ショットピーニングによって発生するナノ結晶層の調査と 疲労強度に及ぼす影響*

間野日出男**, 近藤 覚**, 近田和明***, 井村 徹***

Study of nanocrystalline surface layer induced by shot peening and its effect on fatigue strength.

Hideo MANO, Satoru KONDO, Kazuaki KONDA, Toru IMURA

The shot peening process is known to produce a hard layer called white-layer on the surface of coil springs. However, little is known about the fatigue properties of this white-layer.

In this study, coil springs with white-layer were investigated. The surface of these springs was examined by micro Vickers hardness tester and FE-SEM. to evaluate fatigue strength of the springs.

It was found that a microstructure of the white-layer with an average cell size of about 100 nm was observed, with a Vickers hardness rating of 1,000HV.

Sample springs were manufactured in two groups utilizing a double-peening process. These springs had the same residual stress distribution and surface roughness. There is only one difference: one group had a nanocrystalline layer on the surface, while the other did not. The results of the fatigue test shows an increase of the fatigue life for the springs with nanocrystalline surface layer by approximately 10%.

Key Words : Shot peening, nanocrystalline, fatigue strength, surface layer

1. 緒 言

近年の機械部品のコスト削減に伴い、処理費用の高価な表面硬化熱処理の代わりに、強いショットピーニングを施す方法が報告されるようになった²⁾。

しかし、窒化処理を行わないばねに強いショットピーニングを行うと、ばね表面の一部に「白層」と呼ばれる、母相よりも硬い加工変質相が発生することが知られている。Fig. 1に強いショットピーニングによってばね表層に発生した白層の光学顕微鏡写真を示す。Fig. 1に示した様に、ショットピーニングにより発生する白層は、エッチング後の断面組織においてばねの最表面や表面直下に白いひげ状の組織として観察される。この白層は高速の粒子衝突により鉄鋼表面に生成する組織として古くから知られており、硬さが高く、腐食に強いことなどからマルテンサイト相であると考えられてきた³⁻⁵⁾。ところが最近になって、極めて微細なフェライト組織であるとの説も提唱されるようになった⁶⁻⁸⁾。しかし、その詳細は明らかにされていない。

そこで、本研究では、加工変質相の構造と性質を調査するとともに、白層の疲労強度に及ぼす影響を調査した。

Fig. 1 Optical microscope image of white-layer.

原稿受付日 2004年9月30日

* ばね技術研究会 2003年度秋季講演会にて発表

** (株)東郷製作所 TOGO SEISAKUSYO CORP.

*** 愛知工業大学 Aichi Institute of Technology

2. 実験方法

2.1 供試品

供試材には弁ばね用Si-Cr鋼オイルテンパー線SWOSC-Vを使用した。化学成分はTable 1に示し、供試ばねのばね諸元はTable 2に示す。供試ばねは低温焼なまし・座面研削工程まで同一ロットで作製し、異なる条件のショットピーニングを行った。その製造工程をFig. 2に示す。また、ショットピーニング条件をTable 3に示す。作製したばねはA, B, Cの3種類である。ばねAは投射材粒径 $\phi 0.8\text{mm}$ を7200s投射したばねである。ばねBは $\phi 0.6\text{mm}$ の投射材を1800s投射することにより作製した。ばねCは $\phi 0.25\text{mm}$ の投射材を3000s投射した後に $\phi 0.6\text{mm}$ を1800s投射した2段ピーニングとした。投射材 $\phi 0.6\text{mm}$ と $\phi 0.8\text{mm}$ のショットピーニングは遠心型インペラ式ピーニングマシンを使用し、どちらの条件も投射速度はおよそ 73m/s である。また、投射材 $\phi 0.25\text{mm}$ のショットピーニングは直圧型エア式ショットピーニング機にて、投射圧力 0.4MPa 、投射量 8.0kg/min にて投射を行った。ばねAと、ばねCの1段目に投射したショットピーニング条件のカバレッジは3000%以上に達する。このようにして作製したばねの表面粗さ、ビッカース硬さ、残留応力を測定した。また、光学顕微鏡、FE-SEMの観察に供した。

2.2 疲労試験

ばねBとCについては、星型ばね疲労試験機にて疲労試験を行った。星型ばね疲労試験は、圧縮コイルばねの性能確

認に用いられる疲労試験方法であり、ばねの実使用状態に近い条件で疲労試験をすることができる利点がある。疲労試験条件は、平均応力 600MPa 、応力振幅は 505MPa 、 530MPa 、 550MPa 、 575MPa の4水準にて5000万回までばねに繰返し負荷を行った。

3. 結果の考察

3.1 ばね表面組織の調査

ばねA, B, C表層部の断面組織写真をFig. 3に示す。ナイタルでエッチングした組織を観察した。Fig. 3の光学顕微鏡写真ではばねA, B, Cを比較すると、内部の組織に違いは見られないが、ばねAとCの表層部には表面全体にわたり一様に厚さ $2\mu\text{m}$ 程度の白層が観察されるが、ばねBには表面に白層は観察されなかった。ばねAとCに見られる白層はエネルギーの高い投射条件のピーニングで発生した層であり、同じ組織であると考えられる。そのため、白層の調査はば

Fig. 2 Manufacturing process of specimens.

Table 1 Chemical composition of wire (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr
0.57	1.43	0.7	0.02	0.006	0.01	0.68

Table 2 Dimensions of test springs

Wire diameter (mm)	$\phi 3.2$
Mean diameter of coil (mm)	20.0
Active number of coil	4.0
Total number of coil	6.0
Free height (mm)	47.0
Spring rate (N/mm)	32.0

Table 3 Conditions of shot peening

Specimen	Peening step	Shot media		Peening time (s)
		size (mm)	Hardness (HV)	
Specimen A	—	0.8	700	7200
Specimen B	—	0.6	550	1800
Specimen C	first	0.25	800	3000
	second	0.6	550	1800

Fig. 3 Optical microscope image; (a) specimen A, (b) specimen B, (c) specimen C

Fig. 4 FE-SEM image; (a) (b) specimen A, (c) specimen B

Fig. 5 Indentations on white layer and matrix phase of specimen A.

ねAで行うこととした。ばねAとBの表層部分をFE-SEMの反射電子像で観察した写真をFig. 4に示す。Fig. 4の (a), (b) は、Fig. 3 (a) に示したばねA表層の白層組織を観察したFE-SEM像である。Fig. 4 (c) は、Fig. 3 (b) に示したばねBの表層部分のFE-SEM像である。Fig. 4の写真 (a) の上方に位置する微細な組織が白層でありばねAの表面から2 μ m程度の厚さがある。また、白層よりも内側では、結晶粒が潰れて塑性流動層となっている。塑性流動層は母相と連続した組織であるが、白層は塑性流動層と不連続な組織であるように見える。この微細組織を拡大して観察 (写真 (b)) すると、それは、母相の焼戻しマルテンサイト相とも塑性流動層とも全く異なる、粒径100nm前後の粒構造が観察される。梅本らの研究⁹⁾によると、鉄鋼材料の表面がショットピーニングによってナノ結晶化することが認められていることから、このFig. 4 (b) の写真に見られる組織はナノ結晶組織であると考えられる。ばねB (写真 (c)) では塑性流動層が認められるものの、ナノ結晶組織は観察されなかった。

以上から、エッチング組織の光学顕微鏡観察で白色に見

Table 4 Surface roughness

	Rz (μ m) *	Rc (μ m) *
Specimen A	24.5	15.9
Specimen B	10.4	7.0
Specimen C	10.2	7.4

* JIS B0601₂₀₀₁

Fig. 6 Distribution of residual stress.

える白層は、ショットピーニングによる塑性流動層のさらに表層側に発生する粒径100nm程度のナノ結晶組織であることがわかった。FE-SEMによる観察はばねAについてのみ行ったが、ばねC表層の白層もばねAと同様ナノ結晶であると考えられる。

次に、ナノ結晶相の硬さを測定した。母相の硬さが620HVであるのに対し、ナノ結晶相は1020HVという大きな値を示した。これは母相に対して60%以上の硬さの増加であり、圧延や引抜きなどの加工によって通常達成できる加工硬化量を超えるものである。これは、ナノ結晶相が母相組織とは全く異なる組織であるためと思われる。Fig. 5にナノ結晶相についた圧痕の様子を示す。この写真からは、ピッカースの圧痕は、四隅が明確でありクラックも見られない。ナノ結晶相は硬いが、必ずしも脆性的な性質を持つ組織ではないことがわかった。

ナノ結晶が見られたばねAは、ショットピーニングによる投射エネルギーがばねBに比べて大きいから、ばね表層部分の塑性変形量が大きいと考えられる。強加工による結晶粒の微細化は、MA (メカニカル・アロイング) プロセスなどで報告されている^{10) 13)} 現象である。大歪塑性変形を繰り返して材料に与える方法であることが、MAプロセスはショットピーニングと共通する。そのため、ショットピーニングによっても強加工による結晶粒微細化が起こったと考えられる。

Fig. 7 S-N diagram of specimens

3.2 表面粗さと残留応力

Table 4にばねA, B, Cの表面粗さ測定結果を示す。表面粗さ測定結果からは、ばねAの表面粗さが大きく、ばねBとCは近い値を示している。ばねAで表面粗さが大きい理由は投射材が $\phi 0.8\text{mm}$ であるため粒径の影響で凹凸が大きくなったと思われる。また、ばねBとCの表面粗さが同等である理由は、ばねCに施した2段ピーニングの場合、2段目の投射条件が表面状態に大きく影響する為である。

Fig. 6に残留応力測定結果を示す。投射材の粒径により残留応力分布が異なっている。ばねCでは、2段目 ($\phi 0.6\text{mm}$) が1段目 ($\phi 0.25\text{mm}$) の投射材よりも粒径が大きく、2段目の残留応力分布が表面値、最大値、クロッシングポイントとも1段目の値を上回っている。そのため、2段目の残留応力のみが残ることになる。結果として、 $\phi 0.6\text{mm}$ のみのばねBと2段ピーニングを行ったばねCの残留応力分布は同等となった。

よって、ばねBとCは、表面粗さ、残留応力分布が同等で、表面のナノ結晶相の有無のみが違うばねである。

3.3 疲労試験

疲労強度は、表面粗さ、残留応力分布が大きく影響するため、ナノ結晶相の疲労強度に及ぼす影響を調査するためには、表面粗さ、残留応力分布が同等で、且つ、表面のナノ結晶相のみが異なるばねで比較する必要がある。ばねBとCは、表面粗さ、残留応力分布が同等であり、表面のナノ結晶相の有無にのみ違いがあるため、この2種類のばねの疲労強度を比較することによりナノ結晶相の疲労強度に及ぼす影響が明らかになると考えられる。

疲労試験の結果をFig. 7に示す。Fig. 7より、ナノ結晶相を持たないばねBは、応力振幅550MPaで200万回付近、応力振幅505MPaでは800万回付近で比較的まとまって折損している。このばねBと残留応力・表面粗さが同等でありながら表層に白層を有するばねCは、ばねの折損回数がばねBと

Fig. 8 SEM image of typical fracture, $\tau_m \pm \tau_a = 600 \pm 548$ (MPa); (a) specimen B, (b) specimen C

比べて長寿命側にシフトしている様子が見られる。1000万回での疲労強度を比較すると、ナノ結晶相のないばねBの疲労強度は $\tau_m \pm \tau_a = 600 \pm 490\text{MPa}$ 程度であるのに対して、白層のあるばねCの疲労強度は $\tau_m \pm \tau_a = 600 \pm 535\text{MPa}$ 程度であった。すなわち、疲労強度は、表層に白層を有するばねCがばねBと比べて応力振幅がおおよそ10%高いという結果となった。このことから、表層の白層には疲労強度を向上させる効果があると考えられる。

Fig. 8に、折損したばねの代表的な破面のSEM写真を示す。ばねB, Cとも線軸方向の表面ファセットが認められ、ナノ結晶相の有無による破面の違いは認められなかった。ナノ結晶相は表層の $2\mu\text{m}$ 程度であるため、破面としては違いが現れなかったと思われる。

表層にナノ結晶相がある、ばねCの疲労強度が高かった理由として、ばね表面の高靱性で硬い白層が初期クラックの発生を抑制していることが考えられる。白層が表面硬化層として作用したためであると考察される。

4. 結 言

従来、ショットピーニングによってばね表面に母層よりも硬い「白層」が発生することは知られていたが、この白層の性質と疲労強度に及ぼす影響を詳しく調査した事例はなかった。本研究において、ショットピーニングにより発生する白層を調査し、以下の結論を得た。

- ① ばねAにて得られた結果として、ショットピーニングにより発生する白層は、結晶粒径100nm程度のナノ結晶からなり、その硬さは1000HVに達する。
- ② 表層残留応力と表面粗さが同等のばねで比較すると、ばね表層に白層を有するばねは、表層に白層を有しないばねよりも疲労強度がおおよそ10%向上することがわかった。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、愛知工業大学工学部 高木誠教授、名古屋大学工学部 松室昭仁助教授にご協力を頂きました。ここに心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 俊野英男, 重岡公彦, 高木伸雄, ばね論文集, No.36, (1991), 47.
- 2) MIYA, Y., SUZAWA, M., ARIMI, Y., KOJIMA, Y., and NISIMURA, K., SAE Tech. Pap. Ser. (Soc. Automot. Eng.) SAE-880666, (1998), 9.
- 3) McIntire, H.O. and Manning, G.K., Metal Progr. 74, (1958), 94
- 4) Glenn, R.C. and Leslie, W.C., Metall. Trans. 2 (1971) 2945
- 5) 小松., 他, マツダ技報, 5, (1987), 165.
- 6) Liu, G., Lu, J., Lu, K., Mater. Sci. Eng. A286, (2000), 91.
- 7) Liu, G., Wang, S.C., Lou, X.F., Lu, J., Lu, K., Scrip. Mater. 44 (2001), 1791.
- 8) Umemoto, M., Todaka, Y., and Tsuchiya, K., Mater. Trans. 44, (2003), 1488.
- 9) 戸高義一, 梅本実. 渡辺幸則, 土谷浩一, 日本金属学会誌, 67, (2003), 690
- 10) Langford, G., Metall. Trans. 8, (1977), 861.
- 11) 飛鷹秀幸, 木村勇次, 高木節雄, 鉄と鋼, 85, (1999), 52.
- 12) Umemoto, M., Liu, Z.G., Xu, Y., and Tsuchiya, K., Materials Science Forum, 386-388, (2002), 323.
- 13) Tsuji, N., Ueki, R., Minamino, Y., and Saito, Y., Scrip. Mater. 46, (2002), 305.