高強度炭素鋼オイルテンパー線の諸特性

On the Properties of High Strength
Oil Tempered Carbon Steel Wire

坪野 秀良*・西村 強*・藤原 忠義*・井岡 博一*

Hideyoshi TSUBONO・Tsuyoshi NISHIMURA・Tadayoshi FUJIWARA
Hiroichi IOKA

本報告は、焼入れ、及び焼もどし側ともに高周波誘導加熱装置を装備した新しいタイプのオイルテンパー炉で製造した高強度オイルテンパー線の性能について述べたものである。高強度にするための方法としては、オイルテンパー処理の焼もどし温度を低めることにより行なった。結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 本法により製造した 195 kgf/mm² 級の高強度炭素鋼オイルテンパー線は、急速加熱の効果によりオーステナイト結晶粒度が微細であり、良い機械的性質を示す。
- (2) 高強度化に伴う利点としては、疲労強度の増大と室温におけるばねの耐へたり性の向上が認められるが、耐熱性は期待できない。
- (3) 高強度炭素鋼オイルテンパー線は、低温焼鈍に対する温度感受性が高いので、使用に当たっては、コイルリング後の低温焼鈍において温度管理が重要となる。

In this paper, we described the properties of high strength oil tempered wires that were manufactured by the new type furnace equipped with high frequency induction heater. High strength grade wires were obtained for commercial carbon steel and Si-Cr steel by the method of tempering at the low temperature.

The test results are as follows:

- (1) In this new manufacturing process, wire is heated rapidly to austenitizing temperature and austenite grain size is controlled fine. Therefore, 195 kgf/mm² grade high strength oil tempered carbon steel wire shows good mechanical properties.
- (2) High strength oil tempered carbon steel wire shows high fatigue strength and low residual shear strain in the clamping test at the room temperature. But, heat sensitivity of this wire is less than that of Si-Cr steel oil tempered wire.
- (3) The heat sensitivity of high strength oil tempered carbon steel wire is more than that of usual grade wire. Therefore, tempering temperature after coiling must be controlled more severely in the use of this wire.

1. ま え が き

弁ばね用として使用されるオイルテンパー線は、より優れた表面品質、機械的性質、高い疲労限などが要求されている。一般に、オイルテンパー線を製造する方法としては、雰囲気加熱焼入れや、鉛炉による焼もどしで行うことが多いが、近年、高周波誘導加熱方式を採用したオイルテンパー線の製造、及び、その品質に関する報告¹⁾がなされている。

このような高周波誘導加熱方式を用いたオイルテンパー線の製造ラインの特徴としては、

(1) 急速加熱でオーステナイト化処理するので、オーステナイト化温度と保持時間を厳密にコントロールすることによって、オーステナイト結晶粒度を微細にすることが可能であり、これによって絞り値などが高くなる。

(2) 焼入れ、焼もどし処理は線を直線状態に保持して行なうので、線の真直性が良い。

(3) 熔融鉛浴の場合には、焼もどし温度範囲がおのずと制限されるが、高周波誘導加熱方式では採用できる焼もどし温度範囲が広い。などの点があげられる。

一方、炭素鋼オイルテンパー線をシリコンクロム鋼オイルテンパー線と同等の高強度にすることができ

* 神鋼鋼線工業 (株)(Shinko Wire Co. Ltd.)

ば、炭素鋼オイルテンパー線の適用用途も拡大すると思われる。

本報告では、急速加熱焼入れ・急速加熱焼もどし法でオイルテンパー線を製造するラインにおいて、低い焼もどし温度を採用して高強度化をはかった炭素鋼オイルテンパー線の性能について述べる。

2. 供試材

供試材は Table 1 に示す化学成分の線材を用い、Fig. 1 に示す工程で製造した 4.0 mm の弁ばね用炭素鋼オイルテンパー線 (SOW-V) である。また比較材として同様な工程で製造した 4.0 mm の弁ばね用シリコンクロム鋼オイルテンパー線 (SWOSC-V) を用いた。

オイルテンパー線の強度水準は、それぞれ 15 kgf/mm² ごとに差をつけ、Table 2 の引張強さを目標とした。

Fig. 1 Manufacturing Process of Wire Samples

Table 1. Chemical Composition (wt %)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Cr
SWO-V	0.74	0.21	0.70	0.014	0.011	0.02
SWOSC-V	0.53	1.44	0.70	0.018	0.009	0.68

Table 2. Tensile Strength Grade of Samples

	Tensile Strength Grade (kgf/mm ²)
SWO-V	165 , 180 , 195
SWOSC-V	195 , 210 , 225

3. 試験方法

3.1 金属組織、脱炭、旧オーステナイト結晶粒度、非金属介在物、硬さ分布

3.1.1 金属組織、脱炭

オイルテンパー線を顕微鏡観察用の試料として調整し、3% 硝酸アルコール溶液にてエッチング後、光学顕微鏡で観察した。さらに、深めのエッチングを施した試料を走査型電子顕微鏡によって観察した。

3.1.2 旧オーステナイト結晶粒度

オイルテンパー処理後のサンプルを 550℃・3 時間焼鈍した後、顕微鏡用試料として調整し、ドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム 10 g 及びピクリン酸 5 g

を 200 ml の水に溶かした溶液中に 5 分間浸漬してエッチングした後、軽くパフ仕上げして観察に供した。

3.1.3 非金属介在物

顕微鏡用試料を作成した後、JIS 法 (JISG 0555) にて測定した。

3.1.4 硬さ分布

コイルリング及びその後の低温焼鈍条件と硬さ分布の変化を調査するため、オイルテンパー線をコイルリングした後、ばねの 1 巻目の線の横断面を研磨し、ばねのコイル内側より外側方向へ、及びその直角方向へ 300 g の荷重下でのマイクロビッカース硬さを 0.2 mm 間隔で測定した。

3.2 残留オーステナイト量、残留応力

オイルテンパー線の縦断面を埋込み、これを試料として理学電機製 X 線回析装置を用いて X 線回析を行い (111)_γ と (100)_α のピークを求め、その各々の半値巾とピーク高さから、計算によって残留オーステナイト量を求めた。また、残留応力はオイルテンパー線の表面に細束 X 線をあてて、X 線法で測定した。

3.3 機械的性質

オイルテンパー線と、それに 200℃～400℃ の熱風循環式焼鈍炉中で 30 分間の低温焼鈍を実施した線の両者について一般的な引張試験及びねじり試験を実施した。またねじり試験については 200℃ での温間ねじり試験も行った。

3.3.1 引張試験

5 トン・アムスラー型引張試験機を用い、試験片にダイアルゲージをセットして荷重と伸びを測定しその関係曲線から引張強さ (σ_B)、0.2% 耐力 ($\sigma_{0.2}$)、及び縦弾性係数 (E) を求めた。

3.3.2 ねじり試験

精密ねじり試験機を用い室温及び 200℃ の炉中の線のトルクとねじり角度線図を求め、ねじり強さ (τ_B)、0.3% 耐力 ($\tau_{0.3}$)、横弾性係数 (G) 及びねじり回数 (づかみ間隔は線径の 100 倍にした) を求めた。

3.4 へたりのおよび疲労試験

3.4.1 回転曲げ疲労試験

オイルテンパー線、及び、低温焼鈍後ショットピーニングを施した線について、中村式回転曲げ疲労試験を行なった。ショットピーニング及び、ショットピーニング前後の低温焼鈍条件を Table 3 に示す。

低温焼鈍温度は機械的性質との関係から、強度の落ちはじめの温度を各々の試料に対する適正な低温焼鈍温度として選んだ。

3.4.2 締付へたり試験

自由長 50 mm、コイル平均径 27 mm、及び有効巻数 5 ½ 巻の諸元を持つばねを作成して室温及び 200℃ での加熱締付へたりテストを行なった。締付応力は 32 kgf/mm²、及び、48 kgf/mm² の 2 水準、200℃ への加

Table 3. Process Conditions

Type & Grade (kgf/mm ²) Process	SWO-V			SWOSC-V		
	165	180	195	195	210	225
1st Tempering	375	350	325	400	375	375 °C (× 30 min)
Shot-peening	Steel Shot 0.7 mmdia. Arc Height 0.34 mmA					
2nd Tempering	230°C×15 min.

Fig. 2 Micro Structure taken by SEM

Fig. 3 Austenite Grain Size

Fig. 4 Micro Structure of Wire Surface

熱は熱風循環式焼鈍炉中に行ない、テストは72時間までとした。

3.4.3 ばね疲労試験

線の回転曲げ疲労試験と同一のショットピーニング条件、及び低温焼鈍条件で処理した (Table 3) 一部サンプルのばねを、 $0.6 \times \sigma_B$ の応力で1回セッチングを施した後、島津製星型疲労試験機で疲労試験を行ない疲労試験後のへたりを測定した。

4. 試験結果および考察

4.1 金属組織、脱炭、旧オーステナイト粒度等

Fig. 2 に走査型電子顕微鏡による組織写真を、Fig. 3 に旧オーステナイト結晶粒度写真を、Fig. 4 に線表面近傍の光学顕微鏡写真を示す。金属組織についてはいずれの試料も良好な焼もどしマルテンサイト組織を示しており、また、旧オーステナイト結晶粒度については、SWO-V で No. 9.5, SWOSC-V で No. 11 と非常に細かく、急速加熱方式の特徴が現れている。非金属介在物については、JIS 法による清浄度は SWO-V が 0.013% SWOSC-V が 0.020% であった。また、Fig. 4 及び後に示す硬さ分布の測定結果の例にみるとおり、

線表面近傍での硬さ低下もなく、かつ両材料とも脱炭は認められなかった。

4.2 機械的性質

Fig. 5, Fig. 6 に SWO-V の低温焼鈍温度と引張り及びねじりの諸特性の関係を示す。低温焼鈍温度と諸特性の関係は従来から良く調べられている傾向と同様であり²⁾、引張強さは 165 kgf/mm^2 級のもので約 375°C , 180 kgf/mm^2 級のもので約 350°C , 195 kgf/mm^2 級のもので約 325°C で強度が低下しはじめ、強度の低下開始温度は高強度材ほど低い。絞りは 165 kgf/mm^2 級, 180 kgf/mm^2 級のものでは低温焼鈍温度にかかわらず約 55%, 195 kgf/mm^2 級でも約 50% の値を示し、良好な靱性を有していることがわかる。ねじり特性については、引張特性と同様の低温焼鈍に対する挙動を示しており、ねじり回数は 165 kgf/mm^2 級, 180 kgf/mm^2 級ではオイルテンパー線及び、低温焼鈍後も 20 回を超える値を示す。

195 kgf/mm^2 級ではオイルテンパー線と低温焼鈍品の温度が低い場合のねじり回数は 8 回と低いが、 400°C の低温焼鈍で引張強さは低下するがねじり回数は回復を示す。

Fig. 5 Variation in Tensional Properties of SWO-V 4.0 mm dia

Fig. 6 Variation in Torsional Properties of SWO-V 4.0 mm dia

Fig. 7 Variation of Tensional Properties of SWOSC-V 4.0 mm dia

Fig. 8 Variation in Torsional Properties of SWOSC-V 4.0 mm dia

Table 4. Percentage of Retained Austenite

Type & Grade	SWO-V			SWOSC-V		
	165	180	195	195	210	225(kgf/mm ²)
Retained Austenite	Not detected	Not detected	Not detected	6 %	10 %	13 %

Fig. 7, Fig. 8にSWOSC-Vの低温焼鈍温度と引張及びねじり特性の関係を示した。SWOSC-VではSWO-Vと同様に、強度の低下開始温度は高強度材ほど低い。低下開始温度自体はSWO-Vより全体に高く、かつ、SWO-Vの場合と異なり、300℃近辺に残留オーステナイトの分解による強度(σ_B , $\sigma_{0.2}$, τ_B , $\tau_{0.3}$ 等)のピークが認められる。一般に焼入れ後の残留オーステナイト量とオーステナイト結晶粒度の関係では、オーステナイト結晶粒が細かいほど残留オーステナイト量は少ないと言われている。急速加熱焼入れした本法のオーステナイト結晶粒度は、Fig. 4に示したごとく微細である。そこでX線法で残留オーステナイト量を測定した結果をTable 4に示す。

SWO-Vの場合はいずれの強度でも残留オーステナイトは検出されず、SWOSC-Vの場合は通常の195 kgf/mm²級で6%、焼もどし温度を低くして強度を高めた210 kgf/mm²、225 kgf/mm²の場合で各々10%、13%であった。この195 kgf/mm²級の場合の6%の値は通常の製法のものとは大差ないようである。なお、オイルテンパー処理時の焼もどし温度が高くなると残留オーステナイトの分解が進み、残留オーステナイト量が減少していく傾向が明瞭である。

Fig. 9 Relation between Tensile Strength and Torsional Properties at 200°C

Fig. 10 S-N Curve ((Rotary Bending by NAKAMURA Type M/C)

Fig. 11 S-N Curve (Rotary Bending by NAKAMURA Type M/C)

Fig. 12 S-N Curve (Rotary Bending by NAKAMURA Type M/C)

SWOSC-V の絞り値は 195 kgf/mm² 級で約 56%, 210 kgf/mm² 級でも 48% と高い。

SWO-V, SWOSC-V とも高強度品の絞りの値が十分高い。これは、オーステナイト結晶粒度と強度・靱性について多くの研究で明らかにされているごとく、オーステナイト結晶粒径が小さいと破壊靱性がすぐれる³⁾のはよく知られており、急速加熱方式による結晶粒の微細化効果であると考えられる。

Fig. 9 は 200℃ における温間ねじり試験結果を示す。常温でのねじり試験結果と非常に良く対応しており、 τ_B の室温に対する 200℃ での値の比率は約 95%, $\tau_{0.3}$ の室温の値に対する 200℃ での値の比率は約 82% 程度で各材料ともほぼ同一であった。

4.3 疲労強度

Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12 に SWO-V 165 kgf/mm² 級, 195 kgf/mm² 級及び SWOSC-V 195 kgf/mm² 級のオイルテンパー線とショットピーニング後の線の中村式回転曲げ疲労試験機による疲労試験結果を示す。また、すべての試料についての結果を線の強度に対してまとめて Fig. 13 に示す。SWO-V ではオイルテンパーのままでも 60 kgf/mm² 以上の良好な疲労強度を示すが、これにショットピーニングを施したものでは大巾な疲労強度の上昇を示し、この場合素線強度の高いものはショットピーニングによる疲労強度の上昇が大きく、195 kgf/mm² 級のものでは 77 kgf/mm² という SWOSC-V 並の疲労強度を示した。

一方、SWOSC-V はオイルテンパーのままでも約

Fig. 13 Relation between Wire's Fatigue Strength & Tensile Strength

70 kgf/mm² の値を示し、これにショットピーニングを施した場合には、195 mm² 級で 81 kgf/mm², 210 kgf/mm² 級で 83 kgf/mm² の疲労強度を示した。なお、225 kgf/mm² 級ではオイルテンパー線及びショットピーニング後ともに 210 kgf/mm² 級より低い値を

Fig. 14 Clamping Test Result at Room Temp

Fig. 16 Relation between Tensile Strength and Residual Shear Strain after Fatigue Test of Coil Spring

Fig. 15 Clamping Test Result at Room Temp

示した。

4.4 耐へたり特性

Fig. 14, Fig. 15は常温でのSWO-V, SWOSC-Vの締付応力48 kgf/mm²におけるへたり試験結果を示す。コイリングままのバネの試験では、SWO-VもSWOSC-Vもかなり大きなへたり値を示すが、素線強度の高いものほどへたりは小さい。また、コイリング加工後適切な温度で低温焼鈍したものは、72時間経過後もへたりは小さい。

Fig. 16は平均応力 $\tau_m=55\text{ kgf/mm}^2$ 、応力振幅 $\tau_a=35\text{ kgf/mm}^2$ 及び $\tau_a=45\text{ kgf/mm}^2$ でのばね疲労試験(1800 rpm, 1,000万回後)でのへたり量の測定結果を示す。低温焼鈍条件、ショットピーニング条件などはTable 3に示した値である。疲労試験後のへたりも高強度材ほど小さく、SWO-V 195 kgf/mm²級は165 kgf/mm²級の約半分のへたりを示し、また同一強度(195 kgf/mm²級)のSWO-VとSWOSC-VではSWOSC-Vが約半分程度と小さい値を示した。なお、Fig. 16の疲労試験条件において各 $n=4$ ヶつつのばねに折損はなかった。

Fig. 17 Clamping Test Result at 200°C

Fig. 17は195 kgf/mm²級のSWO-VとSWOSC-Vの200°Cでの締付へたり試験結果を示す。適切な条件下で低温焼鈍されたばねにおいても、SWO-Vでは200°Cのテストの場合へたりが大きく、高強度のSWO-Vは常温での使用においては、SWOSC-Vのへたりに近い値を示し有利であったが、耐熱性は望めない。

4.5 コイリング及び低温焼鈍による硬度分布の変化

Fig. 18はSWO-V 195 kgf/mm²級のオイルテンパー線、コイリング後、及び種々の温度での低温焼鈍を施したばねの線横断面において、コイルの内側から

Fig. 18 Hardness Distribution of cross-sectional Area

Fig. 19 Effect of Tempering Temperature on the Hardness at Cross-sectional Area of Coiled Wire

外側へ0.2mm間隔でマイクロビッカース硬さを測定した結果である。なお、この硬さ測定値には残留応力の影響等を考慮しなければならないと考えられるが、コイルの状態から切り出したサンプルの横断面を研磨した硬さ測定用試料の表層部の残留応力について検討できなかったため、ここでは考慮しないことにした。オ

Fig. 20 Hardness Distribution Pattern at Cross-sectional Area of Coiled Wire

イルテンパー線では平坦な硬さ分布が、コイルリングの際の加工硬化の影響により、大きな硬度分布の変化を示し、引張加工から圧縮加工に変わる加工の中立軸に相当する中心部近傍で特に大きな変動が認められる。この横断面硬さ分布の最大の硬度差は、高強度材ほど拡大する傾向を示す。このコイルリング後のばねに内在する横断面の硬さ分布の平均値、及び最大最小の間の硬度差と低温焼鈍温度との関係を Fig. 19 に示す。コイルリングにより生じた硬度差は低温焼鈍温度が高いほど平準化するが、400℃での低温焼鈍後でもいくらかの傾向は残るようである。なお、材料の強度を生かす

ため、高強度材ほど低温焼鈍温度を低くすると、断面での硬度分布には低温焼鈍後もかなりの硬度差が残ること、及び高強度材ほど低温焼鈍における温度感受性が高いので、高強度材ほど温度管理が重要になることがわかる。なお、Fig. 18のような分布を線の全断面についてさらにくわしく調べてみると、Fig. 20の様になり、全断面ではさらに大きな硬度差があることがわかる。これを適正な温度で低温焼鈍したものの硬さ分布については、硬度差が大巾に減少するが、傾向的には低温焼鈍前の分布と相似の分布を示すようである。

5. ま と め

高周波誘導加熱方式を用いて、高強度の炭素鋼オイルテンパー線を製造し、その特性を調査した結果、以下の結論を得た。

(1) 高周波加熱装置を用いた急速加熱焼入れ、焼もどし方式により、特性の安定した 195 kgf/mm^2 級の炭

素鋼オイルテンパー線の製造が可能である。

(2) 高強度化に伴う利点としては、素線テストにおける疲労強度の増大、室温におけるばねの耐へたり性の向上などの点が認められた。

(3) 200°C における締付へたり試験の結果から、SWOSC-V の様な耐熱性は期待できない。

(4) 高強度炭素鋼オイルテンパー線は低温焼鈍における温度感受性が高いので、低温焼鈍の際の温度管理が重要となる。

参 考 文 献

- 1) 瀬戸芳樹, 曾我栄市, 内野勝芳, 川崎一博, ばね論文集, 27 (1982), 28.
- 2) 共同研究報告“炭素鋼オイルテンパー線の性能について”, ばね論文論, 15 (1970), 89.
- 3) 栗本 衛, 清水伸浩, 横手信久, ばね論文集, 26 (1981), 9.