りん青銅ばねの低温焼なまし時間の短縮に関する研究*

川 名 武^{*1}, 阿 部 博 英^{*2}A Study on Shortening of Low Temperature Annealing Time
for Phosphor Bronze SpringTakeshi KAWANA^{*3} and Hirohide ABE^{*3} Department of Mechanical Engineering, Ishinomaki Senshu University,
1 Minamisakai Shinmito, Ishinomaki shi, Miyagi, 986 8580 Japan

Low temperature annealing of helical compression spring using phosphor bronze fine wire is investigated, aiming short time residual stress relieving. In the process of coil spring, it is necessary to relieve the residual stress caused during wire deformation. But, the time for its heat treatment time is very long, for example, 10 minutes to 2 hours. To change this condition, residual stress relieving rate is formulated under the assumption that this stress relieving process is equal to stress relaxation in creep. This is because the both are caused by recovery of metal crystal before re-crystallization, explained by dislocation theory. Next, the constants of formula are determined through the experiments, measuring isothermal change of the uniform tensile stress. Utilizing the formula, the short time condition for annealing is found. As the result, in line coiling, annealing, and assembling is made possible.

Key Words: Residual Stress, Heat Treatment, Plastic Forming, Assembly, Low Temperature Annealing, Spring, Phosphor Bronze, Creep, Residual Stress Relieving Rate Formula

1. 緒 言

図1の上段は、いわゆるFA(Factory Automation)システムの典型的な構成を示したものであり、部品の加工と組立は分離して別な場所で行われることが通例である。部品の加工は部品加工ショップで行われ、組立ショップに運搬される。組立ショップでは、部品は自動倉庫をへて無人搬送車等により組付ステーションに搬送される。組付ステーションでは、組立ロボット等が組付けを行う。

これに代わるあるいはこれを補うものとして、著者等は図1の下段に示すように、部品加工と組立の機能を複合化したユニットにより構成された生産システム⁽¹⁾⁽²⁾を考案した。この場合、生産ラインの流れに応じて、ジャストインタイムに部品を加工することにより、部品調達に伴う管理業務および仕掛りの削減、システムの簡素化を実現することができる。

このような生産システムを情報機器の機構動作部等の組立に適用する場合、表1に仕様の例を示すコイル

ばねを対象とするユニットでは、コイリングおよびコイリング後の熱処理を生産ラインの流れに合せ迅速に行うことが必要になる。特に、熱処理の短時間化が大

Fig. 1 Complex of processing and assembling

* 原稿受付 2000年5月18日。

^{*1} 正員、石巻専修大学理工学部(〒986 8580 石巻市南境新水1-1)。^{*2} 石巻専修大学大学院。

E-mail: kawana@isenshu-u.ac.jp

きな課題となる。

2. ばねのコイルング方法 と残留応力の発生

小形ばねのコイルング方法としては、図2に示すように、コイルングピンと呼ばれる固定治具に素線を押してコイルングするピン方式がある。供給される素線は、ワイヤガイドを経てコイルングピンに達し、その後、線は一定の曲率を有するコイルとなる。コイルの平均直径 D はガイド端からコイルングピンに至る距離 a に、コイルの長手方向のピッチはピッチピンの紙面に垂直な方向の位置に依存する⁽³⁾。

巻線後の残留応力は次のように発生する。表1の仕様のばねのコイルングでは、コイルング時に素線は図3(a)に分布を示す曲げ応力(断面に垂直な方向の引張り・圧縮応力)を受ける。ここで、素線は弾完全塑性体と仮定した。コイルング後には、外部からの荷重はなくなって、断面中心のモーメントの和が零となるように図3(b)に示す応力分布となり、これが残留応力となる⁽⁴⁾。

この残留応力がばね使用時に発生する応力と同時に作用することになる。引張り・圧縮ばねの場合、長手方向荷重により、線材はねじりモーメントとせん断力

を受ける。しかし、通常、せん断力の値は小さく、ねじりモーメントのみ考えればよい。ねじりによるせん断応力の最大値は線材の最外周で発生するが、残留応力の最大値は図3(b)に示すように線材の中心近傍で発生する。したがって、残留応力の最大値が直接問題にはならないが、以後の検討は最大値を対象とする。

3. 低温焼なまし

3.1 残留応力の除去 小形のばねの製作は、すでに適当な冷間加工と熱処理によりばねに適した一定の特性を付与した材料をコイルングすることによる。ついで、低温焼なましにより、その加工前の特性を損なわずに残留応力を除去することが一般的である。条件としては、ここで対象とするりん青銅では190～350℃で20～40分、ステンレス鋼では350～450℃で1時間とされる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

本研究の目的はこれを短時間化することである。このような目的の先行する報告を見出すのは困難で、加熱炉の改善を行うもの⁽⁶⁾を検索するにとどまった。また、焼なまし過程での応力の変化および除去の程度も一般的に明らかでなく大きな課題であり、これに関する解析的報告⁽⁷⁾がみられるが、焼なまし時での対象物内の温度分布への対応に関するものである。

3.2 低温焼なましの金属工学的考察 解説的文献等^{(8)~(14)}を要約すれば、次のとおりである。残留応力の除去は金属の応力弛緩作用を利用して行われ、あらかじめ付与された特性を失わず応力のみを除去するため、再結晶温度以下の温度で行われる。除去の過程で金属組織の変化はみられない。

また、この応力弛緩は金属の回復現象による。回復とは、結晶粒の形や結晶の向きに変化を生じないで、物理的性質や機械的性質のみが変化する過程であり、再結晶に先行しておきる現象である。

Table 1 Specification of spring

Appearance
Material	Phosphor bronze (C5191W-H)
Dia. of wire	$\phi 0.1\text{mm}$
Dia. of spring	$\phi 1.4\text{mm}$
Free length	7.0mm
Total NO. of coils	22.5
Spring constant	$11.8 \pm 0.12\text{mN}$

Fig. 2 Principle of spring forming

Fig. 3 Stress distribution at cross section of wire

さらに、回復は金属原子の挙動に関する転位論で説明され、転位の移動、消滅あるいは点欠陥の消失によるという説明があるが、一致した結論を得るに至っていないようである。

3・3 低温焼なましとクリープ 低温焼なましの短時間化には、焼なまし過程での応力低減速度式を求めるのが望ましい。しかし、低温焼なましに関する文献・資料は乏しく、応力低減速度式の設定に関するものは見出せなかった。

そこで、工学的に大きな分野を形成しているクリープに着目した。クリープは、高温下で応力を一定に保っておくと、ひずみが時間とともに増大する現象である。このクリープの範疇の一つに応力弛緩があって、ひずみを一定に保っておくと応力が時間とともに減少する現象である。この応力弛緩も回復の過程と考えられている⁽¹⁵⁾。応力弛緩と低温焼なましとは、後者が冷間加工後に限定されている相違があるだけである。

クリープに対しては、材料の高温強度・結晶の高温塑性の観点から、現象論的・経験的・物理的にさまざまなアプローチが進められている⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。

クリープには、遷移クリープ・定常クリープ・第三次クリープと三つの段階がある。このうち、クリープ現象を支配するのは定常クリープであり、物理的に多くのモデルが提案されている。転位の運動によりおこることを中心に種々の説明がなされ、クリープ速度に定量的な式が与えられている。これを低温焼なましにも適用することにする。

4. 低温焼なまし過程の定量化

ここでは、クリープ速度式の延長として低温焼なまし速度式の設定を行う。

4・1 クリープの速度式 クリープ速度に対する温度の影響については、下記の熱活性式に従うとされる⁽¹²⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。

$$\frac{d\varepsilon}{dt} \propto \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad \cdots \cdots (1)$$

ε : ひずみ

t : 時間

Q : 活性化エネルギー

R : 気体定数

T : 絶対温度

ここで、 RT は原子のもつ平均振動エネルギー、 Q は原子が再配列等によりクリープ現象を起こすために必要なエネルギー、 $\exp(-Q/RT)$ は Q より大きいエネルギーの原子が存在する確率である。

応力の影響については、定常クリープに対して下記

の Dorn の速度式がある⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。

$$d\varepsilon/dt \propto \sigma^n \quad \cdots \cdots (2)$$

σ : 応力

n : 応力指数

以上を総合し、クリープの速度式として一般的なものが次式^{(15)~(18)}であり、 A は定数である。

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = A \cdot \sigma^n \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad \cdots \cdots (3)$$

4・2 低温焼なましの速度式 まず、上記のクリープの速度式は、低温焼なましにも適用できると仮定する。さらに、残留応力の除去過程では、下記(4)式のフックの法則に従う、その縦弾性係数 E は温度に依存しないと仮定する。低温焼なましは回復で説明される現象だからである。

$$\sigma = E\varepsilon \quad \cdots \cdots (4)$$

これを式(3)に代入した下記の式(5)を低温焼なましの速度式とみなすことにする。

$$\frac{d\sigma}{dt} = A \cdot E \cdot \sigma^n \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad \cdots \cdots (5)$$

5. 焼なましによる残留応力除去実験と速度式定数の算出

現在製品に使用されているばねを対象にして、現行の熱処理による残留応力の除去量を明らかにし、さらに、その短時間化のために、4章で設定した低温焼なましの速度式の定数を求めることを目的として、低温焼なましに対応する実験を行った。

5・1 実験装置と実験方法 図4に示す装置構成において、線材をワイアホルダ A, B に取付け、線材に熱風を吹き付けて加熱する。線材が一定の所定温度に達するあらかじめ計算した時間の後に、ねじを回して所定値まで張力を加える。線材の張力の測定は、ワイアホルダ A を介して、ロードセルに荷重を加えることによる。その後、設定した時間、引き続き熱風を吹き付け、線材の張力の変化を測定する。

この実験方法を採用した理由は下記のとおりである。なお、実験材料は表1のりん青銅線(C 519I W-H)とした。

Fig. 4 Experimental system for stress relieving

(1) コイルばねの形態では、ばね特性はともかく、応力の測定は困難である。

(2) 線の形態では一軸応力状態であり、初期応力の設定、その後の変化の測定が容易で、現象が把握しやすい。

(3) 熱風を利用したのは、温度の過度な上昇を防止するためである。細線であるため、線材内の温度分布は無視できる。

(4) 線材が一定温度になった後に張力を加えるのは、線膨張の影響を排除するためである。

5.2 現行の熱処理条件による残留応力の除去

先に示したばねのコイリング後の残留応力の最大値は、695 N/mm²である。それに対する現行の熱処理条件は下記のとおりである。

温度：150～200℃

時間：5～10 分

そこで、先に示した実験装置において、初期応力を 695 N/mm²、熱処理温度を 200℃、熱処理時間を 10 分として、残留応力の除去量を求めることにした。なお、熱処理条件を上記としたのは、式(7)からわかるように、温度が高いほど、時間が長いほど残留応力は小さくなるからである。

除去実験の結果を図5に示す。除去された応力は 214 N/mm²であって、初期値の約 31%にあたることからわかった。これが適切な除去量か否かは問題ではあるが、ここでは以後、同程度の除去を短時間で言う検討を進めることにする。

5.3 各種条件での熱処理実験と速度式定数の算出

5.3.1 実験条件 下記に示す条件の組合せによる 21 とおりの実験とした。応力の最大値がばねの最大残留応力値より小さいのは、実験装置の都合による。

初期応力(N/mm²)：200, 400, 600

熱処理温度(℃)：200, 220, 240, 260, 280, 300,

320

熱処理時間(s)：600

Fig. 5 Stress change by conventional stress relieving condition

5.3.2 定数の算出 実験データの解析にあたり、式(5)を微小な時間 Δt ごとに適用するとし、両辺の対数をとって得られる式(6)を用いることにする。

$$\ln \left[\frac{\Delta \sigma}{\Delta t} \right] = n \cdot \ln \sigma + \left[\ln(AE) - \frac{Q}{RT} \right] \quad \dots\dots\dots (6)$$

$T=513 \text{ K} (240^\circ\text{C})$ の場合を例として、 $\ln \sigma$ を横軸に $\ln [\Delta \sigma / \Delta t]$ を縦軸に取って示したのが図6である。各初期応力値ごとに直線とみなせる分布をしている。そこで、回帰計算によりこう配すなわち応力指数 n を求めるとその標準偏差は 21 とおりの実験ですべて 10% 程度となり高い直線性を示した。

さらに、その n の値と焼なまし温度 T との関係を示したのが図7である。 n は、温度 T の一次回帰として式(7)に示すように求められる。応力の大ききには依存しない。

$$n = -8.87 \times 10^{-2} T + 53.9 \quad \dots\dots\dots (7)$$

次に、 $[\ln(AE) - Q/RT] = C$ とおくと、 n と同様に C の回帰値も実験ごとに求められる。 C と絶対温度

Fig. 6 Linearity of $\ln (\Delta \sigma / \Delta t)$ to $\ln \sigma$

Fig. 7 Temperature reliance of n

の逆数との関係を示したのが図8であり、これより、次の回帰式が得られる。

$$C = 264.2 - 1.6 \times 10^5 / T \quad \cdots \cdots (8)$$

ここで、気体定数(R)および縦弾性係数(E)は既知であるから、式(8)は、活性化エネルギー(Q)および定数(A)が、温度、応力に依存しない定数として求められたことを示している。

また、式(7)、(8)の結果を式(5)に代入したのが求める温度焼なましの速度式となる。

5.3.3 応力除去速度式による短時間化の予測

5.3.2項で得られた焼なましの速度式を用い、図5に応力推移を示したばねの現行の加熱温度(473 K)に対し、温度を30~100 K高く設定した場合の応力推移を求めた。その結果を図9に示す。600秒を要したと同等な応力除去が10秒以下にと、大幅な時間短縮が可能になることがわかる。また、最終的な残留応力量を目安にして条件を設定しうることも示している。

5.4 熱処理条件と線材特性 上記の熱処理は処理温度を高めてその短時間化を図っている。そこで、再結晶に至らず回復の範囲にあることを確認するため、引張試験機で線材の機械特性を調べた。図10は熱処理の残留応力が、ほぼ等価になる温度・時間の条件での引張り強さ、伸びの測定結果を示したものである。

Fig. 8 Relation between C and temperature

Fig. 9 Stress change by stress annealing velocity formula

高温で、短時間化にともなう引張り強さおよび伸びの変化は小さく、再結晶には至らない回復の範囲内にあると思われる。りん青銅と類似したCu-Zn-Sn合金を合金を対象とした同様な報告がみられる⁽¹⁹⁾。

5.5 実験結果等のまとめと考察

(1) 実用されている低温焼なまし条件での残留応力低減の推移を実験的に求めた。焼なましによって、残留応力が必ずしも零にならないこと、残留応力量を設定して、機器設計および焼なまし条件設定を行うべきことを明らかにした。

(2) りん青銅線を対象とする低温焼なましの速度式を求めた。焼きなまし速度式において、 A 、 Q は定数として求められたが、Dornの速度式の応力指数 n は温度に依存する値となった。このような先行報告は見当らず、適用範囲(材料・温度・応力等)および理由についての検討が必要である。

(3) 上記の懸念はあるが、実用上、りん青銅を対象とし実験した温度範囲内であれば、求めた低温焼なまし速度式から短時間化しうる熱処理条件の予測が可能となった。

6. コイリング・熱処理装置の試作

コイリング後の熱処理を短時間でい行得との結果に基づいて、ばねのコイリングおよび熱処理を行う装置を試作した。その構成を図11に示す。

コイリング・ユニットでばねを成形したのちハンドリング・ユニットでパレットに装入し、このパレットを小コンベアに載せて熱処理ユニットまで搬送し、ついで熱風を吹き付けて熱処理を行う。熱風には線材の酸化防止のため不活性ガスを用いた。

Fig. 10 Change of mechanical property by thermal treatment

Fig. 11 Schematic view of equipment for coiling and thermal treatment

この後、図示は省略したが、主生産ライン上のワークに対し、組立ロボットによりコイルばねを組付する、すなわち、加工・組立の複合化が可能になった。

7. 結 言

(1) 低温焼なましは、加工前に付与された材料の特性を損なわずに、加工による残留応力を除去するものであり、点欠陥の消失あるいは転位の移動による回復を利用して、これは回復によるクリープと同一現象とみなし得る。

(2) そこで、クリープに用いられている熱活性化式および Dorn の式を基礎とするひずみ速度式を用いるとともに、低温焼なましの際にはフックの法則が適用できると仮定して、残留応力減少の速度式を設定した。

(3) ついで、線材の一軸引張りを対象とする等温焼なまし実験を行い、従来の焼なまし条件での残留応力除去量を明らかにするとともに、上記速度式の定数

を求め、従来と同様な残留除去を短時間で行いうる焼なまし条件の設定を可能にした。

(4) 以上を基礎として、ばねコイルングおよび低温焼なましを連続して行う装置を試作し、生産ラインの流れに応じて、ジャストインタイムにコイルばねを加工・組立することが可能なことを確認した。

文 献

- (1) 川名武・ほか9名, Production System for molded and Pressed Parts, USP 5371931, (1994).
- (2) 川名武・ほか9名, 加工組立複合ユニットとその制御方法, 特許 5371931, (1995).
- (3) 久納孝彦・ほか2名, 一本ピンコイルングにおける工具配置と製品形状, ばね論文集, 27 (1982), 66.
- (4) ばね技術編集委員会編, ばね, (1960), 153, 323, 丸善.
- (5) 編集委員会編, 金属熱処理技術便覧, (1965), 681, 日刊工業新聞社.
- (6) Grenier, M., High Speed Stress Relief, *Wire Technol. Int.*, **25** 2 (1997), 155-157.
- (7) Nakacho, K. and Ueda, Y., An Efficient Method for Estimation of Reduction of Welding Residual Stresses from stress Relief Annealing, *Trans. JWRI*, **23** 1 (1994), 79-84.
- (8) 日本熱処理技術協会編, 鋳物と非鉄金属材料の熱処理, (1970), 152, 日刊工業新聞社.
- (9) 日本熱処理技術協会編, 熱処理の基礎(I), (1971), 72, 日刊工業新聞社.
- (10) 日本熱処理技術協会編, 機械部品の熱処理(II), (1970), 124, 日刊工業新聞社.
- (11) 大黒貴・松尾信太郎, 銅合金の熱処理と強度, 熱処理, 19 (1979), 308-313.
- (12) 小原嗣朗, 金属組織学概論, (1972), 93, 朝倉書店.
- (13) 河合望, 塑性加工学, (1988), 17, 朝倉書店.
- (14) 幸田成康, 百万人の金属学, (1990), 13, アグネ.
- (15) POIRIER, J., (小口醇訳), 結晶の高温塑性, (1980), 113, 養賢堂.
- (16) 大谷隆一・駒井謙治郎編, 環境・高温強度学, (1984), 224, オーム社.
- (17) Hann, Y. and Chaturvedi, M. C., Steady State Deformation of Superalloy Inconel 718, *Mater. Sci. Eng.*, **89** (1987), 25-33.
- (18) Siethoff, H., Change in Steady State Deformation Mechanism of FCC Metals at Intermediate Temperatures, *ZeitSchrift fuer Messen Stern Regein*, **77** 8 (1986), 481-488.
- (19) 西畑三樹男・ほか2名, Cu Zn Sn 薄板ばねの機械的性質, ばね論文集, 26 (1981), 21.