

(解説)

急速加熱モノストランド処理による弁ばね用オイルテンパ線の特性とその高強度化

High Strength Oil-tempered Steel Wire for Valve Springs Manufactured by Rapid Heating Mono-strand Process



神保鉄男*
Tetsuo Jinbo



藤原忠義*
Tadayoshi Fujiwara



須田澄恵**
Sumie Suda



茨木信彦**
Nobuhiko Ibaraki

Conventionally, oil-tempered steel wires for valve springs are manufactured in multi-strand type furnaces. This article describes the characteristics of a rapid heating mono-strand oil-tempering furnace equipped with a high frequency induction heater. Also discussed are the special features of high strength oil-tempered wires produced by this new type of furnace. Shinko Wire Co., Ltd. successfully developed this kind of wire in response to the need for downsizing and weight reduction for automobile engine valve springs. This kind of wire reduces overall vehicle fuel consumption and thus fits in with the growing trend towards environmental preservation.

まえがき = ばねの基本的な要求特性は、所要のばね特性を持ち、何より先ず、折れない・へたらないという点にあり、長期間に渡って、その信頼性が高いことが必須である。特に弁ばねは、1 分間に数千回もの繰返荷重を車一代の長期に渡って受けるものであるため、高度の信頼性が要求される。さらに地球環境保全、省資源などを目的として車の軽量化や燃費の向上のために、弁ばねには小型化が要求され、それに伴って弁ばね用線には高強度化・細線化・異形断面線化などが求められてきた。

従来、弁ばねには弁ばね用ピアノ線、弁ばね用炭素鋼オイルテンパ線、弁ばね用 Cr-V オイルテンパ線などが使われてきたが、近年は高強度・耐へたり性の点で優れている弁ばね用 Si-Cr オイルテンパ線の使用が主流となり、特に最近では、日本国内のみならず海外でも、高強度 Si-Cr-V オイルテンパ線も多く使われるようになってきた。神鋼鋼線工業㈱では、弁ばね用オイルテンパ線を国内外の他メーカーと異なる急速加熱モノストランド(1 本通し)法で生産しており、その特徴を生かして、カーメカ、ばねメーカーの協力のもとに各種高強度弁ばね用オイルテンパ線を競合他社に先駆けて開発してきた。

本稿では、オイルテンパ線の製造方法の特徴と弁ばね用オイルテンパ線の高強度化の経緯について紹介する

1. 急速加熱モノストランド処理による弁ばね用オイルテンパ線の製造

1.1 狙いとする品質特性とそれを作り込むための製造工程

弁ばね用オイルテンパ線の製造方法においては、考え方として図 1 に示すように、ユーザであるばねメーカーにおいて“良いたばね”を“効率良く”生産できるような弁

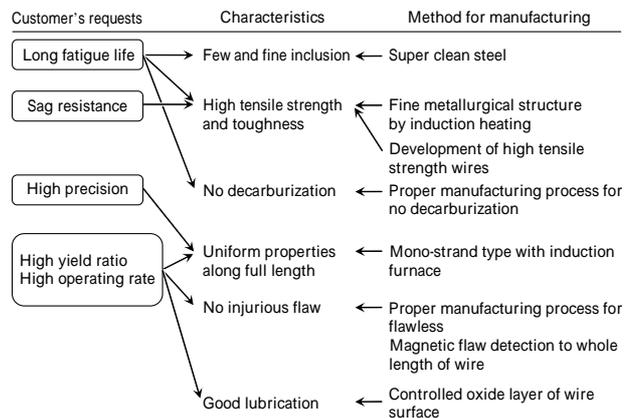


図 1 弁ばね用オイルテンパ線の製造についての考え方
Fig. 1 Important points about production of oil-tempered steel wire for valve spring

ばね用鋼線を提供できるように考えてきた。すなわち良いたばねとは、精度が良く、高疲労限度を有し、へたりが少ない信頼性の高いばねであり、高疲労限度のためには、高強度・高靱性で耐久性に悪影響を及ぼす疵や脱炭がなく、非金属介在物のような内部欠陥のない線材が必要である。また、ばねの生産効率については、ばねの生産において歩留まりや稼働率に影響の大きいコイリング加工性の良いことが重要で、加工時の潤滑性が良く、工具の傷みが少ないこと、及び線 1 条中において全ての特性でばらつきが少なく、かつ高強度材であっても加工中の折損トラブルなどがない線材が必要である。

神鋼鋼線工業㈱では、このような良いたばね用鋼線とすべく、優れた強度・靱性、脱炭防止、疵保証、コイリング性、オーバル線のねじれ防止などに配慮した製造方法とした。弁ばね用オイルテンパ線の製造工程を図 2 に示す。

*神鋼鋼線工業㈱ 技術部 **鉄鋼部門 神戸製鉄所 糸鋼開発部

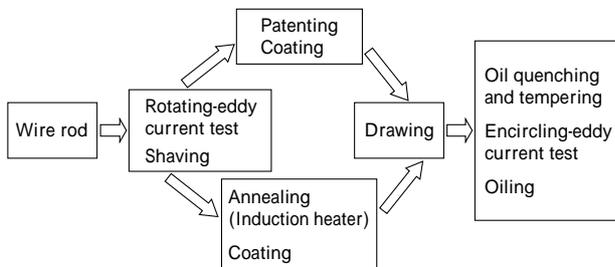


図2 弁ばね用オイルテンパ線の製造工程

Fig. 2 Manufacturing process of oil-tempered steel wire for valve spring

1.2 オイルテンパ前素線の製造方法

使用している素材は全て、非金属含有物の無害化を図るため、介在物組成制御を(株)神戸製鋼所神戸製鉄所で行った弁ばね用鋼線材である。

鋼線の製造工程としては、まず回転型渦流探傷機にて縦割疵の有無を検知後、線材全長に渡って線表面を全面皮削りすることにより、線材の表面に存在する脱炭層の除去と探傷機の検出限界以下の小さい疵をも除去する。次に、伸線加工に適した均一な組織を得るための熱処理（パテンティング、もしくは高周波炉焼鈍）を施し、伸線用ダイスへの潤滑剤の持込みを良くするためのコーティング処理をインラインで実施する。さらに、連続伸線機により数枚のダイスを通して伸線加工を施し、適当な表面粗度とし、所要の線径や異形断面（オーバルが主）とした後にオイルテンパ処理に供している。

1.3 オイルテンパ処理方法

オイルテンパ線の熱処理炉は、10本程度のワイヤが並列して同時に、加熱焼入焼戻処理されるいわゆるストランドタイプの炉が一般的である。その際の加熱は、一般的にはパイプ中で保護雰囲気とした間接加熱炉が用いられ、油焼入後、溶融鉛炉、雰囲気炉、流動層炉などを用いて焼戻しされる。この場合線の加熱速度は余り速くないので、均一オーステナイト化を終えた時点の結晶粒はある程度成長せざるを得ない。

微細なオーステナイト結晶粒を得るためには、急速加熱でオーステナイト域の所定温度まで瞬時に加熱し、短時間保持することによって結晶粒の成長を抑えることが必要で、その結果、微細で長さ方向にもばらつきの少ない金属組織が得られる。このような考え方に立ち、焼入・焼戻しの加熱方式として高周波誘導加熱炉を用いた1本通しのオイルテンパ炉を採用した。オイルテンパ炉の概要を図3に示す。この炉の特徴は以下の諸点である。

- 1) 1本通しであり、加熱温度も高周波加熱装置の出力で容易に調整できるので、鋼種・線径に合わせた適正条件を容易に選択できる。すなわち、条件変更が容易であるので、生産計画の変更などに対する柔軟性が高い。
- 2) 高周波加熱炉の後方に雰囲気調整した保持炉を設けたことにより、油焼入直前まで線温を一定に保ち、かつコイリング加工時の潤滑性の点で重要な線表面の酸化皮膜を適度な組成と厚さで生成させている。
- 3) 諸製造条件のみならず、焼入・焼戻しの高周波加熱後に線温そのものをモニタし、製品1束ごとの管理

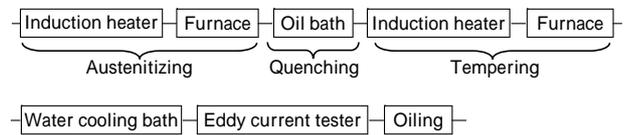


図3 急速加熱モノストランドオイルテンパ炉

Fig. 3 Rapid heating mono-strand oil-tempering furnace

を行い、厳密な品質管理をしている。

- 4) ライン中に貫通型の渦流探傷機を組み込み、工程疵の検知を行い、かつ防錆油の塗布もライン中で実施し工程数を減少させた。
- 5) 停止・稼働が容易に行え、故障修理などにおいても炉の冷却・再加熱に要するメンテナンス時間が短い。

2. 弁ばねの高性能化

2.1 弁ばねの製造技術の進歩

コイルばねには線表面に最大の応力がかかるにもかかわらず、線表面は基本的にある程度の凹凸を持ち、しかも脱炭層や疵も存在しがちなため弱点となる。弁ばねの高品質化のために、この線表面の改質に多くの努力がばねメーカーにより払われてきた。特に、ショットピーニング技術の開発により、負荷応力が最大で、材料上も弱点となる可能性が高いばね表面に圧縮残留応力を導入し、最大応力部である線表面への実応力を低下させるとともに、表面を加工硬化させ、大幅な疲労寿命延長を達成した。このショットピーニング技術は1930年代にアメリカで開発されて以降、種々の開発・改良が加えられ、例えば温間ピーニング、応力下でのストレスピーニング、多段ピーニング、ハードショットピーニングなどの開発により、付与される表面圧縮残留応力が高く、かつ深いクロッシングポイント（圧縮残留応力が引張残留応力に変わる深さ）が得られるようになり、耐疲労性の向上に大きく寄与^{1)~3)}した。さらに、窒化処理を施すことにより表層近傍がさらに強化され、耐疲労性の向上に寄与した。

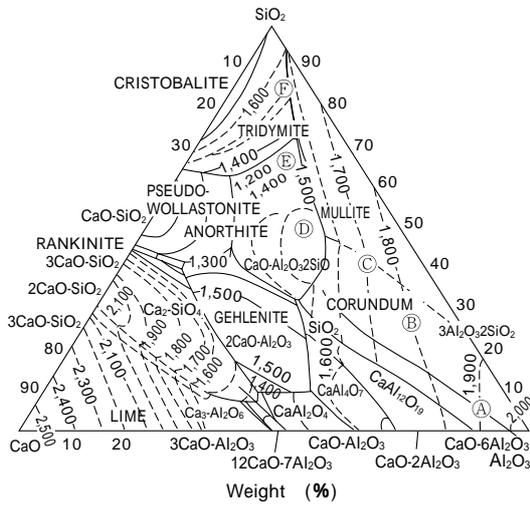
また、ばね製造の最終工程においてセッチング⁴⁾、ホットセッチングなどの処理を行うことにより、ばね使用中のへたりも減少させた。

加えて、高速での繰返応力が負荷された際、ばねの固有振動数と駆動振動数が一致するとサージングと呼ばれる共振現象を起こし、ばねに過大応力が発生して破壊の原因となる。これを防止するための不等ピッチばねの開発や異形断面線（主にオーバル形状）の使用により、線断面における実応力を均一化し、かつ、ばねの密着高さを低くしてばね高さを減少させるなど、ばね設計面からも種々改良がなされた。

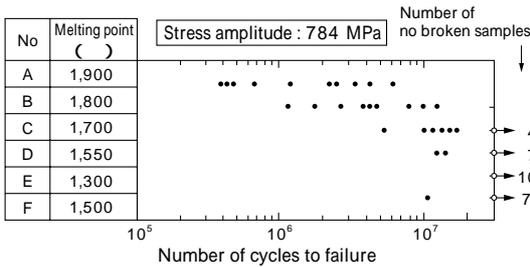
このようなばねメーカーによる多くの技術開発と、線材の高強度化が相まって弁ばねの高性能化が計られ、車の燃費改善・軽量化などに寄与してきたものである。

2.2 弁ばね用鋼の超清浄化技術の進歩

ばねのショットピーニング及び窒化処理などにより、線表面部が強化され、実質的な応力最大部が線表面下0.2-0.3mmの位置に移動したことにより、ばねは、表面近傍の内部にある大きさの非金属含有物が存在すると、それを起点に疲労破壊することがある。



a) Chemical compositions of non-metallic inclusion in billet



b) Fatigue test results

図4 鋼片介在物の組成と疲労寿命の関係⁵⁾

Fig. 4 Relationship between chemical compositions of non-metallic inclusion in billet and fatigue life⁵⁾

（株）神戸製鋼所では、世界に先駆けて弁ばね用素材の非金属介在物の低減と無害化に取組み、超清淨鋼を開発⁵⁾した。非金属介在物の組成とばねの耐久性の関係を図4に示す。非金属介在物を低融点領域に組成制御することにより、熱間圧延時あるいは冷間加工時に小型化され、無害化を図ることができることが判明した。

2.3 弁ばね用オイルテンパ線の高強度化

2.3.1 オイルテンパ線のメニュー

鋼網鋼線工業（株）の弁ばね用オイルテンパ線製品メニュー及びその化学成分を表1に示す。鋼種として5鋼種、製品名で6種あり、JIS G 3561 弁ばね用 Si-Cr オイルテンパ線 SWOSC-V とそれを超える高強度材5種を生産している。以下に高強度化への考え方をまとめる。

1) オイルテンパ処理時のテンパ温度低下による高強度化；SWOSC-VU

急速加熱熱処理による粒径の微細化と高周波ラインの処理条件選択の容易さという特徴を生かして、SWOSC-V と同一鋼種を用いてオイルテンパ時のテンパ温度を下

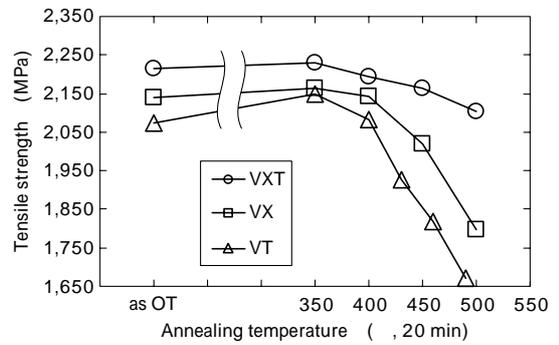


図5 低温焼鈍温度における引張強さの変化

Fig. 5 Relationship between low annealing temperature and tensile strength

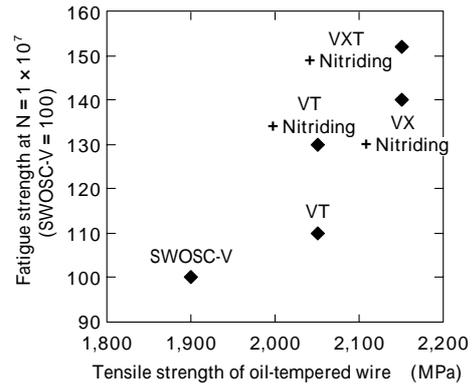


図6 オイルテンパ線強度と疲労強度の関係

Fig. 6 Relationship between fatigue strength and tensile strength of oil-tempered wire for valve spring

げ、靱性を維持しながら高強度とした⁶⁾ものである。この材料では、コイリング後の低温焼鈍条件を適正に選択すれば、耐久性の向上などの特性を得ることができる。

2) 炭素量増加による高強度化；SWOSC-VH

SWOSC-V に対し、C 増量により引張強度の増大を図った。

3) 合金元素添加及び添加量の増量による高強度化；

SWOSC-VT, SWOSC-VX, SWOSC-VXT

低温焼鈍後、窒化後においても、十分に高い強度を維持し、製品ばねの耐疲労性や耐へたり性を向上させるために、高炭素ベースで、新たな合金元素の添加や Si, Cr の増量により低温焼鈍での軟化抵抗をあげた新鋼種を種々開発^{7)~9)}した。V の添加は V 炭化物の微細析出による高強度化、Ni の添加は靱性向上に配慮したものである。特に SWOSC-VX, SWOSC-VXT はばね加工後の窒化処理を念頭に開発されたものである。図5に、高強度オイルテンパ線の低温焼鈍と機械的性質の変化を示す。また図6に、各種高強度オイルテンパ線を用いた弁ばねの耐久性比較を示す。最新の開発鋼種である SWOSC-VXT

表1 弁ばね用オイルテンパ線製品の化学成分

Table 1 Chemical compositions of oil-tempered steel wire for valve spring

(mass%)

Product class	Wire name	Steel grade	C	Si	Mn	Cr	V	Ni
Si-Cr steel	SWOSC-VU	SAE9254	0.51-0.59	1.20-1.60	0.50-0.80	0.50-0.80	-	-
High carbon Si-Cr steel	SWOSC-VH	HRS7-V	0.63-0.68	1.30-1.60	0.60-0.80	0.60-0.80	-	-
Si-Cr-V steel	SWOSC-VT	KHV7	0.60-0.65	1.30-1.60	0.50-0.70	0.50-0.70	0.08-0.18	-
High Si-Cr-V steel	SWOSC-VX	KHV10N	0.56-0.61	1.80-2.20	0.70-1.00	0.85-1.05	0.05-0.15	0.20-0.40
Developed Si-Cr-V steel	SWOSC-VXT	KHV12N	0.57-0.63	1.95-2.35	0.30-0.60	1.65-1.85	0.25-0.35	0.10-0.30

では、従来の SWOSC-V に比べて耐久性はほぼ 50%アップしている。

2.3.2 高強度化に対応した鋼線製造技術

1) 脱炭, 疵対策

高強度オイルテンパ線は、その高強度ゆえに、一般的に切欠感受性が高いので、全製造工程において疵を発生させないための対策と、発生した場合の流出防止が重要である。疵流出防止については、回転型渦流探傷機と貫通型渦流探傷機の併用により、縦割疵・スポット疵の検出と工程からの排除を行っている。また脱炭対策としては、皮削後の熱処理では脱炭を生じさせない雰囲気と条件の管理を実施し、最終のオイルテンパ処理では急速加熱を採用したことにより、脱炭を起こす温度域での処理時間が大幅に短いので、脱炭がほとんどない線材が得られる。

2) 組織の微細化

モノストランドゆえに鋼種・線径ごとに処理条件変更が容易であり、それぞれの最適条件に合わせた条件設定で稼働できる。すなわち、1 コイルごとの条件管理ができ、本ラインの特徴である微細な組織・結晶粒の線材が得られる。SWOSC-VXT 材の急速加熱オイルテンパ線の旧オーステナイト結晶粒径と組織を写真 1 に示す。急速加熱処理では、一般の雰囲気加熱炉の場合に比べ組織が微細 (JIS G 0551 に規定される結晶粒度番号: 平均 12.0) であり、特に Si-Cr-V 鋼である SWOSC-VXT 材の場合は V 添加の効果も相まって、さらに超微細粒 (結晶粒度番号: 13.5 ~ 14.5) となり高強度・高靱性が得られる。

3) 遅れ破壊感受性増大対策

高強度オイルテンパ線は引張強さ 2,200MPa 程度の熱処理材であり、少量の水素の存在により遅れ破壊感受性が問題¹⁰⁾ となるとの報告もある。そのため、オイルテンパ線製造後に、必要に応じて脱水素処理を行うなどの対策が取られることがある。

4) コイリング加工性改善への努力

高強度オイルテンパ線を使用してばねをコイリングする場合、高応力での使用のために、ばねの D/d は小さく、ピッチの立ったばねに加工される。このためばねコイリング時の工具と線表面の間の潤滑性が重要となる。特に異形断面線を使用する場合は、コイリング加工中の線材のねじれを防止するため、断面形状に合わせた工具で線材を強く拘束するためさらに潤滑性が重要となる。線表面の酸化皮膜の組成と厚さの管理、防錆油の潤滑性改善、潤滑皮膜を付与することなどによる改善が鋼線メーカー各社でなされている。

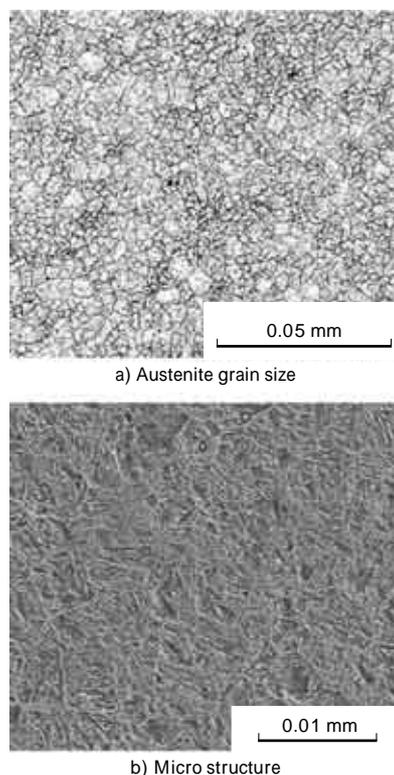


写真 1 オイルテンパ線の旧オーステナイト結晶粒度写真と組織写真 (SWOSC-VXT)

Photo 1 Micro structure and austenite grain size of oil-tempered wire (SWOSC-VXT)

むすび = 高強度材の開発過程において、各種のレーシングカーへも高強度ばね用鋼線を用いた弁ばねが適用され、弁ばね関係者一同がその勝敗に一喜一憂したものである。現在、これらの高性能ばねが実用車に組込まれ、世界中で主力として使われるようになった実績を思えば、今後とも、さらなる高強度化への挑戦は必須であり、その成果が車の小型・軽量化・長寿命化により、省資源、CO₂ 削減などの地球環境改善に寄与し、さらには最近指向されている歩行者安全などへも反映されていくことが期待される。

参考文献

- 1) B. Kaiser : Wire, 37(1987) 3, p.220.
- 2) 小泉義明ほか : ばね論文集, No.28(1983) p.60.
- 3) 伊藤俊郎ほか : ばね論文集, No.43(1998) p.23.
- 4) ばね技術研究会編 : 第 3 版ばね, (1982) p.438, 丸善株.
- 5) 茨木信彦 : R&D 神戸製鋼技報, Vol.50, No.3(2000) p.27.
- 6) 坪野秀良ほか : ばね論文集, No.30(1985) p.1.
- 7) 須田澄恵ほか : R&D 神戸製鋼技報, Vol.55, No.2(2005) p.22.
- 8) M. Abe et al. : SAE paper 890220(1989)
- 9) 吉原直ほか : ばね論文集, No.45(2000) p.15.
- 10) 青木利憲ほか : ばね論文集, No.43(1998) p.43.