

© 1989 ISIJ

論文

高周波焼入れした中炭素鋼材の疲れ強さにおよぼす残留応力の影響

米 谷 茂*・磯 田 繁 雄*²

Effect of Residual Stress on Fatigue Strength of Induction Hardened Specimens of a Medium Carbon Steel

Shigeru YONETANI and Shigeo ISODA

Synopsis :

The effect of residual stress on fatigue strength of a medium carbon steel was investigated. Specimens were induction hardened and subsequently reheated in three conditions to give them various distributions of residual stress. Fatigue limit was improved by reheating in a condition compared with as induction hardened. Residual stress after the heat-treatments was compressive around the surface of the specimens, and varied to tensile stress in the inner unhardened region. A method to estimate fatigue limit from the total stress which is the sum of the residual stress and applied stress was proposed.

Key words : fatigue strength ; induction hardening ; residual stress ; fish eye.

1. 緒 言

高周波焼入れ材の疲れ強さに関する研究は従来より多く行われている¹⁾²⁾。しかし疲れ強さにおよぼす残留応力の影響について研究を行ったものは少ない^{3)~8)}。残留応力は普通外表面付近の硬化部で大きな圧縮残留応力を生じ、その分布は外表面から内部に入るにつれて大幅に減少し内部の非硬化部との境界では引張応力となっている。普通高周波焼入れ材では繰返し応力をうけると残留応力は変化する。またこのような残留応力が疲れ過程の進行にともなう破壊にさいしてどのように影響するかは不明であり、このため残留応力の影響は十分あきらかにされていない。

高周波焼入れ材に繰返し応力を加えると残留応力が変化することが知られている。高周波焼入れ材の疲れ強さにおよぼす残留応力の影響を調べるにさいし、応力繰返しによる残留応力の変化を調べることも意味あることと考え、ここでは、一定の硬化深さに高周波焼入れを行った試験片に、種々の熱処理を行って残留応力分布の異なるものをつくり、これらに疲労試験を行って応力繰返しによる残留応力の変化を詳しく調べた。ついでこれらの結果より疲れ強さにおよぼす残留応力の影響について検討

を行った。

2. 実 験 方 法

実験に用いた材料は市販の S45C 炭素鋼材である。これを予備処理として 850°C、30 min 加熱油焼入れ後、580°C、50 min 焼もどしを行いソルバイト組織としたものを使用した。試験片寸法は Fig. 1 に示すように平行部直径 10 mm の丸棒回転曲げ疲労試験片である。

高周波焼入れは、普通の高周波焼入れ装置で使用周波数 200 kHz、80 kW のものを用い、焼入れ後有効硬化深さが 1.4 mm (表面より硬さが HV 450 の部分までの深さ) になるよう全試験片の焼入れを行った。焼入れ後の試料はこれよりさらに残留応力分布の異なるものをつくるためつぎのような熱処理を行った。試験片を各種の温度の塩浴中に短時間保持し、塩浴による急速加熱を行った後空冷

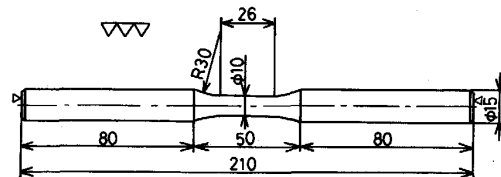


Fig. 1. Shape and dimension of specimen (mm).

昭和 63 年 9 月 6 日受付 (Received Sep. 6, 1988)

* 金沢大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Kanazawa University, 2-40-20 Kodatsuno Kanazawa 920)

*² (株)神戸製鋼所名古屋工場 (Nagoya Plant, Kobe Steel, Ltd.)

あるいは水冷を行った。このような短時間加熱を行うことによって、試験片外表面部のかたさはあまり低下するようなことなく、すなわち外表面部の組織が大きく変化することなく残留応力のやや低下した各種の分布のものをつくった。ここで用いた塩浴の温度は 580°C 、 700°C および 850°C で、それぞれの温度の塩浴に試験片を投入し、試験片が浴中に没してから 6 s、および 4 s 経過後とりだして、空冷あるいは水冷を行った。このような短時間保持は、もっとも高い温度の 850°C 塩浴保持のものでも、熱移動の関係から、浴に接した外表面部でも十分な組織的な変化が生じるとは考えられない。この操作によって機械的效果として過渡的に発生した熱応力による塑性変形の影響によって、普通、浴に接する外表面部に引張残留応力の発生が考えられ、この場合この部分に存在する圧縮残留応力の減少を期待した。また、塩浴保持後の水冷は、外表面部にまた圧縮残留応力を生じる原因となるが⁹⁾、この効果は急速加熱の場合には二次的である。これによってさらに残留応力分布に変化のあるものをつくった。

熱処理後各試料に疲労試験を行った。疲労試験は小野式回転曲げ疲労試験機によって行った。残留応力の測定は熱処理のままのもの、およびこれに繰返し応力を加えた後のものについて実施した。残留応力は繰返し応力をうけると変化する。残留応力の影響を検討するためには、これらの変化を調べる必要がある。ここでは、各条件の試料の疲労限近くの応力として 640 MPa 、 700 MPa の

応力を 10^4 回あるいは 10^5 回加えたものを応力繰返しの途中でとりだし、また破断したものはその残りの部分についてその断面内の残留応力を求めた。応力の測定には X 線的方法を用いた。各条件の試験片を約 25 mm の長さに切断し、これを外層より腐食により逐次除去し、除去過程中的試料軸方向、円周方向の残留応力を測定した。これより全断面の軸方向、円周方向、および半径方向の残留応力を計算した⁹⁾。用いた X 線は $\text{CrK}\alpha$ 特性 X 線でこれによって X 線照射部の試料 (211) 面の面間距離の変化にもとづく回折ピークの移動を測定し、 $0\sim 45^{\circ}$ 法によって応力を求めた。なお、X 線条件は使用電圧 30 kV 、使用電流 10 mA である。ここでヤング率は 200 GPa とした。

3. 実験結果

3.1 残留応力分布と疲労試験結果

高周波焼入れのままのもの、およびこれに各種熱処理を行ったものの断面内での軸方向、円周方向の残留応力分布および断面のかたさを Fig. 2 に示す。焼入れのままのものは外表面付近で大きな圧縮残留応力を示している。また内部においては、このとき全硬化深さは 1.8 mm であるが、深さ 1.5 mm 付近より内部にかけて引張残留応力があらわれ、硬化部と非硬化部の境界をこした内部の非硬化部に最大引張残留応力があらわれている。通常塩浴による短時間の急速加熱を行うと、これによって試料外表面付近に引張残留応力を生じる⁹⁾。しかし、

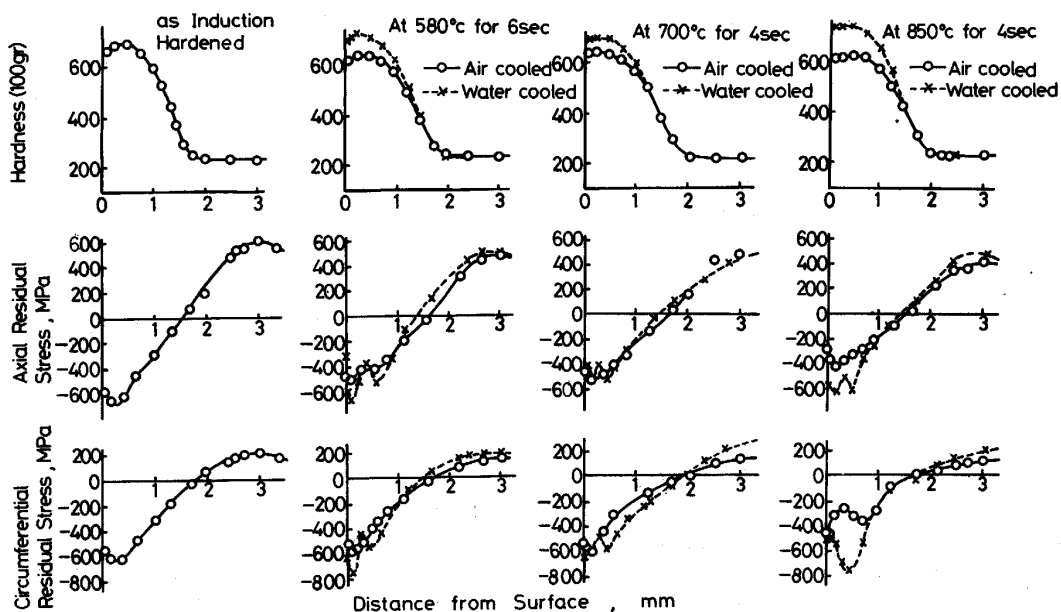


Fig. 2. Hardness and residual stress in the section of induction hardened specimen (case depth 1.4 mm) and successively heat treated specimens which have been heated in a salt bath at 580°C for 6 s, at 700°C for 4 s, or at 850°C for 4 s.

本実験の場合、外表面における軸方向および円周方向のいずれにおいてを圧縮残留応力は減少し、塩浴温度の高いもののほうが減少の度合いは大きい。また内部の非硬化部における引張残留応力も減少している。加熱後の空冷と水冷の影響についていえば、空冷によるもののほうが残留応力の減少は大きい。かたさは空冷のものは、焼入れのままのものにくらべ HV 700 から HV 640~610 程度に低下しているが、水冷のものは低下はみられない。また応力繰返しにさいして外表面付近のかたさは各条件のものに増減がみられるが、いずれの場合もこれらのかたさは HV 600 以上である。これは普通知られているかたさと疲労限を対応させた関係において、この付近からかたさが増加しても疲労限は増加せずほぼ一定となる付近である¹⁰⁾。従って、外表面付近のかたさについては、疲れ強さの観点からは各試料は同様な状態であると考えられる。

各条件で熱処理をした試験片の S-N 曲線および疲労限は Fig. 3, Table 1 に示すとおりである。高周波焼入れのままのものにくらべ、さらに塩浴による急速加熱を行って残留応力を低下させたもののほうが疲労限は高く、残留応力の疲れ強さにおよぼす影響は単純ではないようである。(なお Table 1 中の $\Delta\sigma_{w0}$ については後述

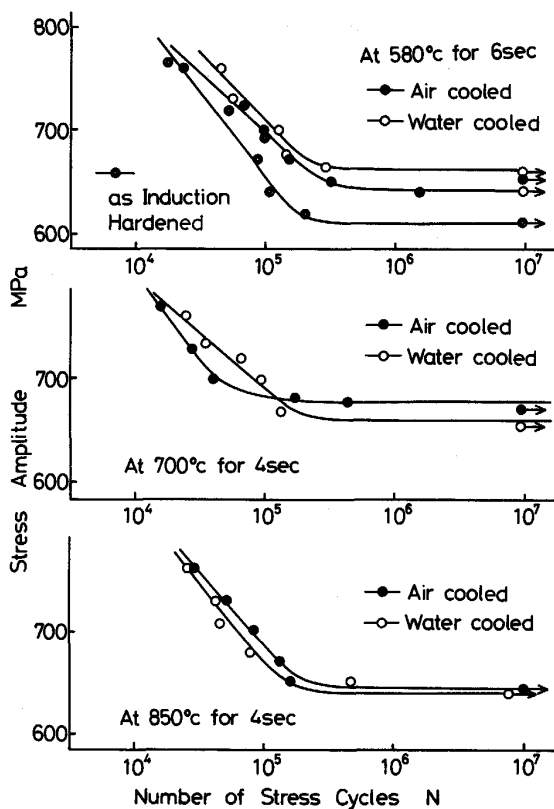


Fig. 3. S-N diagrams.

Table 1. Influence of the conditions of heat treatment on the fatigue limit σ_w and apparent fatigue limit σ_{w0} .

Heat treatment	σ_w (MPa)	σ_{w0} (MPa)
As induction hardened	610	425
At 580°C for 6s air-cooled	640	515
At 580°C for 6s water-cooled	663	510
At 700°C for 4s air-cooled	678	545
At 700°C for 4s water-cooled	660	500
At 850°C for 4s air-cooled	645	533
At 850°C for 4s water-cooled	638	500

する)

3.2 残留応力の応力繰返しによる変化

残留応力は応力繰返しによって変化する。これについては検討された結果が報告されている¹¹⁾¹²⁾。この場合外表面付近に大きな圧縮残留応力が存在し、また内部の非硬化部でも大きな引張残留応力を持つ部分があり、この部分では応力繰返しによって塑性変形を生じて残留応力が低下することが考えられる。本実験では高周波焼入れのもの、これに 580°C, 700°C, 850°C の塩浴で 6s または 4s 加熱処理した各条件のものについて、これに 640 MPa, および 700 MPa の繰返し応力を加えて、所定の回数繰返した後、試験を中断して試験片を取り出しこれらの残留応力を測定した。ここでは、高周波焼入れのままのもの(疲労限: 610 MPa), および 580°C, 6s 塩浴保持, 水冷のもの(疲労限: 660 MPa)の残留応力分布の変化の例を述べる。

Fig. 4 は高周波焼入れのままのものに、負荷応力 700 MPa, 640 MPa を加えた繰返し数 10^4 回のもの、および破断繰返し数まで繰返し作用させた後の残留応力分布を示す。700 MPa の場合、 10^4 回の繰返しですでに外表面部および内部の非硬化部で軸方向残留応力の大きな低下がみられる。 1.06×10^5 回の繰返しで軸方向残留応力はさらに低下している。円周方向残留応力は軸方向残留応力のような大きな低下はみられず、 10^4 回の繰返しではあまり変化なく、 10^5 回の繰返しで幾分低下がみられる程度である。

Fig. 5 は 580°C, 6s 塩浴保持, 水冷のものの応力繰返しによる残留応力の変化を示すもので、外表面部および内部の非硬化部の残留応力が高周波焼入れのものにくらべ小さい場合である。応力繰返しにともない、負荷応力 700 MPa の場合は、 10^4 回繰返しで外表面部付近では残留応力の再分布と低下を生じ、内部の非硬化部でも残留応力の低下がみられる。さらに 1.30×10^5 回の繰返しで外表面部と内部の非硬化部で軸方向残留応力の明らかな低下がみられる。しかし円周方向残留応力の変化はわずかである。負荷応力が 640 MPa の場合は、 10^4

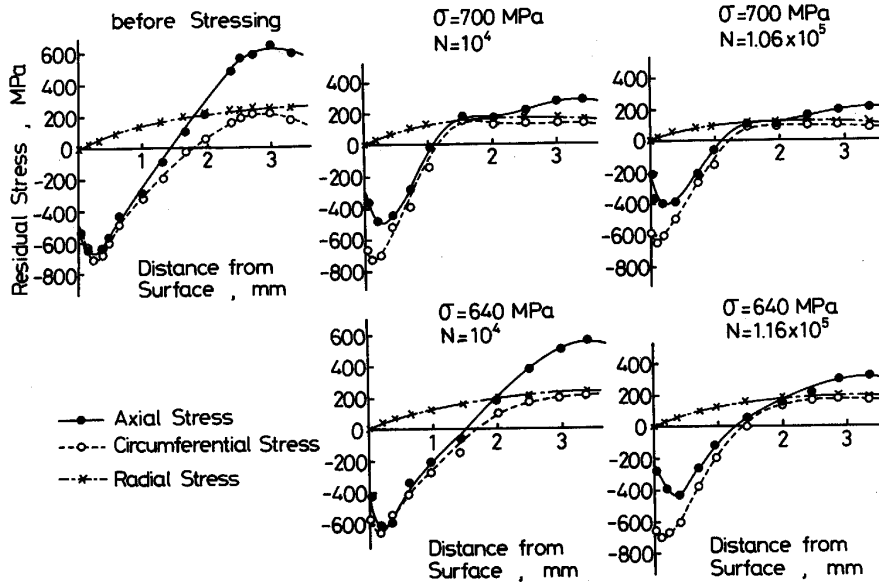


Fig. 4. Variation of residual stress in the section of the induction hardened specimen by repeated stressing.

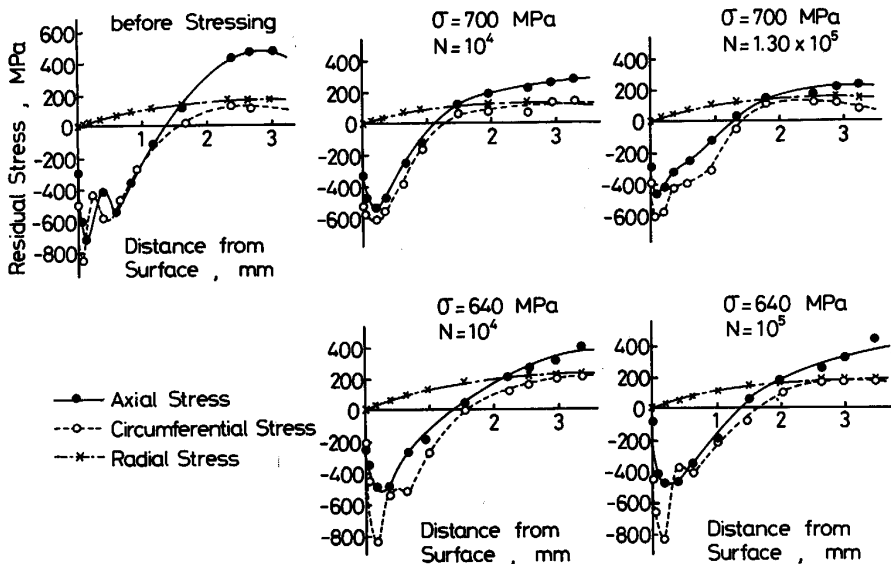


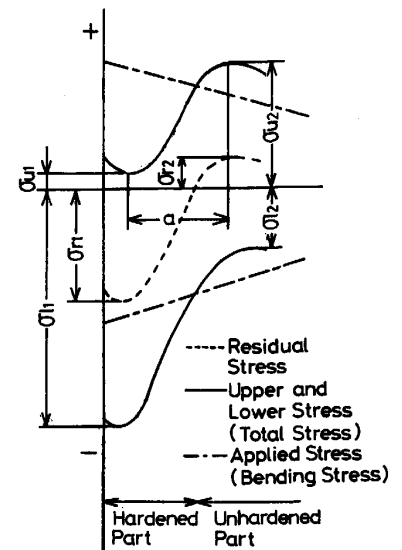
Fig. 5. Variation of residual stress by repeated stressing in the section of the specimen heated in a salt bath at 580°C for 6 s and water cooled.

回と 10^5 回の繰返しで、外表面部の軸方向残留応力は 700 MPa の場合と同様に大きく低下するが、内部の非硬化部の応力はさほど大きく低下していない。またこの時円周方向の残留応力の変化はみられない。

4. 考察

4.1 応力繰返しによる残留応力の変化

残留応力の変化や残留応力の疲れ強さにおよぼす影響を説明するため、ここで模式的に残留応力と、これに負荷応力が加わった状態を Fig. 6 に示す。疲れ強さには、



σ_r : Residual stress σ_u : The upper stress
 σ_l : The lower stress

Fig. 6. Axial residual stress in the section of a specimen and the upper and lower stresses (total stress) at each part under applied load.

円周方向の残留応力の影響は二次的なものと考え、軸方向残留応力のみが関係するものと考え、ここでは軸方向の応力状態を示す。残留応力が存在し、これに外部から応力が加わると、残留応力は平均応力として作用して応力繰返しのさいには図示のように残留応力に負荷応力が加わったものとして、上限応力と下限応力が作用することになる。外表面部(最外表面近く)の残留応力の最大

値を σ_{r1} , 内部の非硬化部(外表面よりかたさが低下して非硬化部に達してからやや内部に入ったところ)における最大残留応力を σ_{u2} とする. これに対応して外表面部での上限応力を σ_{u1} , 下限応力を σ_{l1} とする. また, 内部の非硬化部の上限応力を σ_{u2} , 下限応力を σ_{l2} とする. これら応力の応力繰返しによる変化を調べてみた.

外表面部の圧縮残留応力が大きい場合, 下限応力 σ_{l1} は大きくなって静的試験時における降伏の場合と同じく, ある値の応力以上では, 応力の繰返しによって動的な降伏のようなことがおこり, 塑性変形を生じてその結果残留応力が減少することが考えられる. このような動的な降伏は, 内部の非硬化部においてもその上限応力 σ_{u2} が大きな引張応力である場合は同様なことが考えられる. なお, この原因は力学的な意味での降伏によるほかに, 組織的に高周波焼入組織内における微視的ひずみないし微視的応力の緩和も影響しているものと思われる.

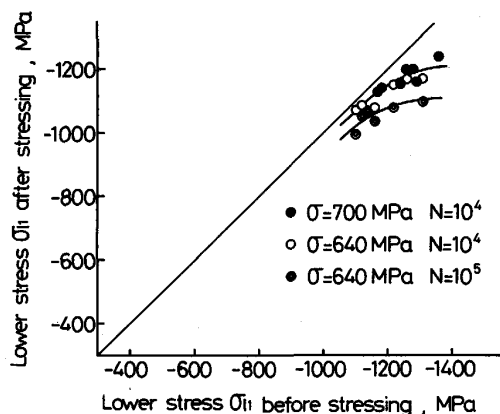


Fig. 7. Variation of maximum lower stress σ_{l1} at surface layer by repeated stressing.

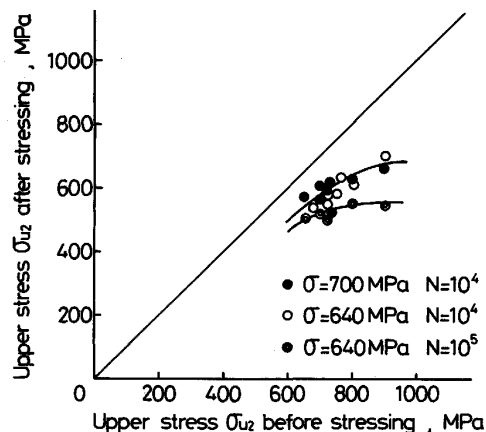


Fig. 8. Variation of the maximum upper stress σ_{u2} at unhardened part by repeated stressing.

各試料について, 応力繰返し前後の上限応力, および下限応力を調べた結果を述べる. Fig. 7 に 640 MPa および 700 MPa の応力振幅で, 10^4 回および 10^5 回加えたものについて外表面部の下限応力 σ_{l1} の変化を調べた結果を示す. また Fig. 8 には内部の非硬化部の上限応力 σ_{u2} の変化を示す. いずれも応力繰返し前の値に対する繰返し後の値が示されている. 残留応力が大きく, 上限応力あるいは下限応力が大きくなると, 10^4 回の繰返しでこれらの応力値の低下が認められ, 640 MPa の応力で 10^5 回繰返しの場合はかなりの変化がみられ, ここで応力より繰返し数の影響のほうが大きい. 上限応力 σ_{u1} , 下限応力 σ_{l1} とも応力の増加とともに一定の値に近づいてゆくようである.

つぎに, Fig. 9 に応力繰返しの前後の外表面部の下限応力 σ_{l1} , および上限応力 σ_{u1} を, 各試料の外表面部のかたさに対応して示してある. これは疲労限近くの応力を 10^4 回繰返した場合のものである. Fig. 7 に示すように 10^4 回繰返しのものは負荷応力が 640 MPa, 700 MPa のいずれの場合もほぼ同じ変化であり疲労限での負荷応力のときも同様と考えられる. なおここでは, 本研究の試料による結果のほかに同様各種の深さに高周波焼入れをした試料について調べた結果も図中に付記している. (これは下限応力 σ_{l1} のみ示す.) 下限応力 σ_{l1} は応力繰返し後, 応力値の大きいものは明らかに小さくなり, その変化した点をたどると, 図上でかたさにそってあらわれている線内に移動しており, すなわち降伏を示すような一定の限界線内に変化しているようである. 応力が小さい場合は, もちろん限界線内で変化をしている. この結果は, 残留応力の応力繰返しによる変化を考

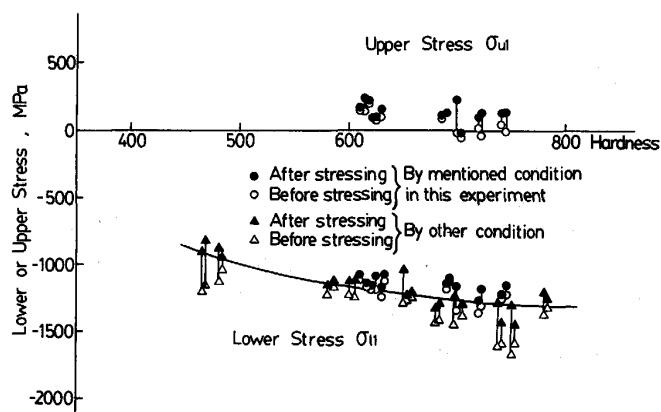


Fig. 9. Relations between the minimum upper stress σ_{u1} and the maximum lower stress σ_{l1} at surface layer after 10^4 cycle stressing and hardness of test specimens. Used applied load is in the neighborhood of fatigue limit with each specimens.

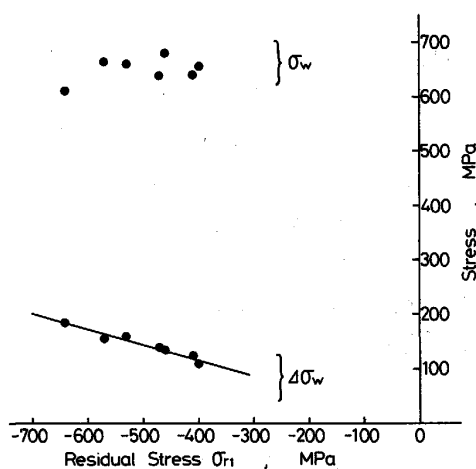
えるにさいし、残留応力そのものの大きさではなくて、残留応力に負荷応力が加わった状態における下限応力について考慮すべきことを示したものである。そこで下限応力が Fig. 9 の各かたさについて示した限界の応力を越したときは、負荷応力は変わらないから、残留応力の変化は、下限応力のこの限界の応力への変化で示される。また、このとき同時に上限応力 σ_{u1} は、下限応力 σ_{l1} が変化すれば、すなわち平均応力としての残留応力 σ_{r1} が変化すれば同時に変化する。なお Fig. 9 の結果はいずれの場合も疲労限に近い応力で作用した場合である。

なお、これらの残留応力の変化において、外表面部で残留応力の変化があれば釣合上内部の非硬化部の残留応力も変化することになり、また内部の非硬化部の残留応力が増えれば、同じことが外表面部の残留応力の変化についてもいえて、残留応力の変化には、釣合上の関係からくる応力もあり、その程度は大きくないにしても、その変化は単純ではない。

4.2 疲れ強さにおよぼす残留応力の影響

疲れ強さにおよぼす残留応力の影響を説明するまえに、単純に、各条件で熱処理を行ったものの疲労限と外表面部の残留応力を対応させ、外表面部残留応力 σ_{r1} を平均応力と考え、疲労限 σ_w との関係調べた結果を Fig. 10 に示す（同図内の $\Delta\sigma_w$ と σ_{r1} との関係については後で述べる）。残留応力 σ_{r1} は疲労限の応力を 10^4 回繰返し加えたときのものである。ここで明らかに疲労限 σ_w と残留応力 σ_{r1} との対応関係は不明瞭である。

高周波焼入れをしたものの疲労破壊は、硬化部の圧縮残留応力が小のときは外表面より始まると考えられる



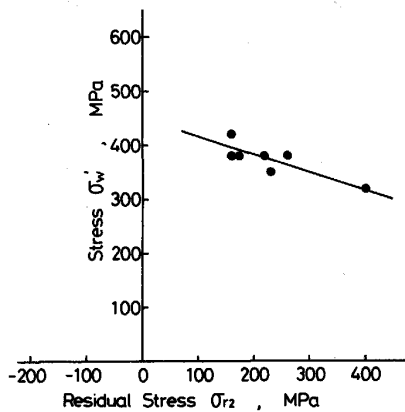
σ_{w0} : Apparent fatigue limit estimated from hardness
 σ_{r1} : Axial residual stress after 10^4 cycle stressing

Fig. 10. Relations between fatigue limit σ_w , $\Delta\sigma_w$ ($=\sigma_w - \sigma_{w0}$) and residual stress σ_{r1} at surface layer.

が、圧縮残留応力が大のときは普通内部の非硬化部の引張残留応力が大きくあらわれている部分より破壊が生じている¹³⁾¹⁴⁾。これはいわゆるフィッシュアイ破壊の場合である。本実験の場合、疲労限付近の応力が作用したものの破壊はフィッシュアイ破壊であった。この破壊のときは、はじめ、非硬化部の引張残留応力が存在している、おそらく上限応力 σ_{u2} が最大のところで発生した微小なき裂が、応力の繰返しとともに周辺部に進展し、これが外表面部に達したとき破断を生じるものと考えられる¹⁵⁾。このような内部の非硬化部から破壊が始まるフィッシュアイ破壊の場合、応力繰返しの過程で起点のき裂が発生する時期的なことは不明であるが、伝播成長してフィッシュアイを形成したき裂が外表面部に達したときは、疲労限以上のどの応力振幅の場合のものも、そのフィッシュアイき裂の端は圧縮残留応力が最大値を示す付近に達し、ここで最終破断を行っているのがみられる。

残留応力は、Fig. 7, Fig. 8 の下限応力および上限応力の変化から推察されるように、 10^4 回および 10^5 回の繰返しでかなり変化しているが、残留応力があまり大きくない限り、 10^5 回の繰返し、あるいは繰返し応力の大きいときは寿命の 50% 程度の繰返しではほぼ大体的変化はおわり、以後破断まであまり変化はみられない。そして、 10^4 回の繰返しで、表面硬化部では残留応力は、その全変化量の 50% 以上、また非硬化部では 60%~70% 程度の変化がみられている。これ以後では残留応力の変化は徐々にゆるやかである。このように残留応力は応力繰返しにさいし変化しつつ疲労過程に影響するが、疲労過程に対する関係としては、フィッシュアイの起点のき裂生成の時期的なことは不明としても、疲労被害は初期より加わっていることや、またき裂の進展のさいには、残留応力の影響を受けた応力下で最終破断までの間き裂が逐次進展してゆく時間的な経過を考慮して、疲労破壊におよぼす残留応力の影響を実効的に評価する一応の目安として、 10^4 回の繰返し後の残留応力をもって疲れ強さとの関連の検討を行うことにした。

内部の非硬化部における残留応力 σ_{r2} が疲労破壊にどのように関連を持っているかを調べた結果を Fig. 11 に示す。これは残留応力 σ_{r2} に対し、最外表面部に曲げ応力として疲労限の応力 σ_w が作用したとき、内部の非硬化部のこの部分に作用する応力 (σ_w' とする) との関係を示したものである。ここで引張残留応力が大きいときは σ_w' が低下しており、残留応力の影響が平均応力的にあらわれているのがみられる。なお、ここで σ_w' は 300~400 MPa であるが、これは 100~200 MPa の引張残



σ_w' : Applied stress at the unhardened part under bendig fatigue limit loading

Fig. 11. Relations between stress σ_w' at the unhardened part and residual stress σ_{r2} at the unhardened same part.

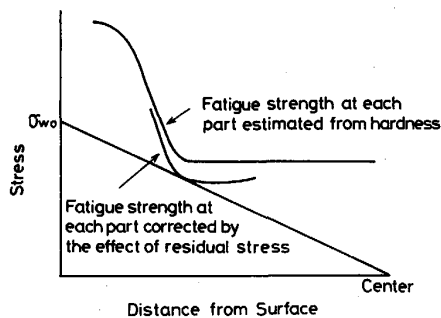


Fig. 12. Apparent fatigue limit σ_{w0} estimated from the hardness and residual stress in the section.

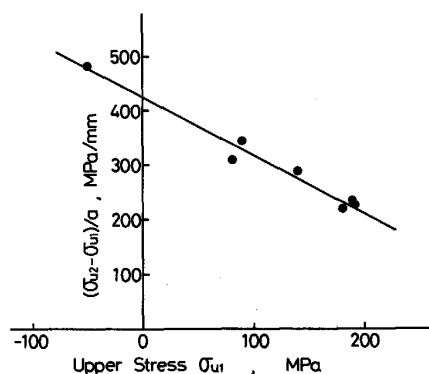
留応力が存在している場合である。ここで素材の疲労限は 350 MPa であるが、これに平均応力として引張残留応力の存在する場合を考えると(このとき破壊は外表より始まる場合であるが)、ここで各場合の σ_w' の値は素材部の材料についてこのようにして求められる疲労限より高くあらわれているようである。

ここではひとまず、従来より提案されている方法¹⁶⁾に従って内部の非硬化部の残留応力 σ_{u2} が疲れ強さに関係するものとして、この方法によって疲労限の推定を行ってみた。これは Fig. 12 に示すように、各かたさに対応して、従来より知られているかたさ対疲労限の関係から内部の各部おのおのの疲労限を示す線図が得られる。ここで残留応力がないときは、試験片中心より外表面にむけてこの線に接する直線を引き(これは硬化部と非硬化部の境界で接する)、外表面に達したところをみかけの(推定)疲労限 σ_{w0} とするものである。ここでは、これに残留応力が作用している場合であり、この影響の

補正をする。これには残留応力を平均応力として従来から得られている疲労線図の関係を用いる。ここで簡便に従来から求められている関係¹⁷⁾を用いる。曲げ応力による疲労の場合、両振疲労限を σ_w 、片振疲労限を σ_{up} とすると両者の間には $\sigma_{up} = 1.66 \sigma_w$ の関係が得られている。そこで、疲労限に対する平均応力の影響が上式を満足するような関係の疲労線図上において、残留応力を平均応力におきかえて残留応力の存在しているときの各部分自身の疲労限を求め、これを示した線図が得られる。これは Fig. 12 に示すようで、ついで中心より外表に向かってこの線に接するように接線を引き、これを延長して外表面に達したところでみかけの疲労限 σ_{w0} を求める。タフトライド材など残留応力があまり大きくない材料については、このようにして求めた結果と実際の疲労限とはよく一致することが報告されている¹⁸⁾。しかし、浸炭焼入材などではみかけの推定疲労限 σ_{w0} は実測値 σ_w よりかなり小さい値であるといわれている¹⁹⁾。本実験の場合も Table 1 に示すように推定値 σ_{w0} は実測値 σ_w より小さい。

以上のことは、単純に非硬化部の残留応力の影響のみを考えた場合であるが、つぎに外表面部の残留応力の影響を検討してみる。本実験では応力繰返し後の破断の最終の状態でも外表面部では最大 -400 ~ -500 MPa の、内部非硬化部では 200 MPa 程度の残留応力が存在している。一方、フィッシュアイの起点のき裂が生成し、これが伝播成長してき裂が外表面部の最大圧縮残留応力部付近に達して破断に至る間では、破壊力学的にき裂の進展とその開閉口挙動から考えて、これにはき裂部に作用する上限応力の影響が考えられる。この上限応力は、残留応力に疲労限の応力が加わったものであるが、ここで残留応力は内部から外表面部にかけて勾配をもって存在している。したがってき裂に直接作用する応力として、勾配をもって作用している上限応力との関連が考えられる。そこで、この応力勾配を示すものとして、 $(\sigma_{u2} - \sigma_{u1})/a$ 、 σ_{u2} : 非硬化部の最大引張残留応力部の上限応力、 σ_{u1} : 外表面部の最大圧縮残留応力部の上限応力、 a : この部分間の距離、Fig. 6 に示す)をとり、これと外表面部の上限応力 σ_{u1} との関係調べた結果を Fig. 13 に示す。ここで、外表面部の応力 σ_{u1} が大きいときは応力勾配 $(\sigma_{u2} - \sigma_{u1})/a$ は小となり、両者に明瞭な関連があることが示されている。

上限応力 σ_{u1} は、応力勾配 $(\sigma_{u2} - \sigma_{u1})/a$ と図示のように直線的な相関関係をもつが、この関係を式上処理をすると、応力 σ_{u1} と σ_{u2} の間に直線的な相関関係があることが求められる。そこで、これより両者からそれぞれ



σ_{u1} , σ_{u2} : Upper stresses at the surface part and the unhardened part, respectively a : Distance from the section of the upper stress σ_{u1} at the surface part to the section of the upper stress σ_{u2} at the unhardened part Refer to Fig. 6

Fig. 13. Relation between the stress gradient $(\sigma_{u2} - \sigma_{u1})/a$ and the upper stress σ_{u1} .

れの疲労限の応力を引いたものとしての残留応力 σ_{r1} と σ_{r2} についても、同様に相互に関連した関係があるのではないかと推察される。

実際の破壊にさいして、外表面部の残留応力 σ_{r1} の影響については、その詳細は不明であるが、ひとまずつぎのような評価を行ってみた。これは各条件の試料について実際の疲労限 σ_w から、前述のようにして非硬化部の残留応力 σ_{r2} の影響を考慮して求めたみかけの疲労限 σ_{w0} を引き、これを $\Delta\sigma_w (= \sigma_w - \sigma_{w0})$ とし、これと外表面部の残留応力 σ_{r1} との関係調べた。Fig. 10 に示すように、外表面部の残留応力 σ_{r1} が大きいときは $\Delta\sigma_w$ は比例的に大きくなり、 $\Delta\sigma_w$ と σ_{r1} の間に明瞭な相関関係が得られた。外表面部の残留応力の影響については、このような方法でひとまず評価することができたが、実際の破壊過程における残留応力の影響の詳細は不明であるためこの方法は多分に定性的である。

5. 結 言

高周波焼入れ材の疲れ強さにおよぼす影響を調べるため、各種の熱処理をした試料について応力繰返しによる残留応力の変化を調べた。これには応力負荷時の上限応力および下限応力の変化をもとにして考えるべきであり、ここで外表面部の最大圧縮残留応力部における最大下限応力、および非硬化部の最大引張残留応力部における最大上限応力は応力繰返しにともなっている範囲内の値に変化してゆくことを示した。この変化は負荷応力の

大きさよりむしろ繰返し数に依存し、 10^5 回の繰返しでは残留応力の変化はほとんど終了している。

疲れ強さにおよぼす残留応力の影響については、これには内部の非硬化部の軸方向引張残留応力と、また外表面部の軸方向圧縮残留応力が相互に関連した状態で影響していることを示した。実際の疲れ破壊過程における残留応力の影響の詳細は不明であるが、ここでは内部の非硬化部の最大引張残留応力と、外表面部の最大圧縮残留応力の影響を考慮に入れた簡便な定性的な方法でその影響の評価を行った。なお、ここで硬化部における最大圧縮残留応力の値は、実際には破断後のフィッシュアイ破面上の位置（例えば高周波焼入れ材にショットピーニングを行ったものでは、破断後のフィッシュアイ破面のき裂の端は外表面部の最大圧縮残留応力を示す部分より内部にあらわれる場合がある）のものについて評価を行うべきものと考えられる。これらについては、今後検討を行う予定である。

文 献

- 1) 例えば、中村 宏: 高周波焼入れと疲労強度 (1964) [日刊工業]
- 2) 例えば、日本材料学会材料強度部門委員会、強度設計委員会: 材料, 23 (1974), p. 51
- 3) M. HEMPLE: Klepzig-Fachberichte (1963), p. 371
- 4) 早山 徹: 日本機械学会論文集, 41 (1975), p. 731
- 5) 大内田久, 西田章夫, 早山 徹: 材料, 21 (1972), p. 732
- 6) 宇田川義紘, 栗坂宏政, 清水真佐男, 國尾 武: 日本機械学会論文集, 35 (1969), p. 693
- 7) 林 健吉, 夏目喜好: 材料, 18 (1969), p. 1100
- 8) L. E. LARSON and P. SPIEGELBERG: Harterei Technisch Mitt, 27 (1972), p. 180
- 9) 米谷 茂: 残留応力の発生と対策 (1987) [養賢堂]
- 10) H. WIEGAND and G. TOLASCH: Harterei Technisch Mitt, 22 (1967), p. 330
- 11) 日本材料学会強度部門委員会, X 線材料強度委員会: 材料, 25 (1976), p. 1010
- 12) H. WOHLFAHST: Harterei Technisch Mitt, 28 (1973), p. 288
- 13) K. H. KLOOV, H. KUHN, W. MAGIN and F. SCHOLZ: Harterei Technisch Mitt, 39 (1984), p. 4
- 14) P. STARKER, H. WOHLFAHST and E. MACHERUCH: Arch. Eisenhüttenwes., 51 (1980), p. 438
- 15) 増田千利, 西島 敏, 大平益夫: 日本機械学会論文集 A, 49 (1983), p. 413
- 16) 金属材料疲労設計便覧 (日本材料学会編) (1978) [養賢堂]
- 17) 川田雄一: 金属の疲労と設計 (1972) [オーム社]
- 18) 岡崎章三, 中村 宏, 岡田 満, 鈴木 恵: 材料, 30 (1981), p. 471
- 19) 喜多 清, 清重正典, 高瀬正夫, 中村康彦: 鉄と鋼, 59 (1973), p. 1550