えられる。また、焼なましにより疲労限度が $6.5 \sim 11.5 \text{ kg/mm}^2$ 低下するのは、加工の際に生じた転位が焼なましによって減少し、ひずみ時効による強化作用が減少したためと考えられる。

350℃における試験結果をFig. 9に示す。かなりのばらつきがあるが、高応力においては非焼なまし材、焼なまし材ともに、ほぼあらいものほど疲労強度が低下する。疲労限度付近では両材ともにわずかではあるが、あらいものほど疲労強度が増加している。長時間高温にさらされる疲労限度に近い応力では酸化スケールの発生により、表面あらさの差の減少が観察され、そのために疲労限度の差がなくなったと考えられる。また、両材とも250℃の場合と同様にはっきりと2群に分かれ、焼なましによる疲労限度の低下は $8.5 \sim 9.5 \text{ kg/mm}^2$ である。

Fig. 9. S-N curves at 350°C (rotating bending).

この材料の350℃における疲労強度のばらつきを調べるために、1Sの非焼なまし材を用いて、室温では応力 30 kg/mm^2 (応力過大率1.7%)、350℃では応力 44 kg/mm^2 (応力過大率8.6%)で5本³⁾の試験片を用いて回転曲げ疲労試験を行なった結果によると、350℃では室温に比べてばらつきが非常に大きい。これは1Sが0.5~1.3Sの範囲のあらさを代表するために、あらさのばらつきと、表面あらさの製作に伴うきわめて微かな加工の程度の差が、ひずみ時効の最も著しい350℃では、疲労強度に敏感に影響するためであると考えられる。

250℃では350℃ほどひずみ時効の影響が著しくなく、疲労強度のばらつきおよび繰返し応力による硬化の程度が異なるため、250℃と350℃においてあらさと疲労

強度の関係の傾向が一致しないものと考えられる。

3・2 引張圧縮疲労試験

3・2・1 かたさ分布および残留応力 表面のかたさおよび加工硬化層の深さは回転曲げの場合とほぼ同じである。しかし、3S、7Sおよび12Sの残留応力は回転曲げの場合とやや異なる³⁾。これはFig. 1に示すように試験片の形状寸法の相違による剛性の差に原因すると考えられる。

3・2・2 室温、250℃および350℃における疲労試験 1Sの非焼なまし材における温度と疲労強度の関係は、Fig. 5の回転曲げの場合と全く一致した傾向を示した。室温での試験結果をFig. 10に示す。疲労限度は回転曲げのそれより $4 \sim 5 \text{ kg/mm}^2$ 低いが、あらさと疲労強度の関係は回転曲げの場合とほぼ同じで、あらいものほど疲労強度が低下する。

Fig. 10. S-N curves at room temperature (push pull).

250℃における試験結果をFig. 11に示す。非焼なまし材と焼なまし材では、はっきり2群に分かれ、それぞれ1Sの疲労強度が最も大きく、3S、7Sおよび12Sではあらさと疲労強度の相関がみられない。疲労限度は回転曲げの場合より $8.5 \sim 12.5 \text{ kg/mm}^2$ 低い。また、焼なましによって疲労限度は $7.5 \sim 8.0 \text{ kg/mm}^2$ 低下する。

350℃における試験結果をFig. 12に示す。非焼なまし材ではあらいものほど著しく疲労強度が低下するが、焼なまし材ではあらさと疲労強度の相関があまりみられない。このように非焼なまし材では回転曲げの場合と非常に異なった傾向を示すのは、350℃の引張圧縮では回転曲げより繰返し応力が $6.5 \sim 17.5 \text{ kg/mm}^2$

Fig. 11. S-N curves at 250°C (push pull).

Fig. 12. S-N curves at 350°C (push pull).

低いため、表面あらさが酸化スケールとして脱落することが少なく、かつ、350°Cでは非焼なまし材のひずみ時効の影響が著しいために、表面あらさによる切欠き作用が増加することが原因と考えられる。

3.3 表面あらさの影響

Fig. 13(a)は回転曲げ疲労試験結果より、1Sの試験片の疲労限度を基準とした各あらさの試験片の疲労限度の低下率を示す。ここで、 σ_{1S} は1Sの試験片の疲労限度、 σ_s は他のあらさの試験片の疲労限度を示す。室温の場合、あらさによる疲労限度の低下率は非焼なまし材と焼なまし材では、ほぼ同じであるが、250°Cおよび350°Cの場合はかなりの差を生じる。Fig. 13(b)の引張圧縮の場合も全く同様の傾向を示す。

Fig. 13. Reduction of the fatigue limit caused by surface roughness.

このように室温では両材であらさによる疲労限度の低下率がほぼ同じになるのは、あらさによる切欠き作用が疲労限度に最も大きく影響するためである。他方、250°Cおよび350°Cでは、応力レベルによっては酸化スケールが発生してあらさの影響が減少する反面、ひずみ時効による強化の影響が著しく、かつ、ばらつきを有するため、上述のような複雑な結果が生じたと考え

られる。

3.4 焼なましの影響

Fig. 14(a)は、回転曲げ疲労試験における焼なましによる疲労限度の低下率を示す。ここで、 σ_M および σ_A はそれぞれ非焼なまし材および焼なまし材の疲労限度を示す。室温では5~10%、250°Cおよび350°Cでは約20%である。Fig. 14(b)は引張圧縮の場合であり、室温では回転曲げの場合とほぼ同じであるが、高温ではかなり異なった傾向を示し、250°Cでは30~35%、350°Cでは2~30%低下する。このように250°Cおよび350°Cで回転曲げと引張圧縮の低下率が異なるのは、回転曲げに比べて引張圧縮の場合は応力レベルが低いために酸化スケールの発生が少なく、あらさによる切欠き作用の影響が大きいと考えられる。

Fig. 14. Reduction of the fatigue limit caused by annealing.

4 結 言

0.29%C炭素鋼を用いて、4種類のあらさの試験片について、室温、250°Cおよび350°Cで、回転曲げおよび引張圧縮疲労試験を行ない、あらさとその製作に伴う加工変質層の疲労強度に及ぼす影響を調べた結果、次の結論を得た。

- (1) 室温では、あらさの多いほど疲労強度が低下し、あらさによる切欠き作用の影響が大きい。
- (2) 250°Cおよび350°Cでは、ひずみ時効および表面あらさによる疲労強度のばらつき、回転曲げと引張圧縮の応力レベルの差、酸化スケールによるあらさの変化、繰返し応力によるかたさの変化などにより、あらさと疲労強度の関係に一定した傾向がみられない。
- (3) 非焼なまし材と焼なまし材のS-N曲線は250°Cと350°Cとでは、はっきりと2群に分かれる。

終わりに、本研究についてご討論いただいた東京都立工科短期大学 川田雄一学長ならびに東京都立大学 宮川松男教授、児玉昭太郎助教授に感謝の意を表します。

(昭和48年11月21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) 横山信三, 中野典彦, 木村陽次, 岐阜大学工学部研究報告, No.18, 54 (1968).
- 2) たとえば, 河本 実, 西岡邦夫, 乾 宰人, 土谷富士雄, 材料試験, **4**, 42 (1955); 渡辺十郎, 荒木田豊, 日本機械学会論文集, **29**, 696 (1963); 竹内勝治, 材料, **16**, 144 (1967).
- 3) 安藤善司, 土田幸滋, 中野典彦, 材料学会, シンポジウム 疲労における最近の諸問題, p.48 (1973).
- 4) 安藤善司, 加藤容三, 清水達三, 三芳功達, 日本機械学会論文集, **26**, 86 (1960).