時計用ゼンマイの研究 (第2報)

三橋鉄太郎*・上野 学*

ON THE STUDY OF TIME PIECE SPRING (II)

Tetsutaro Mitsuhashi & Manabu Ueno

In the "Metal Progress" 1948, it is reported that the fatigue limit is improved by Martemper and temper.

It seems to differ from martemper so-called in this country, but it means to hold a temporary time just above the Ar'' transformation and to cool gradually in this critical range of the Ar'' transformation and temper.

The fact that the fatigue limit is improved by Martemper and temper is likely due to being free from Micro-cruck by quenching, but the problem is not yet solved.

Authors reported on the comparison of the mechanical properties in Martemper and Austemper at the low reaction temperature (tempering) in the 1st report.

The result of the comparison of the mechanical properties in Martemper and temper, Austemper, and Oil quenching and temper on the Hardness, the Tensile Strength, the Elongation, the Fatigue Limit and the Simple Torque Test is given in the 2nd report.

I 緒 論

近着の外国雑誌にマルテンパーエンドテンパー熱処理がバネの疲労限を向上させると報告されている。此の言葉の意味は我国で云われているマルテンパー熱処理²⁾とは異っている。即ち焼入の際 Ar'' 変態直前に一定時間保持して Ar'' 変態の危険区域を徐冷して焼入焼戻を行う熱処理方式を云う。マルテンパーエンドテンパー熱処理を行うと疲労限が向上するのは焼入の際に生ずるマイクロクラック³⁾が生じ難いと考えたと説明し得るが尙此の問題に付き不明の点が存在する。著者は第1報として低温度に於けるオーステンパーと油焼入焼戻の機械的性質の相異に付き報告した。今回はオーステンパー、マルテンパーエンドテンパー、油焼入焼戻の三種類の熱処理方式を硬度、抗張力、延伸率、疲労破断試験、簡易トルク試験、衝撃試験の見地から比較検討した。この結果を第2報として報告する。

II 試験方法

試料は日立製作所安来工場の白紙2号を使用した。その化学成分は第1表に示す。試料は 0.4mm の薄板とφ6mm の丸棒にて実験を行つた。薄板は安来工場の白紙2号を特殊金属工業会社にて圧延せるものである。

第 1 表

化学成分	C	Si	Mn	P	S	備 考
試料						
薄 板	1.01	0.16	0.30	0.019	0.003	日立安来白紙2号
丸 棒	1.03	0.25	0.39	0.013	0.008	〃 〃 白紙2号

第1図 焼入用電気炉と鹽浴炉

試料の熱処理には第1図に示す如き真空加熱炉を使用した。加熱の際に酸化脱炭を最小限度に止める為に真空中にて加熱し、焼入の際栓を開いて試料を焼入する。然し栓を開いて焼入槽に焼入れる迄の時間は数秒であるので試料の表面に薄い干涉色を生ずるが、脱炭の心配はない。マルテンパーエンドテンパー、オーステンパー、焼戻には恒温保持用鹽浴炉を使用した。

a) 油焼入焼戻熱処理 (O. Q. T. 熱処理)

* 工業技術廳機械試験所

薄板の試料の場合には第1図に示す如く試料を石英管に入れて真空に引き 10^{-2} cm 程度になると電気炉中に入れて 800°C に5分間保持した後に栓を開いて直下に設けた油槽中に焼入する。その後 200°C , 250°C , 300°C , 350°C , 400°C の各温度の鹽浴中にて10分間焼戻を行う。丸棒の試料の場合には 800°C に15分間加熱して油焼入を上述の炉にて行い、鹽浴中にて各温度に30分間焼戻を行う。

b) マルテンパーエンドテンパー熱処理 (M. A. T. 熱処理)

薄板の場合には第1図に示す炉にて $800^{\circ}\text{C} \times 5$ 分間加熱して 200°C 油槽に焼入して10分間保持して油冷を行い Ar° 変態を充分完了した後 200°C , 250°C , 300°C , 350°C , 400°C の各温度の鹽浴中にて10分間焼戻を行う。丸棒の場合は $800^{\circ}\text{C} \times 15$ 分間加熱し、 200°C の油槽に焼入して30分間保持し、鹽浴中にて各温度で30分間焼戻を行う。

c) オーステンパー熱処理 (A. T. 熱処理)

薄板の場合には第1図に示す炉にて $800^{\circ}\text{C} \times 5$ 分間加熱して恒温保持鹽浴炉中に投入した。各温度に次の時間保持した。 250°C —65分間、 300°C —35分間、 350°C —10分間、 400°C —5分間、尚各時間保持後油冷した。顯微鏡検査の結果は保持時間は変態完了に充分なる時間である。丸棒の場合には 800°C に15分間加熱して各温度の鹽浴中に次の時間保持した。 250°C —70分間、 300°C —40分間、 350°C —15分間、 400°C —10分間保持した。

III 熱処理による薄板の機械的性質

1) 硬度、抗張力、延伸率 第2図に示す如くヴィツカース硬度試験に於ては反応(焼戻)温度の上昇と共に硬度が減少して行く。O. Q. T. 熱処理よりも M. A. T. 熱処理を施した場合の方が各反応(焼戻)温度に於て硬度が高く、A. T. 熱処理は一般に硬度が低く 350°C で急に硬度が減少する。引張試験結果に於ては O. Q. T. 熱処理、M. A. T. 熱処理の場合に於て 200°C , 250°C で10分間焼戻しを行つた試料は脆くて引張の場合曲げ応力が作用するため途中にて切断して完全なる引張試験が行われなかつた。いづれの熱処理方式の場合も反応(焼戻)温度により抗張力が低下する。各反応(焼戻)温度に於て M. A. T. 熱処理の方が O. Q. T. 熱処理よりも抗張力が高く、A. T. 熱処理の場合抗張力が一般的に低く 350°C より急に抗張力が低下する。延伸率は O. Q. T. 熱処理と M. A. T. 熱処理の場合余り相異はない。又反応焼戻温度と共に余り変化しない。A. T. 熱処理の場合

第2図 各熱処理方式に於ける硬度、抗張力、延伸率の比較

第2表 各熱処理方式に於ける機械的性質の比較(薄板)

機械的性質 反応(焼戻)温度	ヴィツカース硬度	抗張力試験		疲労破断試験 簡易トルク試験	
		抗張力 kg/mm²	延伸率 %	破断回数	スプリングの伸び mm
油熱焼入焼戻	200°C	690	—	—	破断
	250	627	—	—	600
	300	604	191.5	1.0	1960
	350	548	187.2	1.1	3930
マルテンパー熱処理	400	509	177.4	1.3	4370
	200	720	—	—	630
	250	670	—	—	950
	300	620	203.2	0.8	4320
オーステンパー熱処理	350	558	193.2	0.9	5400
	400	510	187.9	1.0	7000
オーステンパー熱処理	250	618	146.6	0.5	2750
	300	566	184.2	1.6	4160
	350	440	172.2	3.5	8840
	400	417	146.5	5.8	9070

350°C で急に延伸率がよくなり、 400°C で6%近くの値を示す。以上の結果を第2表に示す。A. T. 熱処理にて反応温度 350°C より延伸率が良くなり抗張力が低下し、且又硬度も急に低下するのは、恐らくローアーベナイト (lower Bainite) の析出の代りにアツパーベナイト (upper Bainite) 又はトルスタイト (Troostite) が析出することによる組織の変化に基づくのであると思う。

2) 疲労破断試験、簡易トルク試験 時計ゼンマイは

変形して貯えたエネルギーを徐々に仕事に変える作用をする。目覚時計の日巻ゼンマイでは J. E. S に於ては捲いてから30時間後も時計が作動していればよいのであるからその範囲内で時計の機構中の摩擦が少なければそれに対応して時計ゼンマイのトルクが小さくてもよいことになる。現在の所ではトルクそのものの規格はきめられていない。一般にトルク曲線が平らな傾向が好ましい。それは捲いた時トルクが大きくて時間がたつと共にトルクが減少すると時計が進んだり遅れたりして好ましくないからである。必要なトルクを出す為には物理的性質より考察して弾性限が高く、耐屈撓性の大きくなることが大切である。時計ゼンマイの抗張力は $180\text{kg/mm}^2 \sim 200\text{kg/mm}^2$ が必要と云われている。時計ゼンマイを捲いた時どの位の応力がかかるか実測したデータがないので次の式で近似計算した。

$$\frac{1}{\rho_L} - \frac{1}{\rho_F} = M/EI = 2\sigma/Eh \quad (\because \sigma = Eh/2I)$$

ρ_L は時計ゼンマイを捲いた時の曲率半径、 ρ_F は時計ゼンマイを拘束しないときの曲率半径、 M は曲げモーメント、 E はヤング率、 I は断面係数、 σ は最大曲げ応力、 h はゼンマイの厚さである。 ρ_L 、 ρ_F をゼンマイを捲いたときと自由にした時ゼンマイの側面に印肉をつけて紙にプリントして実測した。 $\rho_L = 1.5\text{cm}$ 、 $\rho_F = 6.11\text{cm}$ であった。 $E = 2.1 \times 10^{10} \text{dyne/cm}^2$ 、 $h = 0.04\text{cm}$ であるので上式に代入して σ を求めると $\sigma = 2.1 \times 10^5 \text{kg/cm}^2 = 210 \text{kg/mm}^2$ となる。実際に此位の応力がかかっているか疑問であるが次報で何等かの方法で実測した結果を述べたいと思つている。著者は第1報⁷⁾で報告した疲労試験で次の様な最大曲げ応力がかかる状態で繰返し曲げ試験を行い破断までの回数で疲労に対する良否を決定した。

この疲労試験機では第3図に示す如き曲げ応力がかかる。A点のゼンマイの外側に於て最大曲げ応力が最大となる。これを計算すると

$$\sigma = \frac{fy_0 Eh}{(4l-L)(l-L)}$$

となる。

E はヤング率、 h は板の厚さ、 l はゼンマイの長さ、 L はチャックとA点までの距離、 y_0 はゼンマイを曲げるストロークの長さである。 y_0 が大きくなると数パーセント程度の誤差を生ずる。 $l = 4.0\text{cm}$ 、 $y_0 = 2.0\text{cm}$ 、 $L = 1.0\text{cm}$ 、 $E = 2.1 \times 10^{10} \text{dyne/cm}^2$ 、 $h = 0.04\text{cm}$ として最大

第3図

曲げ応力 σ を求めると $\sigma = 2.24 \times 10^5 \text{kg/cm}^2 = 224 \text{kg/mm}^2$ となる。上述に計算した時計ゼンマイを捲いた時の最大曲げ応力と疲労試験を行つた状態と大体同程度の最大曲げ応力が掛つている。

この様な $\sigma = 224 \text{kg/mm}^2$ かかっている状態で繰返し曲げ疲労試験を行つた結果を第4図に示す。O. Q. T. 熱処

第4図 各熱処理方式に於ける疲労破断試験と簡易トルク試験の比較

理と M. A. T. 熱処理の両方の場合とも焼戻温度 300°C より破断回数が良くなつて来る。これは焼入れによつて生ずると云われているマイクロクラックが、消滅し始めると考えられるのではないかと思います。 200°C 、 250°C の温度では両熱処理とも余り変化はないが、M. A. T. 熱処理の方が少し疲労に良いのではないと思われる。焼戻温度が 300°C になると M. A. T. 熱処理の方が O. Q. T. 熱処理の場合よりも破断回数は2倍位良くなる。 350°C 、 400°C 焼戻の場合も同じ傾向を示し M. A. T. 熱処理が疲労に良い結果を示す。両熱処理とも焼戻温度と共に疲労破断回数は良くなつて行く。若しマイクロクラックが焼入の際に生ずるとするならば M. A. T. 熱処理の場合 $A_{r''}$ 危険区域を徐冷するのでマイクロクラックの生成数が少ないか或いはマイクロクラックの長さが小さいのではないかと考えられる。A. T. 熱処理の場合には他の一つの熱処理に比して各温度に於て疲労破断回数は良好である。 350°C で急に疲労破断回数が良くなる、これは恐らくローアーベナイトの析出がアツパーベナイト又はトルースタイトの析出に移行する組織の変化に基くものと思わ

れる。以上の結果を第2表に示す。

次に機械試験所の太田技官が昭和24年時計懇談会にて発表した簡易トルク試験を借用して時計ゼンマイの熱処理方式によりトルクが如何に変化するかを実験した。第5図(a)は簡易トルク試験装置を示す。Aはφ30mmの円盤でBを支点としFなる力で引張るとTなる試料はAの円周に沿って曲る。太田技官はFによるSゼン

第5図 簡易トルク試験

マイの伸びをEに連絡せる円盤の廻轉角の大小で測つたが著者はSの伸びを直接に読みとつた。この方法で簡易トルク試験装置の信頼性を予備的に追試してみた。即ち、理研製ゼンマイ(日巻時計用)を用いて簡易トルク試験装置による値とトルク試験機による値とを比較した。ゼンマイの厚さ0.46mmで、巾は0.79mmである。このゼンマイをトルク試験機にてトルク曲線を求めると第5図(b)の如くなる。即ちゼンマイを巻くとCAの曲線を巻き、巻いたゼンマイを戻すとBCなる曲線でトルクが減少する。ゼンマイのトルクの値として如何なる値、例えばOBをトルクの値とするか、又3回巻戻した時のトルクの値をとるか色々議論の余地はあるが、実際時

計は30時間作動していればよいのであるから30時間後にも時計を作動するに必要なトルクを持てばよい。故に巻いて36時間後も充分なるトルクを持つ様に即ち6回巻戻したときまでのBDEOの面積を以てゼンマイのトルクの値とした。この面積はプランメーターにて測定した。この面積と第5図(a)に於けるSなるスプリングの伸びとの関係を求めると第5図(c)の如き姿勢を示す。大体トルク試験機より求めた面積と簡易トルク試験で求めた値とは比例関係を示す。面積をAとしスプリングの伸びをBとすると次の関係式を生ず。

$$A = 13B + 1.4 \quad (\text{単位 cm})$$

以上により簡易トルク試験機のスプリングSの伸びは本式のトルク試験機のトルクAに正比例することが明になった。此の簡易トルク試験機を使用して上述の3種の熱処理方式によるトルク試験を行つた。その結果は第2表と第4図に示す。試料の寸法は長70mm×巾10mm×厚0.4mmである。いづれの熱処理の場合も反応温度(焼戻)の上昇と共にトルク即ちゼンマイの伸びは低下する傾向を示す。O, Q, T, 熱処理を施すと他の熱処理方式よりも一般にトルクの値が高くなる。A, T, 熱処理をすべと300°Cまでは余り変化はないが350°Cより急にトルクが悪くなる。これも恐らくロバークナイトの析出がアツパーベークナイト又はトルスタイトの析出に移行する組織の変化に基づくものと思われる。トルクが大なることを望むとすればO, Q, T, 熱処理を行つた方がよい。油焼入して300°Cに焼戻したらトルクは良いが疲労破断回数が約2000回位なので破断しやすいことになる。350°Cに焼戻するとトルクは少し落ちるが疲労破断回数は約2倍位良くなる。400°Cに焼戻することは避けた方がよいと思う。M, A, T, 熱処理ではO, Q, T, 熱処理よりも疲労破断回数は一般的に良いがトルクの値が少し落ちる。トルクは350°C焼戻するまで徐々に低下するが400°C焼戻しではかなり悪くなるので好ましくない。M, A, T, 熱処理では300°C~350°C焼戻範囲が適当であると思う。A, T, 熱処理では疲労破断回数は350°Cから急に良くなるがトルクの値が急に低下する。以上のことを考えてA, T, 熱処理を利用するとすれば300°C鹽浴にオーステンパーしたらよいと思う。トルクの見地からはA, T, 熱処理は好ましくない。以上の結果を総合するとトルクを必要とするときはO, Q, T, 熱処理で、350°C附近で焼戻するのが最適であると思う。トルクは少し落ちるが疲労に良いゼンマイを必要とするときはM, A, T, 熱処理を行つて300~350°C焼戻を行えば良好である。

IV 熱処理による丸棒の機械的性質

高炭素鋼の薄板と丸棒の機械的性質を検討する。丸棒では直径が約 6mm φ よりも大きくなると質量効果の為充分焼が入らなくなるが、薄板ではその心配はない。従来のゼンマイ材料の機械的性質を測定した人もあつたが質量効果の点に充分注意が拂われていない。φ 6mm の丸棒に 3 種の熱処理方式を施して抗張力、延伸率、硬度、衝撃値を測定した。抗張力試験片の寸法は平行部 φ 6mm

第 3 表 各熱処理方式に於ける機械的性質の比較 (丸棒)

機械的性質 反応 (焼戻) 温度	温度	ヴィカー ス 硬度	抗張力		延伸率	シャルビ — kg・m/ cm ²
			kg/mm ²		%	
油 焼 入熱 焼戻 炭理	200℃	663	—	—	—	3.9
	250	608	—	—	—	3.3
	300	536	176	2.3	—	4.5
	350	490	167	4.6	—	6.9
	400	439	150	12.5	—	7.8
マル テン パ ー 熱 焼戻 炭理	200	670	—	—	—	2.7
	250	627	—	—	—	2.5
	300	564	204	0.5	—	3.2
	350	500	195	2.5	—	6.4
	400	460	178	5.0	—	6.3
オ ー ス テン パ ー 熱 焼戻 炭理	250	375	135	9	—	20.5
	300	360	135	10.6	—	22.9
	350	362	144	11.6	—	21.2
	400	357	131	13.9	—	21.0

第 6 図 各熱処理方式に於ける機械的性質の比較 (丸棒)

で長さ 25mm である。衝撃試験片は平行部 φ 6mm で長 25mm の丸棒で J. E. S. 規格の寸法ではない。且又ノッチをつけずに試験した。

その結果は第 3 表、第 6 図(a)(b)に示す。第 6 図(a)に依るとヴィツカース硬度に於ては O. Q. T. 熱処理と M. A. T. 熱処理とは余り変化はないが、M. A. T. 熱処理の方が少し硬度が高く、両熱処理とも焼戻温度の上昇と共に硬度は低下する。A. T. 熱処理によると硬度は非常に低く反応温度と共に余り変化がない。衝撃値は M. A. T. 熱処理と O. Q. T. 熱処理とも余り変化がなく焼戻温度と共に少し良くなる。M. A. T. 熱処理の方が少し悪い。A. T. 熱処理を行うと他の熱処理の場合よりも非常に良くなるが、反応温度が上昇しても衝撃値は変化しない。第 6 図(b)によると抗張力試験に於て O. Q. T. 熱処理とも焼戻温度の上昇につれて抗張力は低下するし延伸率は逆に上昇する。M. A. T. 熱処理の方が O. Q. T. 熱処理よりも各焼戻温度に於て抗張力が高く、延伸率は悪い。A. T. 熱処理は抗張力が非常に低くなっている。これは鉛浴を使用しないで $\text{KNO}_3 + \text{NaCO}_3$ の鹽浴を使用した為と思われが、鉛浴を使用すると試料が表面に浮ぶので鹽浴を使用したのである。鉛浴に比して鹽浴の方が熱伝導率が小さいので冷却速度が小で、A. T. 熱処理が充分に完全に行われず S 曲線のノーズを切つたのであろう。抗張力が低いので延伸率は非常に良い。丸棒と薄板の素材に同じ熱処理を行つても質量効果の点で異つている。薄板は此の点の心配は非常に少ない。M. A. T. 熱処理、O. Q. T. 熱処理の場合 200°C、250°C で 30 分間焼戻せる試料の抗張力試験では試験機のチャックにて迂りチャックが磨耗するので試験を中止した。硬度が高いのでチャックの硬度に近くて、チャックが試片を噛まないで実験は不可能であつた。

V 総 括

以上の実験結果を総括すれば次の如くなる。

1) 薄板に 3 種の熱処理方式を施すと硬度、抗張力に於て各反応(焼戻)温度にてオーステンパー熱処理は油焼入焼戻熱処理よりも低目の値を示し、マルテンパーエンドテンパー熱処理は油焼入焼戻熱処理に比して幾分高目の値を示している。然し硬度に於ては著しい差異は認められない。延伸率は抗張力と反対の傾向を示す。簡易トルク試験に於ては油焼入焼戻熱処理が他の熱処理に比し高目の値を示す。オーステンパー熱処理はマルテンパ

ーエンドテンパー熱処理よりも低いトルクの値を示す。疲労破断試験ではオーステンパー熱処理を行うともつともよく次にマルテンパーエンドテンパー熱処理で、油焼入焼戻熱処理がもつとも低目の値を示す。以上の事から時計ゼンマイに於てトルクを必要とする時は油焼入焼戻熱処理 (350°C 前後焼戻) を行えば良いと思う。疲労に強いゼンマイを必要とすれば、マルテンパーエンドテンパー熱処理 (300°C~350°C 焼戻) を施すことが良いであろう。この場合トルクの不足はゼンマイの寸法を変えればよい。オーステンパー熱処理は疲労にはよいがトルクが充分出ない欠点がある。

2) 丸棒の素材に 3 種の熱処理方式を行うと硬度に於てマルテンパーエンドテンパー熱処理と油焼入焼戻熱処理とは余り変化はないが、前者が各反応焼戻温度で幾分高目の値を示す。オーステンパー熱処理はかなり低い値を示す。衝撃値は逆の傾向を示しオーステンパー熱処理がもつとも良い。抗張力は薄板の場合と同じ様にマルテンパーエンドテンパー熱処理がもつとも良く、次に油焼入焼戻熱処理で、オーステンパー熱処理が各反応(焼戻)

温度に於てもつとも悪い。延伸率は抗張力と反対の傾向を示している。

終りに本実験遂行に当つて終始熱心なる助力を寄せられた太田正之氏、桜井好正氏、田村博君、矢口剛君に深く感謝の意を表する次第である。

(発表昭和 25 年 3 月 24 日機械試験所研究発表会、昭和 25 年 4 月 3 日日本金属学会講演会、受付昭和 25 年 4 月 17 日)

- 1) Arthur. C. Forsyth & Roland P. Carreker, Metal Progress, 54 (1948), 683.
- 2) 大和久重雄, 飯島一昭, 柏木信雄, 日本金属学会誌, 13 (昭和 24), 29.
- 3) E. S. Darven Port, E. L. Reff & E.C. Bain, Trans. A. S. M., 22 (1934), 287.
- 4) 三橋鉄太郎, 上野学 機械試験所報, 3 (昭和24), 149.
- 5) 機械工学便覧.