

論 文

UDC 621.785.616 : 625.2.012.1 : 628.178.3 : 669.14.018.29 : 539.4.014.11 : 539.431

車軸圧入部の疲れきず入り限度および疲れ破壊限度に
およぼす低温焼入れの影響*

高橋 良治**・佐藤 初吉**

吉村 照男**・飯島 一昭***

The Effect of Sub-critical Quenching on Fatigue Limits for Crack
Initiation and for Failure of Press-fitted Part in AxleRyoji TAKAHASHI, Hatsukichi SATO,
Teruo YOSHIMURA, and Kazuaki IJIMA

Synopsis :

To improve the fatigue limits of press-fitted parts of axles by sub-critical quenching, that is, water quenching from the temperature just below A_{c1} point, the effects of the heat treatment conditions on microstructure, hardness, residual stress distribution, rotating bending fatigue limits for crack initiation, σ_{w1} , and that for failure, σ_{w2} were examined. Steels used for the experiment were normalized 0.35-0.45 %C steels for machine structural uses. For fatigue testing, press-fitted specimens of 50mm in diameter were mainly used.

(1) The microstructure of specimen was hardly changed by sub-critical quenching, but the surface hardness was slightly increased.

(2) High residual compressive stress, distributed from the surface to considerable depth of the core, was detected in sub-critical quenching specimens.

(3) σ_{w1} and σ_{w2} of press-fitted specimens were both improved considerably by sub-critical quenching. Moreover, the limit depth of non-propagating crack, measured after the fatigue test in which applied stress was just below σ_{w2} , was also remarkably increased.

(4) It was supposed that σ_{w1} of the press-fitted specimen could be improved by the increase of surface hardness, and σ_{w2} by the increase of residual compressive stress in surface zone, respectively.

1. 緒 言

車軸は鉄道車両用部品の中でも最も重要なものの一つである。しかし、車軸の車輪圧入部の疲れ強さが、平滑材のそれに比較して著しく低下することは、よく知られており、古くから材料、設計、製作方法などについて多くの研究がなされている。車軸圧入部におよぼす影響因子は、きわめて複雑であり、圧入部の疲れ強さ向上には、応力集中緩和のための形状変更あるいは高周波焼入れ¹⁾、ロール加工など²⁾³⁾⁴⁾による表面硬化あるいは表面圧縮残留応力の付与などが有効であると考えられている。

疲れ強さを向上させるための各種の熱処理の中に、特異な方法として低温焼入れがある。これは鋼を A_{c1} 変態点直下に加熱した後、急冷する方法で、HORGER⁵⁾、桜井⁶⁾、西岡ら⁷⁾によつて多くの研究が行なわれているが、

圧入軸に対する実用的見地からの検討は数少ないようである。

著者らは、低温焼入れによる車軸圧入部の疲れ強さ向上を目的として、低温焼入れおよび低温焼入れ後の時効処理による顕微鏡組織、硬さ、残留応力分布ならびに疲れきず入り限度 σ_{w1} * および疲れ破壊限度 σ_{w2} ** の変化などについて実験を行なつた。また σ_{w1} および σ_{w2} におよぼす残留応力や硬さなどの影響についても考察を加えた。

2. 供 試 材 料

実験に用いた材料は、鉄道車両用車軸材SFA55および

* くり返し応力を加えても疲れきずを生じないような負荷応力の最大値

** くり返し応力を加えても疲れ破壊を生じないような負荷応力の最大値

* 昭和 51 年 4 月 本会講演大会にて発表 昭和 51 年 8 月 19 日 受付 (Received Aug. 19, 1976)

** 鉄道技術研究所 (Railway Technical Research Institute JNR, 2-8-38 Hikarimachi Kokubunji Tokyo 185)

*** 鉄道技術研究所 工博 (Railway Technical Research Institute JNR)

Table 1. Chemical composition of specimens (wt. %).

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	N	Type of specimen
S35C	0.36	0.24	0.74	0.017	0.024	0.11	0.0032	For Ono-type fatigue testing machine (plain specimen)
S45C	0.45	0.28	0.53	0.015	0.024	0.13	0.0047	Same as above (notched specimen)
S40C	0.40	0.28	0.79	0.023	0.012	0.02	0.0036	φ50mm press fitted specimen

SFA60 (炭素含有量約0.35~0.45%C) とほぼ同等の機械構造用炭素鋼 S35C (素材直径 25 mm), S40C (素材直径 55 mm) および S45C (素材直径 20 mm) で, その化学成分はTable 1 に示すとおりである. これらの供試材料に対し, それぞれ仕上り直径寸法に約1~2 mmの加工しろをつけて旋削加工を行ない. その後に焼ならし処理を施した. 焼ならし処理としては, 豎形電気炉 (内寸法: φ300×600 mm) に供試材料を吊り下げ, 850°C で 1h 保持 (φ50 mm は 2h 保持) 後, 空冷を行なった.

3. 実験方法

3.1 低温焼入装置

試験片を均一に冷却するため φ15 mm (試験片のつかみ部直径) 用および φ50 mm用の低温焼入装置をそれぞれ試作した. 装置は, Fig. 1 に示すように, 上部に豎形電気炉を有する加熱部と, 下部に噴射ノズルを有する冷却部とからなる. 試験片は両端面に保持用取付ねじ穴を設け, これに試験片保持棒およびチェーン (いずれも耐熱鋼製) を介して垂直に保持した. 焼入れは, 始めに電気炉中で一定温度に加熱保持した後, 一定速度で下方に移動しながら噴射冷却することにより行なわれる. なお噴射冷却水は, 水道圧力のままで一定水量になるようバルブで調整した. Photo. 1 に低温焼入装置の外観を示す.

3.2 低温焼入条件

試験片の加熱温度を A_{c1} 点直下の 700°C, 保持時間を 1h とした. 噴射焼入れ時の冷却水量および試験片降下速度は, φ15 mm に対しては 55 l/min および瞬時, φ50 mmに対しては 80 l/min および 33 mm/sec とした. 冷却速度の測定結果を Fig. 2 に示すが, 試験片の表面部と中心部の最大温度差は, φ15 mm では冷却開始後約 1 sec で約 450°, φ50 mm では約 7 sec で約 300°C であつた. また, 各温度における冷却速度は, Table 2 に示すように, 500°C 付近で φ15 mm では試験片表面で約 1000°C/sec, 中心で約 200°C/sec, φ50 mm では表面で約 200°C/sec, 中心で約 20°C/sec であつた.

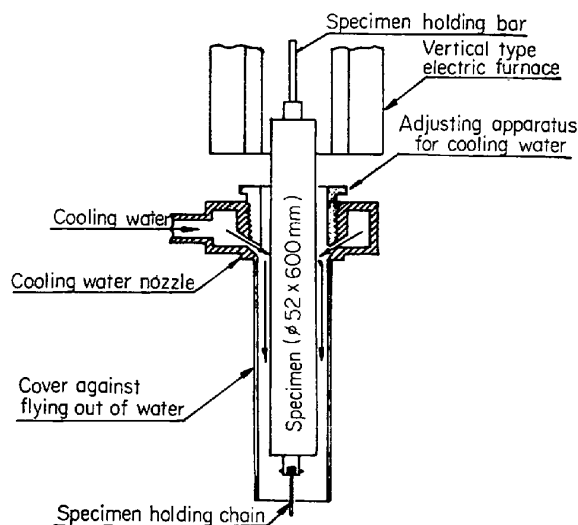


Fig. 1. Sub-critical quenching apparatus (For φ50 mm specimen).

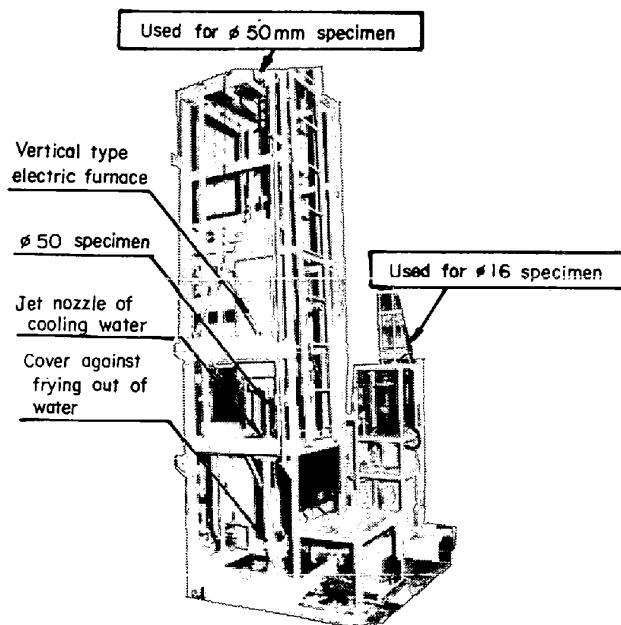


Photo. 1. Sub-critical quenching apparatus.

つぎに, 低温焼入れした試験片を, 流気式電気炉により 100, 200, 400 および 600°C の温度で, それぞれ 1h 時効処理を行ない空冷した.

Table 2. Cooling rate of specimens, quenched from 700°C.

Diameter of specimen : 16mm			Diameter of specimen : 52mm		
Temp. (°C)	Cooling rate at surface (°C/s)	Cooling rate in center (°C/s)	Temp. (°C)	Cooling rate at surface (°C/s)	Cooling rate in center (°C/s)
600	510	159	600	140	24
500	1 007	223	500	212	19
400	1 078	212	400	109	14
300	839	170	300	40	12

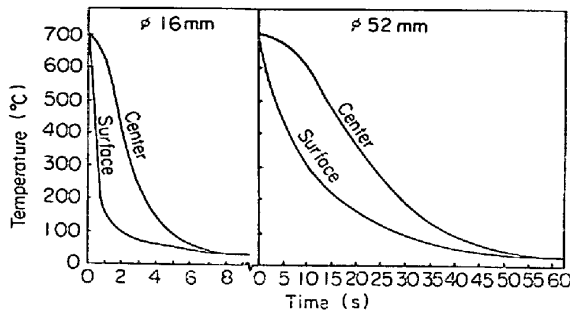


Fig. 2. Cooling curves for specimens, quenched from 700°C.

3.3 顕微鏡組織観察および硬さ試験

前項2の条件で焼ならしを施し、旋削加工した S35C ($\phi 16 \times 210$ mm) および S40C ($\phi 52 \times 600$ mm) 材から焼ならし試料として長さ25 mmのものをそれぞれ1個採取した。つぎに、残材に前項3.2の条件で低温焼入れを施し、これから長さ25 mmの試料をそれぞれ5個採取し、そのうちのそれぞれ1個を低温焼入れのままとし、残りのそれぞれ4個に時効処理を施した。

顕微鏡組織および硬さ分布は、試験片の横断面について、光学顕微鏡(倍率100および400)およびビッカース硬さ試験機(荷重5 kg)、微小ビッカース硬さ試験機(荷重0.1および0.015 kg)を用いて観察および測定を行なった。

3.4 残留応力の測定

低温焼入れおよび低温焼入れ後に時効処理を施した $\phi 50 \times 600$ mm の各試験片の中央部から、 $\phi 50 \times 100$ mm の残留応力測定用の円柱状試験片を採取し、Sachs法(内削法)により残留応力分布を測定した。試験片に対するひずみゲージ貼布位置は、Fig. 3に示すように試験片の軸方向中央部の円周上の3等分部位とし、使用ゲージは軸方向および円周方向のひずみを同時に測定できるクロス・ゲージ(kp-3-B2-11, ゲージ長さ3 mm)を用い、所定位置に接着貼布後、50°Cでキュアリング*を施した。

内削加工は、つぎの要領で行なった。すなわち、試験片を旋盤にとりつけて $\phi 5, 10, 15, 20, 30$ mm と順次

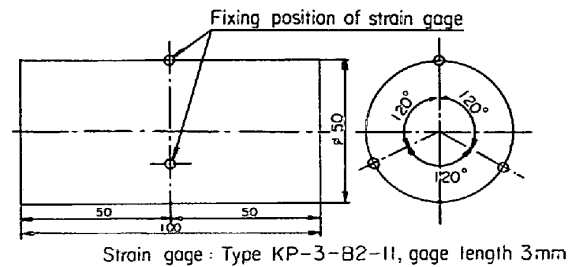


Fig. 3. Specimen for residual stress measurement.

ドリルせん孔、それ以後は $\phi 35, 40$ および 45 mm まで順次孔ぐりバイトで旋削した。この際、試験片温度が約 35°C をこさないよう、また、ひずみ測定は、各段階ごとに別の同一材料に貼布したダミー・ゲージと同一温度になるまで恒温室内に十分な時間(約16h)放置した後に行ない、室温変化による見かけ上のひずみの補正を行なった。

3.5 疲れ試験

3.5.1 試験片の形状、寸法

疲れ試験片としては、形状に対する基礎的比較のための小形疲れ試験片として小野式回転曲げ疲れ試験片(平滑材および切欠材)を用い、つぎに中形圧入軸疲れ試験片として $\phi 50$ mm 圧入軸回転曲げ疲れ試験片を用いた。試験片の形状および寸法を Fig. 4 および 5 に示す。疲れ試験片に対する低温焼入れ処理後の直径削りしろは、小野式回転曲げ疲れ試験片では 4 mm、 $\phi 50$ mm 圧入軸回転曲げ疲れ試験片では 2 mm とした。なお、小野式回転曲げ疲れ試験片の切欠部の加工は、低温焼入れ後に行なったもので、その切欠部形状寸法は、切欠角度 45° 、 $R: 0.25 \pm 0.03$ mm、切欠底直径 12 ± 0.05 mm である。

$\phi 50$ mm 圧入軸回転曲げ疲れ試験片に対しては、ホルダーはめ合部で $1.4/1000$ のしめしろ比を与え、圧入時に白亜鉛ペイントを潤滑剤として用い、プレスばめを行なった。このときの試験片の最大圧入力は 9.8 ± 0.5 t (信頼限界95%) である。

3.5.2 疲れ試験機

小野式回転曲げ疲れ試験片に対しては、小野式回転曲

* ポリエステル接着剤の強化と、応力測定時の機械加工の発熱による接着剤のクリープ防止のための加熱処理

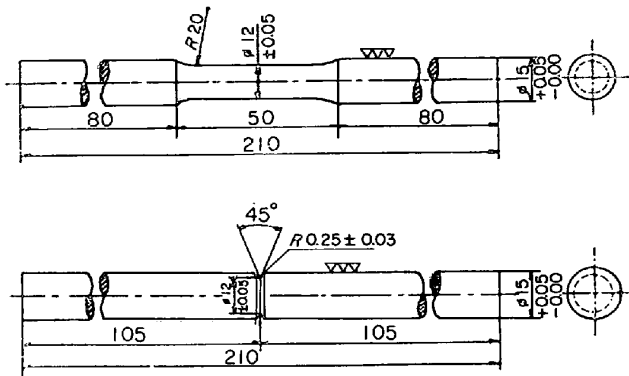


Fig. 4. Dimensions of plain and notched test specimens for Ono-type rotary bending fatigue testing.

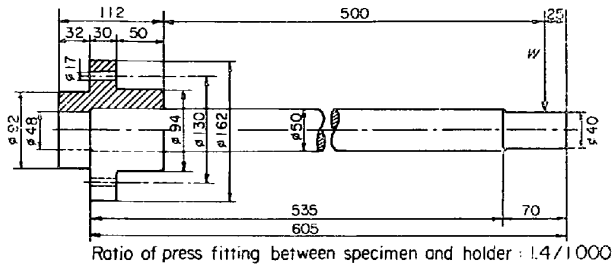


Fig. 5. Dimensions of φ50 mm press fitted specimen.

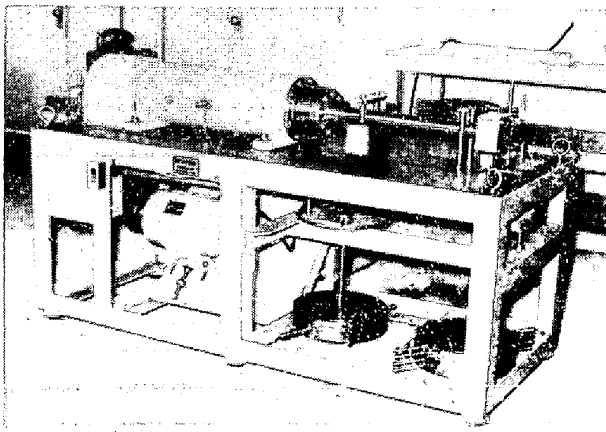


Photo. 2. General view of fatigue test machine (for press fitted φ50 mm specimen).

げ疲れ試験機（繰返数：毎分1800回）を用い、φ50 mm 圧入軸回転曲げ疲れ試験片に対しては、片持ばり式回転曲げ疲れ試験機（国鉄土崎工場製）を用いた。Photo. 2 にその外観を示す。なお試験機の機能は、つぎのとおりである。

容量	400 kg・m
繰返数	毎分 800 回
電動機	220V, 3.75 kW
機械の大きさ	1 800×700×920 mm

4. 実験結果

4.1 顕微鏡組織

φ50 mm 試験片について行なつた顕微鏡組織の観察結果をPhoto. 3に示す。

焼ならし材、低温焼入材、低温焼入れ後 200°C 時効材および 600°C 時効材をそれぞれ比較すると、これらの間には光学顕微鏡的な差異はほとんどみとめられないが、低温焼入材では、 A_{c1} 点直下の温度に加熱されるため層状セメントイトが若干球状化されている。

4.2 断面硬さ分布

Fig. 6 は、φ15 mm および φ50 mm の焼ならし材、低温焼入材および低温焼入れ後 100, 200, 400, 600°C 時効処理材の横断面硬さ分布の測定結果を示す。

φ15 mm 材は、内部までほぼ均一な硬さとなつている。熱処理条件の影響について見ると、焼ならし材に比較して低温焼入材、低温焼入れ後 100°C および 200°C 時効処理材は、硬さで約 1.2 倍の上昇を示している。これに対し 400°C 時効処理材では硬さが低下して焼ならし材の約 1.1 倍となり、600°C 時効処理材では焼ならし材とほぼ同一の硬さとなつている。

φ50 mm 材では、表面から約 10 mm 程度の深さまで硬化している。熱処理条件について見ると、焼ならし材に比較して低温焼入材、低温焼入れ後 100°C および 200°C 時効処理材は硬さで 1.1~1.2 倍となり、低温焼入れ後 400°C および 600°C 時効処理材では焼ならし材とほぼ同一となつている。

4.3 残留応力分布

Fig. 7 は、φ50 mm 材の Sachs 法（内削法）による残留応力測定結果で、軸方向、円周方向および半径方向における残留応力分布を示す。図から低温焼入れにより軸方向および円周方向で表面に圧縮残留応力、内部に引張残留応力が発生していることがわかる。とくに軸方向の残留応力は約 25kg/mm²、圧縮残留応力層深さ*は約 10 mm といずれも大きい値を示している。

低温焼入れ後の時効処理が表面層の圧縮残留応力におよぼす影響についてみると、100°C 時効処理で最大となり、200°C 時効処理がこれにつぎ、いずれも低温焼入れのものより大きい値を示している。400° および 600°C 時効処理材では、低温焼入れ時の圧縮残留応力が解放され次第に低下している。

4.4 疲れ破壊限度

Fig. 8 に φ50 mm 圧入軸回転曲げ疲れ試験結果（S-N 線図）を示す。Fig. 9 には、このような S-N 線図から

* 表面から、表面層の圧縮残留応力が零となる部位までの深さ

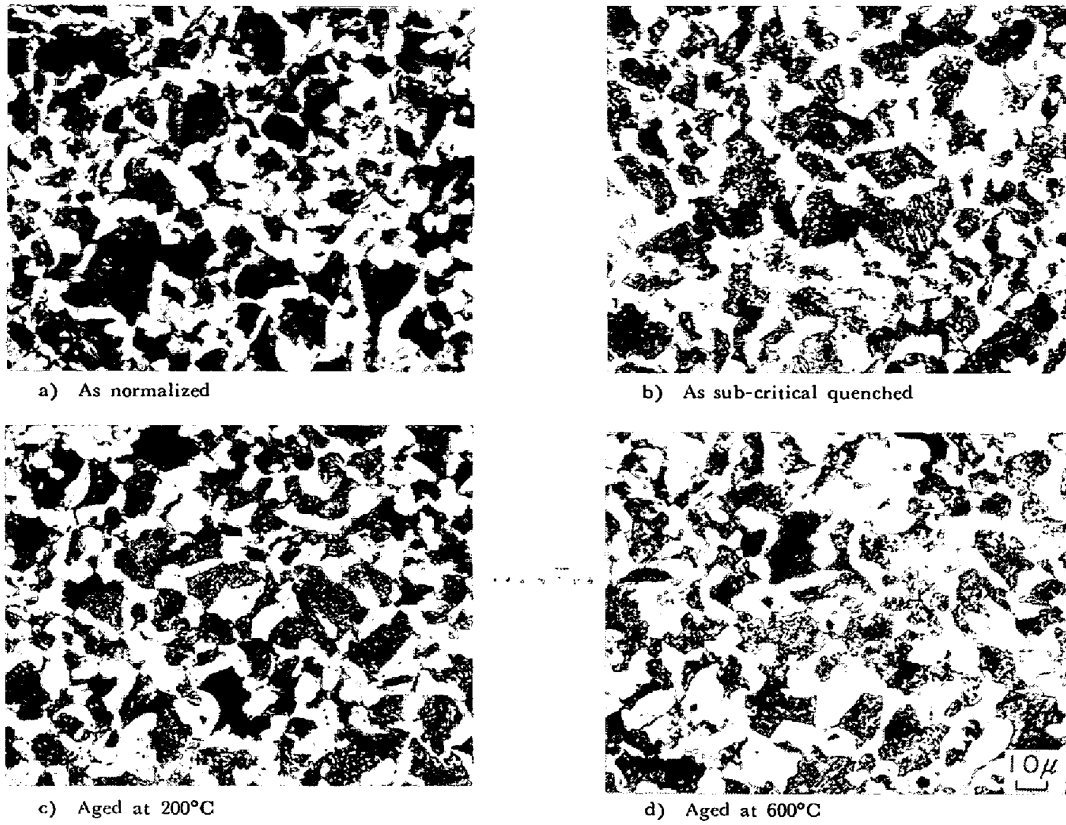


Photo. 3. Microstructure of $\phi 50$ mm S40C specimens ($\times 400$).

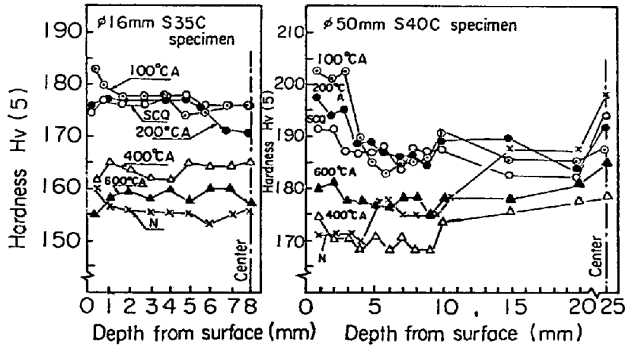


Fig. 6. Hardness distribution in the cross section of $\phi 16$ mm, and $\phi 50$ mm specimens (N : Normalized, S.C.Q.: Sub-critical quenched, A : Aged after S.C.Q.).

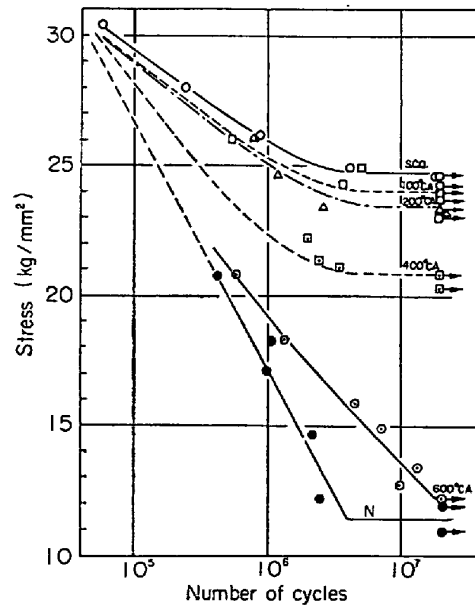


Fig. 8. S-N curves for $\phi 50$ mm press fitted specimens.

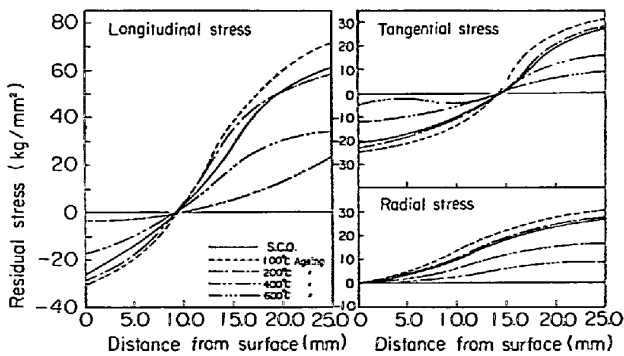


Fig. 7. Residual stress distribution in $\phi 50$ mm specimens.

求めた小野式回転曲げ疲れ試験（平滑材および切欠材）および $\phi 50$ mm 圧入軸回転曲げ疲れ試験による疲れ破壊限度 (σ_{wb} あるいは σ_{w2})*と時効処理温度との関係を示

* 平滑材の疲れ破壊限度を σ_{wb} であらわす。切欠材では疲れ破壊限度のほかは疲れきり入り限度が存在するので、前者を σ_{w1} 、後者を σ_{w2} と称して区別している。

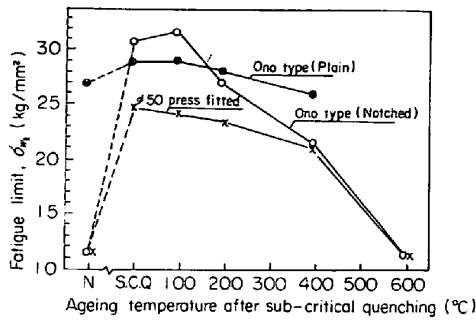


Fig. 9. Fatigue limits for failure of Ono type (plain and notched) and φ50 mm press-fitted specimens.

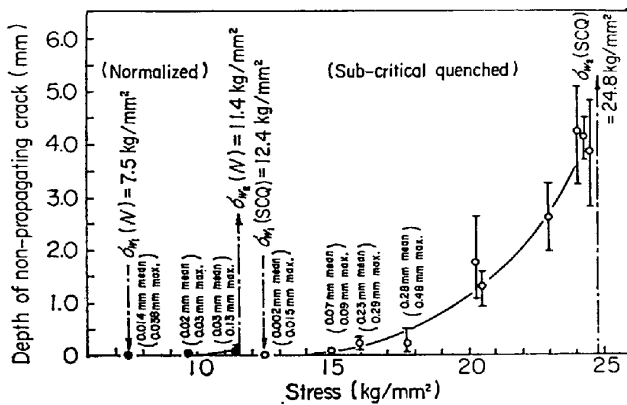


Fig. 10. Relation between stress and depth of non-propagating crack ($N=2.06\sim 2.09 \times 10^7$).

した。

小野式回転曲げ疲れ試験の結果においては、焼ならし材では平滑材の27 kg/mm²に対し、切欠材では11.5 kg/mm²と低下し、平滑材の約42%となつている。これに対し低温焼入れを施すと、平滑材では焼ならし材の約7%しか上昇しないのに、切欠材では31 kg/mm²と焼ならし材の約2.7倍も向上し、平滑材とほぼ同一の値を示すようになる。つぎに時効温度の影響では、100°Cまでは低温焼入れ材とほぼ同一であるが、それ以上では次第に低下し、400°C~600°Cでは焼ならし材と同一程度まで低下している。

φ50 mm 圧入軸回転曲げ疲れ試験結果では、焼ならし材の11.4 kg/mm²に対し、低温焼入れを施すことにより24.5 kg/mm²、約2.1倍と著しく上昇し、φ50 mm 平滑材のσ_{wb}⁸⁾とほぼ同一程度となる。時効処理温度がσ_{w2}におよぼす影響については、約200°Cまでは低温焼入れ材とほぼ同一の値を示すが、それ以上の温度では次第に低下し、600°Cでは焼ならし材とほぼ同一となる。

4.5 φ50 mm 圧入軸回転曲げ疲れ試験による疲れきず入り限度

φ50 mm 圧入軸回転曲げ疲れ試験片により、焼ならし材および低温焼入れ材のσ_{w1}を検討した。焼ならし材および低温焼入れ材のσ_{w2} (11.4 および 24.5 kg/mm²)以下の負荷応力の条件で、 $N=2 \times 10^7$ 回 (一定)*の繰返負荷を与えた後、試験片の圧入部表面にきずをつけないようホルダーを機械加工によりとり外し、その後に試験片 (圧入部分) を軸方向に8等分し、縦断面について顕微鏡 (倍率 400) によるきず深さの測定を行なつた。きず深さは、分割されたそれぞれの試験片の最大きず深さλ_{max.} (mm) の平均値 $\bar{\lambda}_{max.}$ (mm) で示し、これを停留き裂深さ**とした。

この実験結果をFig. 10に示すが、横軸に負荷応力、縦軸に $\bar{\lambda}_{max.}$ をとると、負荷応力の低下とともに停留き裂深さは次第に減少し、きず発生認められない限界の応力(σ_{w1})が求められる。焼ならし材のσ_{w1}は約7.5 kg/mm²、低温焼入れ材のσ_{w1}は約12.4 kg/mm²と推定され、低温焼入れにより約1.7倍に向上している。またσ_{w2}直下の負荷応力で得られる停留き裂深さ (限界停留き裂深さと仮称する)は焼ならし材の約0.03 mm に対し約4 mm と約100倍に増加している。

5. 考 察

前述の実験結果から、低温焼入れは切欠材および圧入軸におけるσ_{w2}およびσ_{w1}の向上にかなり有効であり、とくにσ_{w2}では発生した微細疲れきずからのき裂進展が強く抑制されていることがわかる。そこで低温焼入れによる残留応力と疲れ破壊限度σ_{w2}との関係、表面硬さと疲れきず入り限度σ_{w1}との関係ならびに低温焼入れ材の停留き裂の特徴などについて検討した。

5.1 残留応力と疲れ破壊限度σ_{w2}との関係

一般に残留応力は、疲れきずの発生にはほとんど影響を与えないが、その後の疲れき裂伝播過程において重要な役割を演ずるものと考えられている¹⁰⁾。圧縮残留応力は平均応力の効果としてあらわれるので、平均応力が圧縮であるため繰返応力振幅として示される疲れ強さが向上することによると考えられる。

そこで、この実験におけるφ50 mm 圧入軸回転曲げ疲れ試験片のσ_{w2}と残留応力との関係について検討した。まず軸方向残留応力と時効処理温度との関係は、Fig. 11に示すように、表面圧縮残留応力は低温焼入れ後、時効処理温度100°Cで最大値を示し、時効処理温

* 大形圧入軸では10⁷回以上の繰返数で破断することがあり、σ_{w2}を求めるためには、できるだけ繰返数の多いことが望ましいとされている⁹⁾ので、ここでは2×10⁷回を採用した。

** ここでは、 $N=2 \times 10^7$ 回で破断にいたらず、停留しているきずの深さを称する。

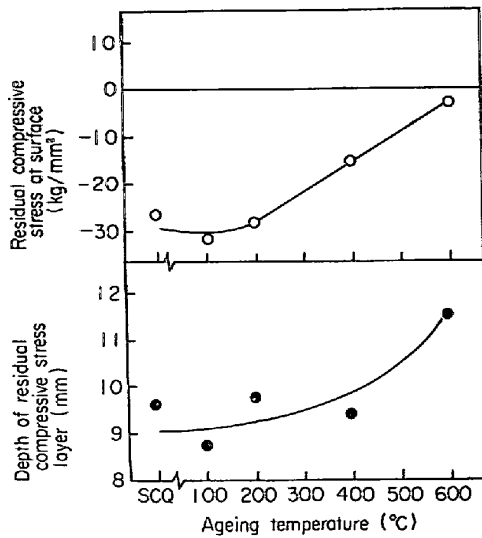


Fig. 11. Relation between ageing temperature and residual compressive stress as well as depth of residual compressive stress layer (longitudinal stress) for $\phi 50$ mm press-fitted specimens.

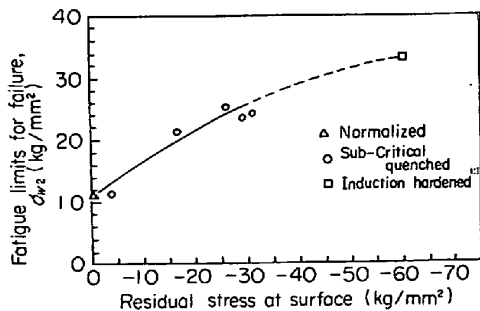


Fig. 12. Relation between residual stress at surface and fatigue limit for failure (σ_{w2}).

度の上昇とともに次第に減少する。一方、圧縮残留応力層深さは、時効処理温度 400°C まではほとんど変化しないが、400°C をこえると次第に内方に移動し、600°C で約 2 mm 内方にずれる傾向を示す。これらの現象は、時効処理温度の上昇とともに試験片材料の降伏点が次第に低下し、内部残留応力による塑性変形が一部生ずることによるものと考えられる。

時効処理温度による表面圧縮残留応力の変化と σ_{w2} との関係について、上述の実験結果のほかに高周波焼入れ材についての文献値¹¹⁾も入れて検討すると Fig. 12 のようになり、表面圧縮残留応力の増加とともに σ_{w2} の向上する傾向が示されている。したがって、圧縮残留応力と σ_{w2} の間には、かなり強い相関関係のあることがわかる。ただし Fig. 12 は表面部の圧縮残留応力層深さが、ほぼ等しいものについてプロットしたものであり、この深さが異なれば、必ずしもこのような関係が認められるか

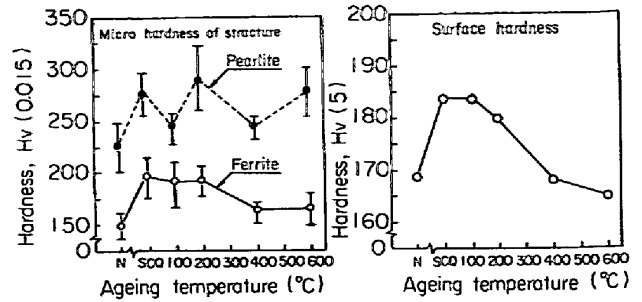


Fig. 13. Relation between ageing temperature and micro hardness of structure as well as surface hardness.

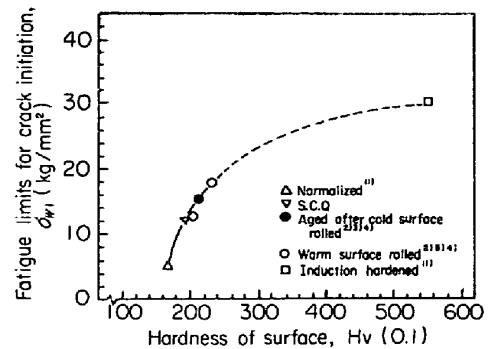


Fig. 14. Relation between hardness at specimen surface and fatigue limits for crack initiation.

どうかは明らかでない。

5.2 表面硬さと疲れきり入り限度 σ_{w1} との関係

車軸用炭素鋼(焼ならし軸)の顕微鏡組織は、フェライトおよびパーライトの相からなっている。このような組織成分を有する鋼の疲れ過程は、つぎのように考えられている。荒木¹²⁾は、フェライト相はパーライト相に比べて著しく強度が低いので、疲労現象は最初にフェライト相にあらわれ、応力繰返しの初期においては、分解せん断応力により結晶粒内にすべり線の発生が見られ、疲労が進んですべり線がつよくなると、すべり帯が固執すべり帯となつて流動区域を示すようになり、これがさらに外部的応力集中によるき裂発生源になるとしている。このようにして生じた微視的き裂は、さらに臨界寸法の巨視的き裂へと成長し、最終的には破断にいたると考えられている。

一方低温焼入れにより過飽和固溶体として常温までもちきたされたフェライト中の C, N は常温付近の温度において窒素化合物あるいは炭化物として微細析出し時効硬化現象を生起するものと考えられている¹³⁾。Fig. 13 は低温焼入れ後の時効処理温度と表面硬さおよび組織硬さとの関係を示すものである。表面硬さは Fig. 13 (右図) に示すように低温焼入れにより焼ならし材の約 1.2 倍に増

大するが、時効処理温度の上昇とともに次第に硬さが低下している。この現象は、Fig. 13 (左図) にも示されているように主として過飽和フェライトの焼入時効硬化によるものと思われる。なおパーライト硬さの変動は、パーライト中のフェライトの時効硬化によるものと思われる、硬さのバラツキはパーライト組織粒の切断方向の差異により生じたものと考えられる。

一般に、表面硬さと σ_{w1} との間には相関があると考えられている¹⁴⁾。そこで、この実験で得られた低温焼入材および焼ならし材の σ_{w1} 値、表面ロール加工 (常温、温間および後熱ロール加工²⁾³⁾⁴⁾ 材、および高周波焼入材¹¹⁾ の σ_{w1} 値*と表面硬さとを対応させると、Fig. 14に示すようになる。これによれば、 σ_{w1} は表面硬さとともに向上し、ある硬さ以上では飽和する傾向が示されている。これらの実験結果から、低温焼入材の σ_{w1} の向上は、主としてフェライトの焼入時効硬化によるものと考えられる。

5.3 ひずみ時効硬化が疲れ強さにおよぼす影響

鋼中の固溶窒素は動的ひずみに関与し、静的破壊強さ以上に疲れ強さに影響をおよぼすものと考えられている¹⁵⁾。したがって低温焼入材が繰返負荷応力をうけると、繰返数の増加とともに切欠底表面から内部に向つての硬化傾向は、焼ならし材よりも大きいものと思われ、破損に対する抵抗そのものが増加するのみならず、疲れき裂進展に対する抵抗領域も増加するであろう。低温焼入れによる切欠材、あるいは圧入軸の疲れ強さの向上が平滑材に比べて大きい原因は、この現象にもある程度基因すると考えられる。

5.4 低温焼入材の停留き裂の特徴

σ_{w2} 以下の負荷応力で試験した $\phi 50$ mm 圧入軸における負荷応力と疲れきず入り深さとの関係は、前述の Fig. 10にも示されているが、限界停留き裂深さについて検討すると、焼ならし材では約 0.03 mm となり、この深さ以上では急速に疲れき裂が進展して破断にいたる。しかし低温焼入材では、焼ならし材の約 2 倍の負荷応力の条件で、限界停留き裂深さは約 4 mm と約 100 倍にも増大し、き裂がこの深さに達しても繰返負荷応力に十分耐えて停留することが明らかにされた。この現象は、圧縮残留応力が表面層に深くまで形成されることによつて、き裂進展が強く抑制されることを示すものと考えられる。これは他の処理方法では見られない特徴と思われ、圧入軸使用時における安全性の向上、また保守検査時における信頼度の向上など、実用上大きい効果があるものと考えられる。

* いずれも $\phi 50$ mm 圧入軸の回転曲げ疲れ試験による

6. 結 論

低温焼入れによる車軸圧入部の疲れ強さの向上をはかるため、まず、疲れきず入り限度 σ_{w1} および疲れ破壊限度 σ_{w2} におよぼす残留応力の影響を明らかにする目的で鉄道車両用車軸材とほぼ同等の化学成分をもつ S40C (焼ならし材) などを用い、これに 700°C 低温焼入れおよび時効処理を施して各種の実験を行なつた。得られた結果はつぎのとおりである。

(1) 焼ならし材と低温焼入材の間には光学顕微鏡による組織上の差異はほとんど認められないが、表面硬さは低温焼入れによりわずかであるが増加する。これはフェライトの時効硬化現象によるものと推定される。

(2) $\phi 50$ mm 試験片に低温焼入れを施すと表面層に約 25 kg/mm² の圧縮残留応力が約 10 mm 深さまで形成される。この圧縮残留応力は約 200°C 以上の時効処理により次第に減少するが、この変化は硬さの変化 (減少) とほぼ同一の傾向を示す。

(3) 小野式 (平滑材および切欠材) 回転曲げ疲れ試験の結果、疲れ破壊限度におよぼす低温焼入れの効果は平滑材にはあまり認められないが、切欠材ではその効果は著しく σ_{w2} は約 2.7 倍向上して平滑材のそれ (σ_{w2}) とほぼ同程度にまで増加することがわかつた。

(4) $\phi 50$ mm 圧入軸回転曲げ疲れ試験片に対しても低温焼入れの効果は著しく、 σ_{w2} は約 2.2 倍向上して平滑材とほぼ同程度まで達すること、また σ_{w1} も約 1.7 倍向上することなどが明らかにされた。

(5) 低温焼入れ後の時効処理の影響は、小野式回転曲げ疲れ試験片、 $\phi 50$ mm 圧入軸回転曲げ疲れ試験片とも約 200°C までは σ_{w2} はほとんど変わらないが、その温度を超すと次第に低下し、600°C では焼ならし材とほぼ同一値を示すようになる。

(6) $\phi 50$ mm 圧入軸回転曲げ疲れ試験片の限界停留き裂深さ (σ_{w2} 直下の負荷応力による) は低温焼入れによりいちじるしく増加し、車軸としての実用時にすぐれた安全性および信頼性を与える特性をもつことが明らかにされた。

(7) $\phi 50$ mm 圧入軸回転曲げ疲れ試験片の低温焼入れによる σ_{w1} の向上はフェライトの焼入時効硬化に、また σ_{w2} の向上は表面圧縮残留応力 (圧縮残留応力層深さがほぼ等しい場合) とそれぞれ相関のあることが推察された。

本研究を進めるにあたり、ご指導、ご助言をたまわつた当所金属材料研究室長竹中康雄氏、車両構造研究室田

中真一氏ならびにご協力をいただいた所内関係各位、また実験を手伝っていただいた元芝浦工大学生須藤、山本、後藤の三君に深甚なる謝意を表す。なお試験機および試験片の製作については国鉄土崎工場のご協力をいただいたことを記し、関係各位に感謝の意を表す。

文 献

- 1) 中村宏: 鉄道技術研究報告. No. 82 車両編 No. 31 (1959) July, p. 33
- 2) 斉藤葆, 小笠原淳, 星野芳男, 高橋良治: 塑性と加工, 12 (1971) 130, p. 846
- 3) 斉藤葆, 小笠原淳, 星野芳男, 高橋良治: 塑性と加工, 13 (1972) 142, p. 825
- 4) 斉藤葆, 小笠原淳, 星野芳男, 高橋良治: 塑性と加工, 14 (1973) 148, p. 392
- 5) O. J. HORGER: Proc. Int. Cont. Fatigue of Metals, (1956), p. 352
- 6) 桜井忠一, 川崎正, 北幸純: 日本機械学会論文集 23 (昭32-7) 131, p. 489
- 7) 西岡邦夫, 西川富雄, 小松英雄: 日本機械学会論文集, 38 (昭47-5) 309, p. 933
- 8) 日本機械学会: 金属材料疲れ強さ設計資料(1), (昭49-7), p. 32
- 9) O. J. HORGER: ASTM STP, 216 (1957), p. 81
- 10) 山田邦博, 国尾武: 日本機械学会論文集, 35 (昭44-5) 273, p. 942
- 11) 田中真一, 毛利文平, 初野耕三, 矢口信治: 鉄道技術研究報告 No. 955 車両編 No. 256 (1975) March, p. 45
- 12) 日本金属学会: 金属材料の疲労 (昭48-7), p. 22
- 13) 日本鉄鋼協会: 鋼材の性質と試験 (昭 42-10), p. 34, p. 225
- 14) 西岡邦夫, 平川賢爾, 小松英雄: 住友金属, 25 (1973) 2, p. 181