弁ばねの疲労寿命に及ぼす表面疵の影響*

寺下 勝** , 小林武夫** , 磯野裕司**
川口康信***, 佐藤仁資***, 蔵本廣志***

Influence of Surface Flaws on Fatigue Life of Valve Springs

Masaru TERASHITA, Takeo KOBAYASHI, Yuji ISONO,
Yasunobu KAWAGUCHI, Hitoshi SATOH and Hiroshi KURAMOTO

Surface flaws on valve springs in automobile engines are one of the crucial factors which affect the fatigue life of valve springs together with harmful non-metallic inclusions and surface decarburization. Through the fatigue tests of high tensile strength springs and nitrided springs with artificial longitudinal flaws, the influence of surface flaws on fatigue lives were investigated.

Fatigue lives of both springs lowered as the depth of flaws increased, however, in this experiment, when flaw depth was not deeper than 0.05mm, no lowering of each fatigue strength was recognized. It was considered as this reason, that the large compressive residual stress of the surface layer effectively suppressed propagation of fatigue crack.

Key Words : Surface flaw, Fatigue life, Valve spring, Nitrided spring, Residual stress

1. 緒 言

近年の自動車の低燃費化の動きに伴い、エンジン用弁ばねにおいても高応力設計が指向されている。そのため負荷応力の増加に対応できる優れた疲労強度を有する弁ばねの要望が強い。現在日本では弁ばね用として、引張強さ1900N/mm²級のSi-Cr鋼オイルテンパー線 (JIS SWOSC-V, SAE9254 相当) が多く使用されているが、この要望に対応するためにSWOSC-Vより引張強さを高めた高強度オイルテンパー線が開発され¹⁾、2段ショットピーニングなどのショットピーニング技術の改善¹⁾と組み合わされて数年前から実用化されている。また窒化処理は表層硬さを増加し、表面に圧縮残留応力を付与するため疲労強度の向上に有効であり、弁ばねへの適用も普及しつつある^{2),3)}。

弁ばねにおいて、表面疵は非金属介在物、表面脱炭などの欠陥と共に疲労寿命に影響を及ぼす重要な要因である。しかし、従来の弁ばねに比べて表層硬さが高いこれら弁ばねの疲労特性に及ぼす表面疵の影響はこれまであまり明確にされていない。

そこで、高強度弁ばね用鋼を用いて人工疵 (縦疵) を付与したオイルテンパー線を試作し、高強度弁ばね及び窒化弁ばねの疲労寿命に及ぼす表面疵の影響を検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材の化学成分

供試材として、JIS SWOSC-Vの引張強さを上回る高強度

弁ばね用鋼として開発・実用化されている鋼を用いた。その化学成分を Table 1 に示すが、SWOSC-Vに比べておもにC含有量を増加することによって引張強さの向上を図っている。また、V, Niの添加により引張強さの増加に伴う靱延性の低下を防いでいる。これらにより通常のSWOSC-Vと同等の延性を保持し、約150N/mm²高い引張強さを有するオイルテンパー線の製造が可能である。参考として Fig. 1 に供試鋼の焼戻し温度と機械的性質の関係をSWOSC-V鋼と比較して示す。

2.2 供試材の製造工程

供試材ばねの製造工程を Fig. 2 に示す。

ここで、疵入り線材 (縦疵) を得る方法として、Fig. 3 に示すように表面手入れを行った155mm角の鋼片表面に片端より長さ方向に次第に浅くなる人工溝を切削加工し、熱間圧延により線径φ7.0mmの線材を製作した。鋼片での人工溝深さは、素線径φ3.2mmのばねで疵深さが0~0.3mm程度になるように設定した。また、ばねで最大応力がかかるばね内側にいずれかの疵がくることを狙って鋼片の四面に人工溝を加工した。

線材圧延以降は Fig. 2 に示すように通常の製造工程と

Table 1 Chemical composition of steel tested (mass%)

Grade	C	Si	Mn	Ni	Cr	V
Steel A	0.60	1.48	0.70	0.31	0.87	0.06

原稿受付日 1994年9月26日

* ばね技術研究会, 1993年度秋季講演会及び Wire Association International, 1994年 64th Annual Convention にて発表

** サンコール (株) (Suncall, Corporation)

*** (株) 神戸製鋼所 (Kobe Steel, Ltd.)

Fig. 1 Relationship between tempering temperature and mechanical properties

Fig. 2 Manufacturing process of springs tested

Table 2 Mechanical properties of oil-temperd wire used for experiment

diameter (mm)	0.2%Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
φ 3.2	1800	2048	4.0	54

同一である。Table 2 にオイルテンパー線の機械的性質を示す。

ばね成形後の製造工程も Fig. 2 に示すが、窒化処理を施さないばね（SP のみのばね：SP only Spring と表す）と窒

Table 3 Treatment conditions of spring

Stress relieving	Temp. 673 K, Time 20 min
Nitriding	Temp. 703 K, Time 180 min
Shot-peening	Shot diameter φ 0.6 mm Shot velocity 73 m/sec Peening time 40 min
Strain aging	Temp. 493 K, Time 20 min
Setting	Setting stress 1176 N/mm ²

Table 4 Dimension of springs tested

Wire diameter	φ 3.2 mm
Mean coil diameter	φ 21.2 mm
Total number of coils	6.5
Active number of coils	4.5
Free height	50 mm

Dimensions of flaw at portion A

Fig. 3 Artificial flaws machined on billet

Table 5 Measurement conditions of residual stress

X-ray used	CrK α
Filter	V
Tube voltage	40 kV
Tube current	45 mA
Window of slit	φ 0.5 mm
Measurement direction	$\pi/4$ rad against wire axis

化処理を施したばね（窒化ばね：Nitrided Spring と表す）を製作した。ばね製造条件を Table 3，供試ばねの諸元を Table 4 に示す。

2.3 試験方法

2.3.1 疲労試験

疲労試験に供するばねはコイリング時に断続的にサンプリングし、疵深さ毎にグルーピングした。

各グループのばねを抜き取りでサンプリングし疵深さを測定し、ばね疲労試験に供する時の目安にした。

Fig. 4 Surface flow depth for each spring group

Fig. 5 Fatigue test results of springs without artificial surface flaw

ばねグループ毎の疵深さを Fig. 4 に示すが、グループ順に平均値で 0 ~ 0.25mm と変化しており、当初の計画どおりの疵深さが得られた。

ばね疲労試験は油圧サーボ試験機を用いて変位制御で行い、繰返し数は 5×10^7 回で中止とした。まず人工疵のない SP のみのばね及び窒化ばねについて応力振幅と疲労寿命の関係を調べ各々の疲労限を求めた。次に疵入りのばねについて、求めた疲労限応力で試験し疵深さと疲労寿命の関係を求めた。

また、参考のために SWOSC-V の疵なし (SP のみ) のばねについても疲労限を調査した。

2.3.2 硬さ、残留応力分布

一般的に、ばねにおける疲労破壊はばね内側表面を起点とするため、ばね内側の表層部の硬さ及び残留応力分布をコード法⁴⁾及び X 線応力測定装置を用いて測定した。残留

Fig. 6 Relationship between flaw depth at failure initiation point and fatigue life of shot-peened springs

Fig. 7 Measurement of flaw depth of fracture initiation point

応力は化学研磨しながらばね内側を表面から深さ方向に測定を行った。残留応力測定条件を Table 5 に示す。

3. 実験結果

3.1 疲労試験

人工疵のない正常なばねの場合の応力振幅と疲労寿命の関係を Fig. 5 に示す。疲労破壊の起点はすべてばね内側表面部であった。供試鋼 A の疲労限応力振幅は SP のみのばねが約 440 N/mm^2 、窒化ばねが約 530 N/mm^2 であり、SWOSC-V に比べてそれぞれ約 30 N/mm^2 及び約 120 N/mm^2 向上した。

疵入りばねの場合の疲労折損起点部の疵深さと疲労寿命の関係を Fig. 6 に示す。疲労折損起点部の疵深さは、疲労破面からは正確に判定できなかったため、Fig. 7 に示すように折損起点部から 3 ~ 5 mm 離れた位置の横断検鏡面における起点に対応する疵の深さを採用した。また、 5×10^7

Fig. 8 Typical examples of fractured surface and flaw profile of microscopic cross section

回で折損しなかったばねについては端から 1.5 巻目の断面のばね内側に位置する疵の深さを採用した。折損破面及び横断検鏡面の疵形状の代表例を Fig. 8 に示す。

Fig. 6 に示すように SP のみ及び窒化ばねともに、疵深さが深くなるにつれて疲労寿命は低下していった。しかし、両者とも疵深さが 0.05mm 程度以下の場合では、繰返し数 5×10^7 回で未折損であり疲労強度の低下は認められなかった。

3.2 硬さ分布

Fig. 9 にばね表層硬さ分布の測定結果を示す。供試鋼 A の SP のみの表層硬さは SWOSC-V に比べて HV40 程度高く、ほぼオイルテンパー線での引張強さの増加に相当していた。窒化ばねの表層硬さは HV900 以上に達しており SP のみに比べて大幅に上昇していたが、表面からの深さが 0.05mm 程度以上の内部硬さは窒化による軟化のため SP のみの場合より低くなっていた。

3.3 残留応力分布

Fig. 10 に残留応力分布の測定結果を示す。窒化のままでかなり大きな圧縮残留応力が表面に付与されるが、内部に入るにつれその値は急激に低下していた。

窒化後にショットピーニングを施すと、窒化のままのものと比較して最表面の圧縮残留応力値は若干低下するが、圧縮残留応力の最大値はほとんど変わらず、その位置は表面から深さ 0.05mm 程度に移っていた。

また今回のショットピーニング条件では、SP のみの場合に比べて窒化後ショットピーニングを施した窒化ばねの表層部の圧縮残留応力値は大きかった。

4. 考 察

4.1 疵なしばねの疲労強度

疲労寿命は主に表層部の硬さや圧縮残留応力に依存することが知られている。

Fig. 5 に示すように SWOSC-V に比べて供試鋼 A の SP のみのばねの疲労強度が向上したのは、おもに表層の硬さが高く疲労の第 1 ステージである初期き裂が発生しにくいためと考えられる。また、窒化ばねの疲労強度が大幅に向上したのは表層の硬さの大幅な増加に加えて、疲労の第 2 ステージであるき裂の進展を抑制する圧縮残留応力も増加したためと考えられる。

4.2 疵入りばねの疲労寿命

表面疵が存在する場合、疵先端における硬さが低く、また圧縮残留応力が高い方が、疵からの疲労き裂の進展が抑制され疲労寿命が長くなると考えられる。

供試鋼 A の疵先端部の硬さ分布測定結果を Fig. 11 に示すが、SP のみ及び窒化ばねともに疵のない場合とほぼ同様の分布であり、疵深さ 0.05mm 以上の疵先端の硬さは窒化ばねの方が SP のみのばねより低い。また、疵先端部の圧縮残留応力も窒化ばねの方が高いと考えられる (Fig. 10)。これらのことより、Fig. 6 に示したように SP のみに比べて窒化ばねの方が負荷応力が高いにもかかわらず、同じ疵深さに対して同程度の疲労寿命になったものと考えられる。

また、SP のみ及び窒化ばねともに疵深さが 0.05mm 程度以下では疲労強度に影響を及ぼさなかったのは、今回のショットピーニング条件ではいずれも圧縮残留応力が表面か

Fig. 9 Hardness distribution of shot-peened springs

Fig. 10 Residual stress distribution of springs of steel A

Fig. 11 Hardness distribution from surface flaw tip to inside

Fig. 12 Relationship between flaw depth at failure initiation point and fatigue life of nitrided and as-nitrided springs

ら 0.05mm 付近で最大になっており、これが有効に作用したものと考えられる。

このことを確認するために、表面から内部にかけて圧縮残留応力が連続的に低下している窒化のままのばね（As nitrided Spring）を用いて疵深さと疲労寿命の関係を調査した。その結果を Fig. 12 に示すが、窒化後ショットピーニングを施した窒化ばねに比べて窒化のままのばねは疲労寿命が短くなっている。

Fig. 13 に負荷応力に残留応力を加算した合成応力分布を示すが、窒化ばねの方が表層部の合成応力が低く、表面から約 0.15mm で窒化のままのばねと同程度になっている。この合成応力が疲労寿命に影響すると考えられ、Fig. 12 に示したように疵深さ 0.15mm 程度では窒化ばねと窒化のままのばねの疲労寿命はほぼ同程度であるのに対し、それ以下の疵深さでは窒化ばねの方が疵先端付近の圧縮残留応力が高く、したがって合成応力が低いため疲労寿命が長くなったものと考えられる。

5. まとめ

人工疵（縦疵）を有した高強度弁ばね及び窒化ばねの疲労試験を行い疲労寿命におよぼす表面疵の影響を調査した結果、以下のことがわかった。

- (1) 両ばねとも疲労寿命は疵深さが深くなるにつれて低下した。
- (2) しかし、疵深さが 0.05mm 程度以下では疲労強度の低下が認められなかった。

この理由としては、ショットピーニングまたは窒化とショットピーニングの組み合わせにより導入される表層部の大きな圧縮残留応力が有効に作用したためと考えられる。

- (3) これらのことより、表面疵はできる限り浅くすることが当然必要であるが、疲労寿命に対して表面疵の影響を小さくするにはとくに表層部の圧縮残留応力を高めることが重要である。

Fig. 13 Distribution of residual stress and resultant stress

参考文献

- 1) M. Abe, T. Taniguchi, T. Kuriki, K. Saitoh, N. Takamura, "Development of a high strength valve spring", SAE Technical Paper Series, No. 890220, 1989.
- 2) 萩原好敏, 伊藤幸生, 小曾根敏夫, 山田勝彦, 林 博昭, 小野田光芳, ばね論文集, No.35, (1990), 13.
- 3) 草刈 亘, 青木利憲, ばね技術研究会, 秋季講演会 (1990) 23.
- 4) R. H. Gassner, Metal Progress, March (1978), 59.