残留オーステナイトの相変態が及ぼす残留応力への影響

中尾 航*, 越宗 昌之**, 松井 勝幸**, 安藤 柱*

Influence of phase transformation of retained austenite on fatigue limit

Wataru NAKAO, Masayuki KOSHIMUNE, Katsuyuki MATSUI, Kotoji ANDO

Accidental temperature rise will cause a significant decrease in the fatigue limit of the steel which has been subjected to the multiple surface treatment of vacuum carbonitriding and double shot peening. The phenomenon was investigated by the volume fraction of retained austenite and residual stress level altered by the tempering temperature. Based on the knowledge of this study, the new methodology to overcome the degradation was proposed. The residual stress and high hardness introduced by vacuum carbonitriding and double shot peening were decreased by tempering with the temperature of 573 K and above due to the decomposition of the retained austenite. The phenomenon makes fatigue limit to the 56 % reduced level. It turned out that the residual stress did not decrease by heating at 573 K, if the residual stress is introduced by double shot peening after tempering with high temperature where the retained austenite was completely decomposed.

Key Words : Fatigue strength, Residual stress, Retained austenite, Shot peening, Carbonitriding

1. 緒 言

圧縮残留応力の導入による疲労強度改善は、極めて有効な手法としてばねをはじめとする多くの機械部材に用いられている。導入された圧縮残留応力は、ステージⅡにおけるき裂伝播抵抗として働く。特に、自動車用部品の多くがそうであるように応力比が正で用いられる部材では、その疲労限度は導入された圧縮残留応力により大きく改善される。これらの知見を基に、安藤[1]は、疲労強度向上指針を以下の三点に注力するよう提案している。

- (1) 部材の硬さを可能な限り大きくする。
- (2) 結晶粒径を可能な限り小さくする。
- (3) 圧縮残留応力を可能な限り深く、大きく導入する。

この指針に基づき、コイルばね[2]や金属ベローズ[3]の疲労限度はそれぞれ70%および140%の向上が図られている。

歯車[4]においても、同様の指針によって疲労限度が70%向上している。歯車はショットピーニングだけでなく浸炭焼入れ処理も同時に施されるのが一般的である。浸炭処理を施すと表面の炭素量が増しMf点は低下するので、浸炭層は残留オーステナイトを多く含んだ組織となる。この残留オーステナイトは、ショットピーニング処理により加工誘起変態を起こす。加工誘起変態は体積膨張の相変態であるために、更なる圧縮残留応力を生み出し、疲労強度向上につながる。

しかしながら、残留オーステナイトの相変態は疲労強度に負の影響も有している。それは、中温度域(250℃付近)での焼戻しによる残留オーステナイトの分解である。これは、硬さの低下をもたらすため、冶金学的には実用性がないといわれている。しかし歯車には摩擦疲労も生じるため、潤滑性が損なわれると、歯面が約300℃(573K)まで上昇すると

Table 1 Chemical composition of the used steel (mass %)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.22	0.27	0.74	0.014	0.01	0.17	0.06	1.09	0.36

Fig. 1 Procedure of the vacuum carbonitriding.

いわれている。現実には、潤滑不良による歯車の破損事故が起きている。よって、残留オーステナイトの相変態と疲労限度を決定する因子との関係性を調査することは、工学的にも興味深い。

そこで本研究では、不意な加熱による残留オーステナイトの分解を模擬し、その場合に生じる残留応力の変化や硬さの変化を調査し、疲労強度への影響を考察する。

2. 実験方法

2.1 供試材と表面改質方法

供試材は、市販のJIS SCM882H鋼である。その化学成分をTable 1に示す。

この鋼材に、真空浸炭窒化処理とダブルショットピーニングからなる複合表面改質を施した。真空浸炭窒化処理は、Fig. 1に示すような二段階の熱処理工程を有している。一つは浸炭過程であり、1193K, 66.7Paの C_2H_2 雰囲気中で2.28ks間熱処理を行う。その後の窒化工程は1123K, 大気圧の NH_3 雰囲気中で1.8ks間熱処理した。両工程の後に、試験片を油焼入れした。真空浸炭窒化処理によって、試験片の表層は炭素濃度0.79wt%, 窒素濃度0.63wt%となる。焼入れマルテンサイトを安定化するために、焼入れ後の試験片は、433Kの大気中で7.2ks間熱処理し、空冷することで、焼戻し処理を施した。熱処理後の試験片表面には、ダブルショットピーニングを施した。1段目には粒径0.7mm, また、2段目には粒径0.08mmのスチールショットを用いた。ショットの硬さは700HVである。ショットピーニング法は空気式直圧型加工方式であり、1段目と2段目のショット圧は292kPaおよび196kPaとした。したがって、それぞれのショットピーニングのアーケハイトは、0.28mm(C)と0.30mm(N)であった。

真空浸炭窒化処理とダブルショットピーニングを施した複合表面改質鋼は、大気中で熱処理を施した。熱処理温度は、373Kから773Kとし、熱処理時間は、10.8ksとした。熱処理後の試験片は、水焼入れした。

2.2 解析手法

深さ方向の残留オーステナイト量分布、残留応力分布、およびビッカース硬さ分布を測定した。内部の物性値は、試験片をウィンドウ法でマスキングし、電解研磨で所定の

Fig. 2 Depth profiles of the volume fraction of the retained austenite in the steels subjected to tempering 473 K, 573 K and 673 K after VCN and DSP.

Fig. 3 Depth profiles of the compressive residual stress subjected to tempering 473 K, 573 K and 673 K after VCN and DSP.

深さまで研磨し測定した。残留応力の測定には、微小部X線応力測定法を用いた。X線応力測定条件は、特性X線：Cr-K α 線，入射X線ビーム径；1.0mmである。応力は、 $2\theta\text{-}\sin^2\phi$ 法にて算出を行った。

3. 結果および考察

3.1 熱処理による残留オーステナイトの分解と疲労強度の低下

Fig. 2, Fig. 3およびFig. 4に真空浸炭窒化およびダブルショットピーニングからなる複合表面改質後に各熱処理を施した試験片の残留オーステナイト量分布、残留応力分布および硬さ分布をそれぞれ示す。図中の灰色の正方形、ひし形、三角形は、真空浸炭窒化およびダブルショットピーニ

ングの複合表面改質を施した後に、それぞれ473K, 573K, 673Kにて熱処理を施した試験片の結果である。同時に、真空浸炭窒化のみを施した試験片および複合表面改質を施した試験片の結果を、白丸および黒丸印で示す。

真空浸炭窒化後の試験片は、多くの残留オーステナイトを含む組織であることがFig. 2よりも分かる。これは、表層に多量に固溶した炭素がMf点を下げているためである。さらに、窒素はオーステナイト安定化元素であるため、これも相乗することで、多量の残留オーステナイトを含んだ組織となっている。真空浸炭窒化後に、ダブルショットピーニング処理を施すと、深さ150 μ m以下の表層の残留オーステナイト量が減少することが分かる。これは、ショットピーニングにより、残留オーステナイトが加工誘起変態を起こしたためである。その結果、Fig. 4に示すように、表層が極めて硬化する。さらに、加工誘起変態に伴う体積膨張は、更なる圧縮残留応力の導入を導くために、表面では、1354MPaという極めて大きな圧縮残留応力となる。このように、ショットピーニング前に存在する残留オーステナイトは、加工誘起変態を引き起こし更なる表面硬化および圧縮残留応力の導入を誘引するため、疲労強度向上に有用である。

Fig. 2から、573K以上の温度における熱処理が、残留オーステナイトを完全に消滅させることが分かる。これは、鉄鋼冶金学の焼戻し現象と完全に一致し、残留オーステナイトは、炭化物と焼戻しマルテンサイトに分解する。この相変態は体積膨張を引き起こすにも係らず、Fig. 3に示すように圧縮残留応力の消滅を引き起こした。特に、複合表面改質後に673Kで熱処理を施した試験片は、残留応力が全深さ範囲において消滅していることが分かる。Fig. 5に表面の残留応力と熱処理温度の関係を示す。図のように、鋼材表面の圧縮残留応力は、残留オーステナイトの分解が起こる

Fig. 4 Depth profiles of the hardness subjected to tempering 473 K, 573 K and 673 K after VCN and DSP.

473Kから573Kの間の温度で急激に減少する。しかも、Fig. 3に示すように、これは、表面部だけでなく、表面改質層すべての残留応力の消滅に対応している。

これらの残留オーステナイトの相変態に起因する残留応力や硬さの変化は、疲労限度を大きく増減する。著者らは、過去の研究[4]において、歯車の疲労限度(σ_{up})を最大圧縮残留応力(σ_{max})と降伏応力(σ_Y)により表現した式を提案している。

$$\sigma_{up} = 0.478 \times (\sigma_Y + \sigma_{max}) - 454 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、降伏応力は硬さと次式の関係有している。

$$\sigma_Y = 3.27 \times HV \quad \dots\dots\dots (2)$$

よって、歯車の疲労限度は最大圧縮応力と硬さにより次のように表される。

$$\sigma_{up} = 0.478 \times (3.27 \times HV + \sigma_{max}) - 454 \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(3)により算出した疲労限度をTable 2に示す。算出結果から、熱処理温度が473Kまで徐々に疲労限度は低下し、それ以上の温度で急激に低下する。熱処理温度が573Kとなると、複合表面改質鋼の疲労限度の56%の1100MPaまで減少することが予想される。

以上のように、573K以上の温度に晒されることにより、ショットピーニング後に存在する残留オーステナイトは分解する。それに伴い、ショットピーニングにより導入された圧縮残留応力が解放する。その結果、疲労限度の大幅な低下が見込まれる。

Fig. 5 Surface compressive residual stress as a function of the tempering temperature.

Table 2 Hardness and the maximum compressive residual stress used in this evaluation.

T (K)	HV	σ_Y (MPa)	σ_{rmax} (MPa)	σ_{up} (MPa)
300	1012	3309	1354	1775
373	956	3126	1245	1635
423	929	3038	1118	1532
473	904	2956	1108	1488
573	830	2714	538	1101
673	743	2430	222	814
773	670	2191	168	673

Fig. 6 Depth profile of the residual stress in the steel subjected to DSP treatment after VCN and tempering at 573 K.

3.2 変則複合表面改質法による圧縮残留応力分布

高温に晒されることによる、急激な圧縮残留応力の低下を抑制するために、次の変則複合表面改質法を提案する。急激な残留応力の低下は残留オーステナイトの熱分解に起因するため、真空浸炭窒化後残留オーステナイトが完全に分解する573Kで焼戻しを行い、その後ダブルショットピーニングを行う。Fig. 6に上記複合表面改質を施した試験片の残留応力分布を示す。比較のために、真空浸炭窒化およびダブルショットピーニングを施した試料および真空浸炭窒化およびダブルショットピーニング後に573Kで熱処理した試料の結果も合わせて示す。得られた結果より、新規変則複合表面改質鋼は、通常の真空浸炭窒化およびダブルショットピーニングからなる複合表面改質を施した鋼に比べ、ほぼ同程度の大きな圧縮残留応力がより深く導入されていることが分かる。しかも、その後573Kにおいて熱処理を施しても残留応力が低下することが無かった。このことから、残留オーステナイトを分解した後に、ダブルショットピー

ニングすることで、不意の温度上昇による疲労限度の低下を抑制することが可能であることが分かった。

4 結 言

不意な温度上昇により、真空浸炭窒化およびダブルショットピーニングからなる複合表面改質を施した鋼材の疲労限度が低下する現象を、残留オーステナイト量、残留応力の観点から調査した。さらに、その対策法を考案しその有用性を調査した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 573K以上の温度に晒されることにより、真空浸炭窒化およびダブルショットピーニングからなる複合表面改質により導入された大きな圧縮残留応力は、残留オーステナイトの分解により大きく低下する。
- (2) 上記残留オーステナイトの熱分解は、56%の疲労限度の低下を導くことが予想される。
- (3) 中温度(約523K)の焼戻しを施し、残留オーステナイトを完全に分解させた後にダブルショットピーニングを施すことで、573Kに加熱されてもショットピーニングにより導入される残留応力が低下しないことが分かった。

参考文献

- 1) K. Ando K. KINZOKU, 75 [6], 6-9, (2005).
- 2) A. Tange and K. Ando, Improvement of spring fatigue strength by new warm stress double shot peening process. Mater. Sci. Tech., 18, 642-648, (2002).
- 3) H. Okada, A. Tange and K. Ando, Study on Improved Fatigue Strength for Metal Bellows Made of High Strength Material SUS631. Transactions JSSR, 49, 1-7, (2004).
- 4) K. Matsui, H. Eto, K. Yukitake, Y. Misaka and K. Ando, Increase in Fatigue Limit of Gears by Compound Surface Refining Using Vacuum Carburizing, Contour Induction Hardening and Double Shot Peening. Trans. Jpn Soc. Mech. Eng. A, 66 [10], 1878-1885, (2000).