加工熱処理シミュレータ*

Thermo-mechanical Treatment Simulator

綾田 倫彦**, 東野 豊之**

Michihiko AYADA・Toyoyuki HIGASHINO

軽量化の観点から、最近、高強度・高靱性ばね材料の開発が望まれている。加工熱処理法(T.M.T.)は、このような優れた機械的性質を得るための有効な手段のうちの1つである。過去、加工熱処理の研究は行われてきたが、加熱・冷却・加工を結びつけた優れた制御方法がなかったため、その効果を十分に引出せなかった。そこで、我々は加工熱処理のメカニズムを研究する目的で、新しく連続多段圧縮を特徴としたコンパクトな加工熱処理シミュレータを開発した。本装置は、他に“鍛造焼入れ”、“焼戻し温間鍛造”などの加工熱処理法にも適用できる。本論文は、このシミュレータの概要とT.T.A., T.T.T.やオースフォーミングに関する試験例についてまとめたものである。本装置により、ばね鋼の機械的性質を改善するための適性な加工プロセスが見出されると思われる。

From the viewpoint of weight saving, it has recently been required to develop high-strength and high-toughness spring steel. Thermo-mechanical treatment (T.M.T.) process would be one of the effective methods to achieve high mechanical properties of spring steel. Although several studies have been making in this field, it was difficult to obtain the advantage of T.M.T. process, because of the difficulty to control the combination of heating, cooling and forming process effectively. A new compact type T.M.T. simulator based on continuous multi-step compression, was developed to study the mechanism of the T.M.T. process. It will be possible for this simulator to apply some different T.M.T. processes such as work-quenching and warm temper forging etc. This paper is mainly concerned with the outline of this simulator and some experimental results of T.T.A., T.T.T. diagrams and ausforming. By using this simulator, the appropriate process to improve mechanical properties of spring steel would be obtained.

1. 緒言

近年、自動車懸架用ばねは軽量化に対するニーズから高強度・高靱性化が強く望まれている。

このための対策としては、(1)焼戻し硬さを向上させる方法、(2)Mo, Vなどの強化元素を添加するなど新鋼種の開発、及び、本報で言う(3)加工熱処理法の適用などが考えられる。

(1)項に関しては、耐へたり性の改善効果は認められるものの靱性低下が問題となる。

(2)項に関しては、延性改善と耐へたり性向上の相反する現象を満足する成分設計に苦慮しているのが現状である。

(3)項に関しては、1960年代に最も基礎研究が多くな

され、最近板ばねにおいてもモディファイド・オースフォーミングが再検討されている^{1)~3)}。

一般に加工熱処理法は、加工の時期と利用する変態により、表1に示すような種々の加工法に分類される⁴⁾。

ところが、従来、加工熱処理法の研究の進め方としては実機を用いることが多く、当然ながらこのように数多くの加工法を検討することは装置性能上不可能であった。

最近になり、広範囲の加工熱処理条件に対応すべく大型のシミュレータが開発されている^{5)~8)}。

これに対し、我々はコンパクト化、汎用性を主眼とした独自の連続多段圧縮型の加工熱処理シミュレータを開発した。

本報では、このシミュレータの概要と応用例としてT.T.A., T.T.T.図の作成例とオースフォーミングに関する基礎実験結果についてまとめた。

原稿受付日 昭和63年11月1日

* ばね技術研究会 昭和62年度秋季講演会で発表

** ㈱日発グループ中央研究所 (NHK SPRING R&D CENTER INC.)

表1. 鋼の加工熱処理法の分類

加工の時期	利用する変態	拡散変態 (フェライト, パーライト)		無拡散変態 (マルテンサイト)	
		分類	名称	分類	名称
変態前の加工	安定オーステナイト域での加工		制御圧延	安定オーステナイト域での加工	鍛造焼入
	準安定オーステナイト域での加工			準安定オーステナイト域での加工	オースフォーム
変態途中の加工	パーライト変態途中の加工		アイソフォーム	マルテンサイト変態途中の加工	サブゼロ加工 変態誘起塑性 (TRIP)
変態後の加工 (と時効)	パーライトの加工		バテンディング伸線	マルテンサイトの加工	温間加工, 冷間加工→ 焼もどし時効 焼もどしマルテンサイトの加工 (ストレインテンバ)

2. 加工熱処理シミュレータ装置の概要

本シミュレータは、油圧システムによる圧縮型の加工装置を中心として、高周波誘導加熱装置による加熱系、及び、圧縮空気を用いた冷却系の3ブロック、さらに、これらの駆動・制御を行うパーソナル・コンピュータシステムから構成される。

図1に、本シミュレータの外観、表2に、主な仕様、図2に、ブロック図を示す。

本装置では、油圧シリンダは11kWの油圧ポンプと容量30L、N₂ガス封入圧14.7MPaの蓄圧型アキュムレータ4基により、定格出力20.6MPa、吐出量600l/minで駆動される。

従って、高速圧縮(最大200mm/sec)、連続多段圧縮(0.5secのインターバルにて5回まで連続圧縮)を可能とし、高速加工時の動的再結晶、変形間時間における静的再結晶、あるいは、多段加工時の累積ひずみの効果なども実験可能とした。

加熱装置は、急速加熱を可能とするために定格20kW、30kHzのサイリスタ位相制御方式・高周波誘導加熱装置を用いた。この出力調整は、D/A変換器を介しパーソナル・コンピュータにより行われ、□7のSUP7に対して最大加熱速度で300K/secの加熱能力がある。

なお、温度検出は973K以下の低温域は1色放射温度計、973K以上1673K以下の高温域は2色放射温度計を用い、温度出力電圧はA/D変換器を介してパーソナル・コンピュータに読取られる。

さらに、冷却系としては超低温空気発生器(エアーコルダ)と電空流量弁を組合せ、D/A変換器を介してパーソナル・コンピュータにて弁の開放量を調節することにより、冷却速度の制御を行う。この場合、圧縮空気を供給することにより、□7のSUP7に対して最大冷却速度は100K/secと臨界冷却速度以上の急速焼入れが可能であった。

左から パソコン (PS・85)、油圧マニホールド、加工装置制御盤、加工装置本体

図1. 加工熱処理シミュレータ外観

表2. 加工熱処理シミュレータの主な仕様

加熱方式	高周波誘導加熱方式, 20KW, 30KHz サイリスタ位相制御
加熱速度	最大 300K/sec (70, SUP7)
冷却方式	圧縮空気を超低温空気発生器を介して 噴射, 流量は電空流量弁にて制御
冷却速度	最大 100K/sec (70, SUP7)
最大荷重	294KN
ピストンストローク	最大 30mm
圧下速度	最大 200mm/sec, 最小 0.1mm/sec
連続圧縮	インターバル0.5secにて最大5回まで
圧下量制御	DCサーボモータによるストッパー位置 回転制御
位置変更速度	最大 5mm/sec
横移動量の制御	DCサーボモータによるつかみ部のスラ イド方式
横移動速度	最大 500mm/sec
温度検出	2色温度計及び1色温度計

図2. ブロック図

図3. 加工装置の主要部断面

図3は、加工装置の主要断面を示すが、圧下量の制御はDCサーボモータにより歯車を高速回転させて油圧シリンダロッドのストップ位置を調整することによる。

これにより、高速の圧下量変更(最大5mm/sec)と高精度の位置再現性をもたせている。

なお、試験片の加工・加熱・冷却の3ゾーンへの横

移動は、スライドベアリング上をスライドする試験片つかみ部をDCサーボモータで高速移動(500mm/sec)することによっており、圧下制御と共にD/A変換器を介してパーソナル・コンピュータにて動作制御される。

プログラム言語はベーシックを用いているが、応答性としては充分仕様を満足している。

3. 応用例

3.1 変態線図

最近、急速加熱焼入れ・急速焼戻し処理したばね鋼の高強度・高靱性化の報告もあり^{9),10)}、急速加熱・冷却時の変態挙動を把握することは重要である。

本シミュレータの応用として、本来の加圧装置を静止させることで例えば、急速加熱時のオーステナイト化条件(T.T.A.図)、等温変態図(T.T.T.図)、連続冷却変態図(C.C.T.図)などのいわば静的な変態挙動の探索にも応用は可能である。

図4は、SUP7のT.T.A.図への応用例を示すもので、急速加熱時に未溶解炭化物や未変態フェライトがなく、しかも、結晶粒の粗大化を起こさない適正なオーステナイト化条件が求められている。

また、図5は、T.T.T.図への応用例を示すが、オースフォーミングの際の比較データとして重要で、ノーズの位置やペイの深さ、及び、パーライト変態、ベイナイト変態、マルテンサイト変態の開始と終了の条件などが求まる。

3.2 オースフォーミング

3.2.1 ヒートパターンと加工特性

本装置を用いて、“加工焼入れ”、“オースフォーミング”、“焼戻し温間加工”など各種の加工熱処理法がシミュレート可能であるが、ここでは、オースフォーミングへの適用例について報告する。

図6は、オースフォーミング時のヒートパターンの測定例である。

この場合、オーステナイト化は2色放射温度計、過冷オーステナイト化は1色放射温度計で検出し、加熱制御は比例制御を用いている。

図中に、K熱電対による実測値も示したが、(a)部のオーステナイト温度での等温保持、(b)部の過冷オーステナイト温度へ過冷却を生ずることなく漸近し等温保持している点など、急速加熱・冷却にもかかわらず基本的なヒートパターンが精度良く得られている。

オースフォーミング時のアンビルと試験片の配置を図7に示すが、加圧面は約20mm×10mmである。

また、図8にオースフォーミング材のマクロ断面(ナ

(a)未変態フェライト

(b)均一マルテンサイト

(c)結晶粒粗大化

(d)未溶解炭化物

25μm

図4. オーステナイト化条件 (T.T.A.図) への応用例

図5. 等温変態曲線への応用例

イタル腐食)を示すが、圧縮型の特性としてアンピルの圧下面直下には非変形域があり、対角線上にすべり変形帯が認められることから、加工ひずみの均一性の観点からは問題が残る。

図9は、オースフォーミング時の荷重・変位の測定例であるが、高速圧縮のため加工初期に衝撃による荷重のピークが認められ、一定変位に保持中にも試験片の熱収縮が再結晶によると思われるが動的に軟化を生じている。

オースフォーミング時の変形応力は、焼入れ直前の加工硬化したオーステナイトを評価するために、図中に示したように除荷直前の荷重より求めた。

なお、一定変位の保持時間を短くすることにより、高速多段加工(変形間時間が約0.5sec)ができ試験片の長手方向の移動と組合せの断続的な加工ではあるが所望長さの試験片が得られる。

図10, 11に、オースフォーミング中の変形応力に及ぼす加工度、過冷オーステナイト保持時間と温度の影響を示す。

図10より、オースフォーミング中の変形応力は圧下率 $r = 36\%$ 程度で最大となり圧下率 $r = 50\%$ 程度では 36% に比べて低下している。従って、オーステナイトが最も加工硬化する圧下率が 36% 程度で、これより強圧

下を与えても動的再結晶により加工軟化が起こっていると思われる¹¹⁾。

また、保持時間が長くなりベイナイト変態が始まりかけると変形応力が増加していることから、所要荷重を軽減し、十分に加工硬化したマルテンサイトを得るためには短時間の保持が望ましい。

過冷オーステナイト温度が上昇するに従って、図11のように変形応力は低下するが、変態を伴うので後述のようにオースフォーミング時には焼入れ後の硬さが十分高くなるような温度を選定しなければならない。

3.2.2 硬さと組織

図12は、オースフォーミング後の室温硬さに及ぼす過冷オーステナイト化条件の影響をみたものである。

図中に、参考としてオースフォーミングと同一ヒートパターンでマルクエンチ材を破線で示すが、過冷オーステナイト温度が低いほど、オースフォーミング材とマルクエンチ材との硬さの差が大きい。

また、過冷オーステナイト温度での保持時間が長くなると硬さが低下していることから、過冷オーステナイト領域でも安定状態は狭く、変態が進行していることがうかがえる。

なお、過冷オーステナイト温度 873K 、保持 20sec 以上ではフェライト・パーライト変態を生じ急激に軟化

図6. オースフォーミング時のヒートパターン測定例

オーステナイト化 1223K, 30sec
過冷オーステナイト温度 673K
過冷オーステナイト保持時間 10sec

図8. オースフォーミング材のマクロ断面

図7. アンビル及び試験片の配置

オーステナイト化 1223K, 30sec
過冷オーステナイト温度 673K
過冷オーステナイト温度
での保持時間 50sec
加工度 50%

図9. オースフォーミングにおける荷重・変位の測定例

図10. オースフォーミング中の変形応力に及ぼす加工度と保持時間の影響 (過冷オーステナイト温度 773K)

図11. オースフォーミング中の変形応力に及ぼす過冷オーステナイト温度の影響 (加工度 36%)

する。

図13は、オースフォーミング材とマルクエンチ材の同一焼戻し条件での硬さ分布を板厚・板巾方向で比較したものである。

板厚方向では、圧下面直下に非変形域があるため、オースフォーミング材とマルクエンチ材で差は認められないが、加工ひずみの大きな板厚中心ではオースフォーミング材の方が硬い。

板巾方向では、板厚方向に比べると比較的硬さ分布は平滑で、オースフォーミング材の方が硬く焼戻し軟化抵抗が高いことがわかる。

図12. オースフォーミング後の室温硬さに及ぼす過冷オーステナイト条件の影響

図13. オースフォーミング材とマルクエンチ材の焼戻し硬さ分布の比較

以上を考慮して、後述の薄板疲労試験においては硬さ分布の均一な板巾方向の試験片を切出して製作した。(図7参照)

なお、図14に、この時の光学顕微鏡組織の比較を示すが、オースフォーミング材は圧下方向と垂直な方向に結晶が伸展した集合組織を呈しているところが特徴的である。

3.2.3. 疲労

オースフォーミング材の疲労強度を確認する目的で、図7に示した薄板試験片を用い、3μmのアルミナ砥粒でポリッシング加工を行った後、電磁加振疲労試験に

図14. オースフォーミング材とマルクエンチ材の焼戻し後の組織比較例

図15. オースフォーミング加工度と疲労寿命

供した。

図15に、応力条件が各々 $\pm 784\text{MPa}$ 、 $\pm 882\text{MPa}$ の場合のオースフォーミング加工度と疲労寿命の関係を示す。

薄板の場合、試片のコーナー面取りやセット精度などの影響により折損回数はかなりばらついているものの、一般的な傾向としてはオースフォーミング加工度が増加するほど高寿命の傾向が認められる。

オースフォーミング加工度と加工時の変形応力の関係(図10)からみると、加工度が36%程度で最も加工硬化が大きいため疲労寿命もこの加工度近傍で極大を示すのではないかと考えられたが、結果は50%の方が高寿命を示した。

ここでは、焼戻し後の硬さをほぼ同一にしておき、加工度の大きい方が加工集合組織の影響が強いためではないと思われるが、今後、試験数を増加し加工度の効果をより明確にする必要がある。

図16は、ビッカース硬さを基準にオースフォーミング材と調質材の疲労寿命を比較したものである。

一般的には、硬さと共に疲労寿命は向上する傾向が

あり、ビッカース硬さが550以下では両者の差は殆ど見られないのに対して、ビッカース硬さが600以上の高硬さ域でオースフォーミング材の疲労強度が優れていることがわかる。

両者の疲労破面の比較を図17に示すが、ほぼ同一の焼戻し硬さであるにもかかわらず、オースフォーミング材は粒内破壊型の破面であり、調質材は粒界破壊型の破面を呈している。

このことが、高硬さ域での疲労寿命に影響していると思われる、オースフォーミングによって粒界が強化され疲労き裂の伝ばが遅れたためではないかと考えられる。

図16. オースフォーミング材と調質材の疲労寿命の比較

図17. 薄板での疲労破面の比較

4. 結 言

加工熱処理法は、文字通り加工と熱処理の組合わせであるから、与える加工方法、加工速度(ひずみ速度)、加工度(ひずみ)はもとより、加工時期が変態前なのか変態中なのか変態後なのか、さらに利用する変態が拡散変態か無拡散変態かにより得られる材質は全く異なり、無数の可能性を秘めている。

ばねを取巻く環境をみると、軽量化に対するニーズから更に材料の高強度化・高靱性化へ究極の材料開発が求められており、何らかの加工熱処理法により積極的に材質改善を図る必要があるのではないだろうか。

幸いにして、近年、コンピュータによる制御技術の急速な進歩により、従来は全く困難とされていた技術も身近なものになっている。

本報で述べた加工熱処理シミュレータは可能な限り多くの加工熱処理法に対処できることを主眼に、かつ、パーソナル・コンピュータで操作できる程度のコンパクトさを特徴として製作したものである。

もちろん、圧縮型であるためにひずみが不均一となる点、加工ひずみ速度が最大50/secで高速加工までは完全にシミュレート不可能である点(現在、線材圧延では最大500/secに達するものもある。)など不十分な点も残されている。

しかし、それまでの加工熱処理の研究方法与比較すると、影響因子をかなり明確に区別することが可能となり基礎的な検討が行えるようになった。

本報では、オースフォーミングに関する一部の基礎実験結果についてのみ述べたが、オースフォーミングによる疲労強度の向上に関しては、今後さらに金属組

織学的にも詳細な検討が必要である。

また、鍛造焼入れ、焼戻し温間鍛造など他の加工熱処理法に関しても本シミュレータによる検討を行い、高強度・高靱性ばね材料を得るための適正な加工プロセスを見出したいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 小曾根敏夫, 川越誠, ばね技術研究会昭和62年度 春季講演会前刷集, (1987), p.5.
- 2) 杉本淳, 田中達夫, 脇門恵洋, 大木喬夫, ばね技術研究会昭和62年度秋季講演会前刷集, (1987), p.5.
- 3) 尾崎克彦, 西岡克幸, ばね技術研究会昭和63年度春季講演会前刷集, (1988), p.24.
- 4) 牧正志, 田村今男, 塑性と加工, Vol. 25, No. 284, (1988), p.772.
- 5) 矢田浩, 松津伸彦, 関根寛, 二村忠, 鉄と鋼, '80-S 992, (1980), p.392.
- 6) 大北智良, 新倉正和, 日本鋼管報, No. 101, p. 117, (1984).
- 7) 横井玉雄, 美坂佳助, 鉄と鋼, '83-S 466, (1983), p.150.
- 8) 電気製鋼, Vol. 54, No. 3, (1983), p.220.
- 9) 川寄一博, 千葉貴世, 山崎隆雄, 鉄と鋼, 第74年, 第2号, (1988), p.128.
- 10) 同 上, p.136.
- 11) 田村今男, 日本金属学会会報, Vol. 20, No. 12, (1981), p.987.