Ni-Cr 鋼の疲労強度に及ぼす焼戻しぜい性の影響 (面外曲げ疲労の場合)

芳 賀 武* 野 口 徹**

J. Japan Inst. Metals, Vol. 52, No. 8 (1988), pp. 755-761

Effect of Temper Brittleness on Fatigue Strength of Ni-Cr Steel
(in the case of Ex-plane Bending Fatigue)

Takeshi Haga* and Tōru Noguchi**

The bending fatigue test was performed on Ni-Cr steel specimens tempered in the temper brittleness temperature region. First, the $S-N$ curve, fatigue limit, and crack growth rate were compared with those of the normally tempered material. Secondly, the fracture surfaces were investigated by means of electron microscopy and X-ray microanalysis.

The results were as follows:

(1) No significant decrease was observed in the fatigue limit, except for the specimen tempered at 773 K which was about 25% lower in the value than the normally tempered one.

(2) Quasi-cleavage fracture as well as the fatigue striation-like markings in the specimens tempered at 623 and 773 K was observed by SEM and TEM fractography. No quasi-cleavage fractures were observed either in the as-quenched specimen or the normally tempered specimen.

(3) EPMA line analysis showed some concentration of Cr on the fatigue fracture surfaces of the temper brittleness specimens.

(4) The difference in the effect of the temper brittleness on the crack propagation was observed in the 10^4 fatigue strength region, while no clear difference was obtained in the fatigue limit region.

(Received August 21, 1987)

Keywords: nickel-chromium steel, temper brittleness, ex-plane bending test, fatigue strength, fractography, chromium distribution

I. 緒 言

焼入れ鋼をある温度範囲で焼戻した場合、衝撃強度が著しく低下するぜい性領域が存在する。この焼戻しぜい性と金属組織との関連についてはすでに多くの研究⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾がある。しかし焼戻しぜい性と疲労強度、破面の様相および疲労き裂の進展速度等⁽¹⁰⁾⁻⁽¹³⁾との関連性の研究は少ない。

筆者の一人は以前⁽¹⁴⁾ Ni-Cr 鋼材について、焼戻しの際の加熱保持時間と衝撃吸収エネルギーとの関連性について実験し、Fig. 1 に示すような結果を得た。すなわち焼戻し温度が 623 K および 773 K 付近において、衝撃吸収エネルギーが焼戻し時間の増加とともに低下し、また時間 2.4 ks 付近で吸収エネルギーの大きく変動する遷移領域があることを見出した。

本研究ではこの遷移領域で焼戻した材料を用いて、焼戻

しが疲労特性に及ぼす影響について検討した。ここではまず疲労進行過程の観察が容易な U 型切欠き材を用いて、面外曲げ疲労試験を行い、疲労強度を比較するとともに、疲労進行過程での破面をフラクトグラフィにより考察し、破面の元素分析を行った。また表面き裂進展速度に対する焼戻し温度の影響について考察した。

II. 試料および実験方法

試料の化学成分を Table 1 に示した。熱処理条件は Table 2 に示す 6 種類で、それぞれ A 材から F 材と呼ぶ。このうち B, C, D 材は低温焼戻し⁽¹⁵⁾、E 材と F 材は高温焼戻し⁽¹⁶⁾である。疲労試験はシェンク型の面外曲げとし、繰返し速度は 60 Hz とした。試験片は Fig. 2 に示した U 型切欠き材で、表面はき裂観察のためバフ研磨を施した。

また疲労試験を途中で中断して衝撃破断させ、破面観察

* 長野工業高等専門学校機械工学科(Nagano National College of Technology, Nagano)

** 北海道大学工学部機械工学第二学科(Faculty of Engineering, Hokkaido University, Sapporo)

Fig.1 Relation between the impact energy and tempering time. All materials were heated at 1123 K for 1.8 ks and quenched in oil.

Table 1 Chemical compositions (mass%).

C	Si	Mn	Ni	Cr	P	S
0.28	0.26	0.50	2.72	0.75	0.026	0.021

を行った。中断繰返し数 N は疲労寿命 N_f の 10, 30, 50 および 75% とした。衝撃後の破面では疲労部分を明瞭に区別することができるので、表面に現れた疲労部分の長さをき裂長さと定義した。

Table 2 Heat treatment of specimens.

Mark of Specimen	Heat Treatment Methods
A	As Quenched (1123K-1.8 ks Oil Quenched)
B	Tempered of 2.4ks at 523K (1123K-1.8 ks, Oil Quenched) (523K-2.4 ks Oil Quenched)
C	Tempered of 2.4ks at 623K (1123K-1.8 ks, Oil Quenched) (623K-2.4 ks Oil Quenched)
D	Tempered of 2.4ks at 673K (1123K-1.8 ks, Oil Quenched) (673K-2.4 ks Oil Quenched)
E	Tempered of 2.4 ks at 773K (1123K-1.8 ks, Oil Quenched) (773K-2.4 ks Oil Quenched)
F	Tempered of 2.4ks at 873K (1123K-1.8 ks, Oil Quenched) (873K-2.4 ks Oil Quenched)

Fig.2 Profile and dimensions (mm) of fatigue test specimen.

Fig.3は切欠き底付近の応力分布および破面模様の模式図である。同図(a)に示す曲げ応力分布は20倍の寸法の試験片表面に貼付した計23枚のストレインゲージにより実測したひずみから算定したものである。

試験中の負荷応力はトルク棒にストレインゲージを貼り、

Fig.3 Schematic stress distribution and the fracture surface.

あらかじめ静的荷重で校正したトルク-ひずみ関係から換算した。同図(b)に示す表面上のき裂長さ l_x は 1/1000 mm の自動読み取り式工具顕微鏡を用いて測定した。

Ⅲ. 実験結果および考察

1. S-N 曲線

Fig.4 は疲労試験で得られた S-N 曲線である。ここで 10^7 回繰返しで破断しなかった最大応力を疲労限度 σ_w とする。 σ_w は同図(a)の A 材(1123 K-1.8 ks(30 min)焼入れ)で 363 MPa, 低温焼戻しの B 材(523 K 焼戻し), C 材(623 K 焼戻し), D 材(673 K 焼戻し)では 348 MPa, 333 MPa および 377 MPa であり, ほとんど変化がない。E 材(773 K 焼戻し)と F 材(873 K 焼戻し)はいずれも高温焼戻しであるが, F 材の σ_w は 392 MPa で, A, B, C 材と大きな違いはない。これに対して E 材では $\sigma_w = 294$ MPa で, 他に比べて低い値である。通常の焼戻し材に相当する F 材を基準に考えるならば B, C, D 材では疲労限度が 11%, 15% および 3% 低下した。これに対し E 材の低下量は 98 MPa, 25% におよび, 焼入れのみの A 材に比べても 69 MPa, 19% の低下である。

一方, 時間強度については, $N = 5 \times 10^4$ 付近で比べた

場合, E 材は F 材より約 40% 低い。焼入れのみの A 材と比べてもなお約 15% 低い値である。他の B, C, D 材ではいずれも S-N 曲線の傾きが F 材よりも緩やかであるけれども, その差は E 材ほど顕著ではない。すなわち疲労限度および時間強度の低下は E 材に最も明瞭に現れており, 焼戻しぜい性の影響によるものである可能性がある。

Weiss⁽¹⁷⁾は疲労におよぼす焼戻しぜい性の影響を回転曲げ疲労によって実験したが, その結果によれば, 焼戻しぜい性はき裂の伝播速度に影響をおよぼし, S-N 曲線の傾きを急にすけれども, 疲労限度には影響しないと結論している。本実験の結果では, C 材と D 材は Fig.1 の衝撃試験結果から明らかに焼戻しぜい性と判定されるのに, 疲労限度にはその影響が小さい。E 材ほどではないが, C 材にも強度低下が現れている。一方 773 K 焼戻しの E 材は, Fig.1 では焼戻しぜい性とは判定できないけれども疲労限度の低下が見られ, また S-N 曲線の傾きはむしろ緩やかになって, 10^4 回時間強度域にも強度低下が現れている。

2. 破面の顕微鏡観察と X 線分析

疲労の進行状況を破面観察によって考察するため, 疲労試験を中断し, 衝撃破断させた。破面の模式図を Fig.3(b)に示した。破面は切欠き底両端の明瞭な疲労破面部(FM), 中央部の三日月型破面部(CM)およびシャリップ(SM)の 3 つに分けることができる。

Fig.5 は A 材(焼入れのみの)の $N/N_f = 0.5$ での疲労中断破面である。FM 中には角部より放射状に疲労の進展模様が観察される。同図(b)は FM と CM および SM の境界である。FM 中にはストライエーション状模様が観察され, CM ではくもの巣状のディンプル⁽¹⁴⁾が, また SM では比較的大きさの整った通常のディンプル(I 型と II 型⁽¹⁸⁾の中間ディンプル)が観察される。

E 材の破面を Fig.6 に示した。E 材の FM 中にはストライエーション状模様に混じって擬へき開破面⁽¹⁹⁾が観察される。また FM と CM および SM の境界部にストレッチゾーンがある。透過型電子顕微鏡による観察(Fig.7)で, これらの擬へき開破面およびストレッチゾーンがさらに明瞭に識別される。

Fig.8 は C 材である。同図(a)は FM と SM の境界部にストレッチゾーンがない。同図(b)は FM で, E 材と同じくストライエーション状模様にまじって擬へき開破面が観察される。B 材と D 材にも同様の擬へき開破面が観察されたが, E 材と C 材に比べて明瞭ではなかった。

Fig.9 は F 材で, FM にはストライエーション状模様のみで, 擬へき開破面は観察されない。また C 材と同様 FM と CM の境界部にストレッチゾーンはなく, 通常のディンプル破面のみである。

つぎにこれらの破面について, X 線マイクロアナライザ(XMA)による分析(K_α 線プロファイルの半定量分析)を

Fig.4 S-N curves of specimens.

(a) As-quenched and tempered at 523 K, 623 K.
(b) Tempered at 673 K, 773 K and 873 K.

Fig.5 SEM fractographs, 50% of fatigue life (N_f).
 (Specimen A, $\sigma = 980 \text{ MPa}$, $N = 5.55 \times 10^3$).

Fig.6 SEM fractographs, 50% of fatigue life (N_f).
 (Specimen E, $\sigma = 627 \text{ MPa}$, $N = 1.14 \times 10^4$).

Fig.7 TEM fractographs, 50% of fatigue life (N_f).
(Specimen E, $\sigma = 627$ MPa, $N = 1.14 \times 10^4$).

Fig.8 SEM fractographs, 50% of fatigue life (N_f).
(Specimen C, $\sigma = 598$ MPa, $N = 2.26 \times 10^4$).

Fig.9 SEM fractographs, 50% of fatigue life (N_f).
(Specimen F, $\sigma = 461$ MPa, $N = 4.07 \times 10^4$).

行った。特に E 材の FM 中の擬へき開破面に着目し、長さ約 700 μm にわたって分析した。Fig.10 はその結果の 1 例で、Ni および Cr の濃度変化である。同図(a)から(d) がそれぞれ A, C, E および F 材である。いずれの材料においても Ni の濃度は変動が少なく、ほぼ均一である。しかし Cr については E 材と C 材において大きな変動が認められる。Cr 濃度の変動が、偏析によるものか、粒界での富化、あるいは Cr 炭化物の析出等によるものかの判断はできないが、Ni-Cr 鋼材は熱処理によって可逆的に靱性またはぜい性的となり、これに炭化物の Cr 濃度が関与することが知られている⁽²⁰⁾。

疲労限度および 10^4 回時間強度に差が現れた E 材およ

Fig.10 Results of the EPMA line analysis.
(a) Specimen A, $\sigma = 980 \text{ MPa}$, $N = 5.55 \times 10^3$.
(b) Specimen C, $\sigma = 598 \text{ MPa}$, $N = 2.26 \times 10^4$.
(c) Specimen E, $\sigma = 627 \text{ MPa}$, $N = 1.14 \times 10^4$.
(d) Specimen F, $\sigma = 461 \text{ MPa}$, $N = 4.07 \times 10^4$.

び C 材の擬へき開破面部分に Cr の変動が見られたことは、これら疲労強度および破面の特徴が焼戻しぜい性と何らかの関連を持つことを示唆するものである。

3. き裂進展速度

疲労破面 FM は試験片の両端から発生し、伝播する。寿命の約 10% ($N/N_f = 0.1$) でこのようなき裂の発生が認められた。 $N/N_f = 0.3$ 以上でき裂は伝播し、 N の増加にともなって両端からのき裂が結合した後、急速に破断に至る。

本実験では衝撃破断後の疲労模様から工具顕微鏡により疲労き裂の深さ l_x (Fig.3(b)) を測定してき裂長さとし、き裂進展状況と焼戻しとの関連性を考察した。一般にき裂進展特性はき裂進展速度 $dl/dN = C \Delta K^m$ によって評価される。ここでは面外曲げ方式であり、正確な σ 値および K 値を求めることが困難である。そこで試験機の方のトルク棒にストレングージを貼り、あらかじめ静的荷重で校正した値から σ_f を求めた。これによって $\sigma_f \sqrt{\pi l_x}$ を便宜的な応力拡大係数 K の指標として用いることとした。寿命の 10%, 30%, 50% および 75% の繰返し数での応力を σ_n として、き裂進展速度を $dl_x/dN \propto (\sigma_n \sqrt{\pi l_x})^m$ の形で整理した。その結果を Fig.11 に示す。同図(a)は A, B, および C 材、同図(b)は D, E および F 材である。 10^5 回疲労強度の場合、A 材から F 材までいずれも測定点はほぼ同一直線上にあり、 $m = 4.8$ である。E 材と C 材にも特に変化は認められない。Paris⁽²¹⁾ によれば、 m は約 4、また板材の曲げ疲労⁽²²⁾⁽²³⁾ では $m = 3.5 \sim 5.6$ とされており、本実験の結果もこの範囲内にある。 10^4 回疲労強

Fig.11 Relation between the crack propagation rate and the stress intensity factor parameter.
(a) As-quenched and tempered at 523 K and 623 K.
(b) Tempered at 673 K, 773 K and 873 K.

度では、F 材に比べて E 材と C 材はばらつきが大きく、直線が上方に移動し、また m の値は $m = 1.7 \sim 2.4$ となった。E 材と C 材では $S-N$ 曲線は傾きが、通常焼戻しの F 材に比べて小さかったが、 10^4 回疲労強度域で m 値が小さいことはこの傾向と一致する。疲労破面中に擬へき開破面が観察されたにもかかわらず、き裂進展速度がむしろ遅くなっている。理由については直ちには理解し難いが、E 材と C 材における他の特性とともに 10^4 回疲労強度域における焼戻しぜい性の影響の 1 つの現れと考える。

IV. 結 言

Ni-Cr 鋼(SNC2)を焼入れし、種々の温度で焼戻し処理を施した材料を用いて、焼戻しが疲労特性に及ぼす影響について実験的に研究した。シェンク型の面外曲げ疲労を行って $S-N$ 曲線を得、疲労破断後および疲労試験を中断した途中の破面についてフラクトグラフィと XMA による線分析を行った。また疲労進行途中のき裂進展速度を求めた。

結果はつぎのように要約される。

(1) 疲労限度に関しては、773 K 焼戻しの E 材が、873 K の通常焼戻し材(F 材)より 25% 低い値を示した。623 K 焼戻しの C 材と 673 K 焼戻しの D 材は衝撃結果では明らかに焼戻しぜい性と判定されるのに、疲労限度ではその影響が現れなかった。

(2) 時間強度については、 $N = 5 \times 10^4$ 付近で比べた場合、E 材は F 材より約 40% 低い値を示した。他の B, C, D 材ではいずれも $S-N$ 曲線の傾きが F 材より緩やかであるが、その差は E 材ほど顕著ではなかった。 10^4 回時間強度にも E 材と C 材に強度低下が現れた。

(3) SEM および TEM 破面では、1123 K 焼入れのみの A 材と 873 K 焼戻しの F 材の破面ではストライエーション状模様のみが観察されたのに対し 773 K 焼戻しの E 材および 623 K 焼戻しの C 材ではストライエーション状模様に加えて擬へき開破面が観察された。

(4) X 線分析において、焼戻しをした E 材と C 材は A 材および F 材と比べて Cr の変動が大きかった。

(5) 表面き裂進展速度 dl_x/dN と応力拡大係数の指標 $\sigma_n \sqrt{\pi l_x}$ との関係において、 10^4 回疲労強度の場合、E 材と C 材は他の材料と比べてばらつきが大きく、直線が上方へ移行し、また m の値が小さく $m = 1.7 \sim 2.4$ となっ

た。しかし 10^5 回疲労強度域ではこのような明瞭な差は見られなかった。

以上総合するならば、種々の焼戻し温度域から焼戻した材料において、773 K 焼戻しの E 材および 623 K 焼戻しの C 材以外では衝撃吸収エネルギーの低下、擬へき開破面の存在等にもかかわらず、疲労強度への影響は明瞭ではない。しかし E 材における疲労限度の明らかな低下および E 材と C 材における 10^4 回時間強度の低下ならびにき裂進展速度の低下は、焼戻しぜい性の 1 つの効果とみなすことができた。

文 献

- (1) 河井泰治, 小川楠雄: 鉄と鋼, 37(1951), 153.
- (2) 今井勇之進, 佐藤 剛: 日本金属学会会報, 8(1963), 186.
- (3) J.M.Copus: ASTM STP NO.407(1968), 3.
- (4) C.J.McMahon, Jr: ASTM STP NO.407(1968), 127.
- (5) 三村 宏: 鉄と鋼, 57(1971), 2273.
- (6) 鈴木洋夫, 西村 哲, 山口重宏: 鉄と鋼, 65(1979), 2038.
- (7) 須藤 一: 鉄と鋼, 67(1981), 696.
- (8) 鈴木洋夫, 西村 哲, 今井 淳, 中村 泰: 鉄と鋼, 67(1981), 1180.
- (9) 藤井利光: 日本金属学会会報, 22(1980), 109.
- (10) 小林英男, 藤田健太郎, 小峰厚友, 中沢 一: 材料, 29(1980), 580.
- (11) 橋内良雄: 材料, 29(1980), 795.
- (12) 浅見 敏, 杉山好弘, 寺沢正男, 那須信義: 材料, 32(1983), 64.
- (13) 村上理一, 秋園幸一: 材料, 33(1984), 895.
- (14) 芳賀 武: 長野工専紀要, 11(1980), 29.
- (15) 日本金属学会編: 門間改三, 金属便覧, 丸善, (1978), 764.
- (16) 日本金属学会編: 門間改三, 金属便覧, 丸善, (1978), 750.
- (17) B.W.Weiss, S.Niedzwiedz and M.Breuer: J. Iron Steel Inst., 204(1966), 152.
- (18) 北川英夫, 小寺沢良一: フラクトグラフィ, 破壊力学と材料強度講座 15, 木原 博 監修, 培風館, (1978), 52.
- (19) 北川英夫, 小寺沢良一: フラクトグラフィ, 破壊力学と材料強度講座 15, 木原 博 監修, 培風館, (1978), 70.
- (20) 佐藤知雄, 西沢泰二, 大橋正昭: 鉄と鋼, 43(1957), 485.
- (21) P.C.Paris and F.Erdogan: Trans. ASME, Ser. D, 85(1963), 528.
- (22) 武田武信, 菊地信一, 那須康雄, 辛島誠一: 日本金属学会誌, 48(1984), 255.
- (23) 笠井憲一, 小林英雄, 中沢 一, 川本 弘, 片桐利明, 杉浦正規: 材料, 23(1974), 737.