

ミストパテンティング活用線材

Development of Steel Wire Rods Applied Mist Patenting Process

村上 俊之 エヌケーケー条鋼㈱ 仙台製造所 商品技術部
 研究開発グループ 主任部員
 大和田能由 エヌケーケー条鋼㈱ 仙台製造所 圧延部 主任部員
 玉井 豊 エヌケーケー条鋼㈱ 仙台製造所 商品技術部
 商品技術第二グループ 主任部員
 白神 哲夫 エヌケーケー条鋼㈱ 仙台製造所 商品技術部
 研究開発グループ マネージャー

Toshiyuki Murakami, Noriyoshi Ohwada,
 Yutaka Tamai and Tetsuo Shiraga

今日、熱間圧延硬鋼線材のダイレクトパテンティング(DP)法としては、ステルモア法が広く普及しているが、衝風による強制冷却のため冷却能力が十分に大きくなく、そのため鉛パテンティング(LP)線材と比較すると強度、延性が低くなる。このほど、LP線材に匹敵する高い強度、延性を有するDP線材を製造する方法として、ミストパテンティング(MP)法を開発した。本稿では、まず、MP法の基本概念を述べ、次に、MP法を活用して開発した新製品の例を紹介する。

The Stelmor process has been widely used as a direct patenting method for hot rolled high carbon steel wire rods, but the strength and ductility of its products are lower than those of lead patented products. We developed a mist patenting process which could produce directly wire rods with same strength and ductility comparable to those of lead patented wire rods. This report presents an outline of the mist patenting process and examples of new products developed by the application of the process.

1. はじめに

エヌケーケー条鋼㈱仙台製造所線材工場では、硬鋼線材、ピアノ線材、冷間圧造用炭素鋼線材、軟鋼線材など、直径が5～16mmの線材を熱間圧延により製造している。今日、硬鋼線材やピアノ線材などの高炭素鋼線材の強度、延性を圧延オンライン上で高める処理法として、ステルモア冷却(以下、SCと略記する)法が広く普及している。圧延した線材を強い風で冷却して強度、延性を高める方法であるが、衝風による強制冷却のため冷却能力が十分に大きくなく、そのため鉛パテンティング(以下、LPと略記する)処理線材と比較すると強度、延性が低値である。また、その傾向は線径が太径になるにつれて顕著である。LP処理とは、二次加工メーカーの段階で、強度、延性を高める目的で、線材を再加熱後、溶融鉛に浸漬する処理である。Fig.1に概念的に示すようにSC法と比較して低温側で変態が進行するため、高強度、高延性が得られる。一方、Fig.2に示すように強度上昇を目的にCを増量添加すると強度は上昇するが、延性(絞り)は向上せず、逆に低下する。したがって、強度と延性を同時に向上させるには、圧延後にLPと同じような冷却形態を確保することが必要となる。Fig.3に各種冷却法の冷却能力の比較を示すが、SC法の冷却能力改善のため、次のような利点からミスト冷却に着目した。ミスト冷却とは、空気により微細にした水滴を高速で被冷却物体に吹き付け、冷却する方法である。

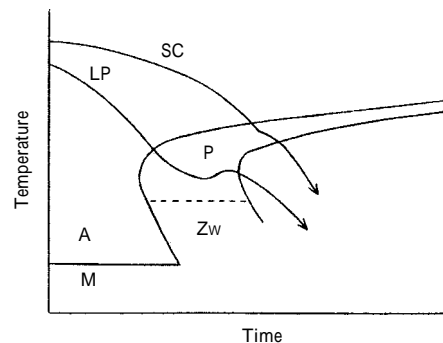


Fig.1 Schematic cooling curve of lead patenting and stelmor cooling

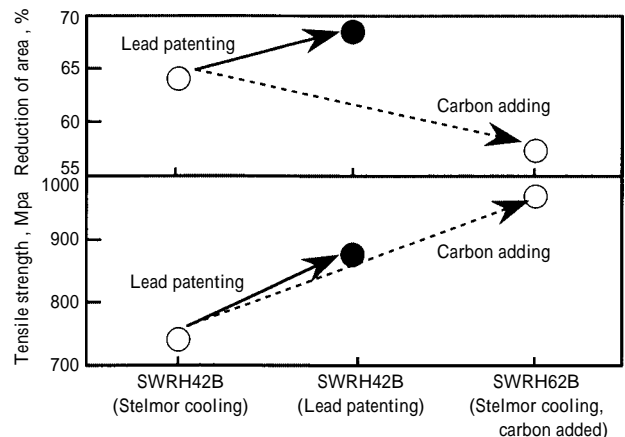


Fig.2 Comparison of mechanical properties carbon adding with lead patenting

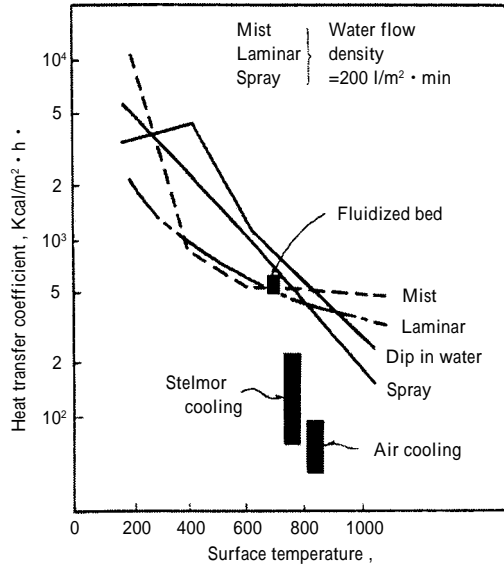


Fig.3 Comparison of heat transfer coefficient in several cooling method

<ミスト冷却の利点>

- (1) 熱伝達係数を流動層冷却なみに大きくすることが可能。
- (2) 微細な水滴のため、均一な冷却が可能。
- (3) 冷却能力を広範囲にわたって、比較的容易に制御可能。
- (4) 設備を現行ラインに設置でき、現行の操業と併用可能。
- (5) その他の項目として、地球環境の観点から、LPの冷媒である溶融鉛の非鉛化の動きに合致する。

以下にまず、ミストパテンティング(以下、MPと略記する)法の基本概念を述べ、次に、MP法を活用した新製品の例を紹介する。MP法の活用は、既存鋼の特性向上はもちろんのこと、熱処理加工プロセスの省略、新鋼種の開発まで応用範囲が多岐にわたっている。本稿で述べる活用例は次のとおりである。

<MP法の活用例>

- (1) 高炭素鋼線材 ... 既存鋼の高強度化、高延性化
- (2) 中炭素Uボルト用線材... 熱処理加工プロセスの省略
- (3) 低炭素ばね用鋼線材 ... 新鋼種開発

2. ミスト冷却の基本概念

2.1 ミスト冷却設備の構成

Fig.4にミスト冷却プロセスの基本概念を示す²⁾。ミスト噴射装置は所定の温度でリング状に巻き取った線材を直ちに急冷するために、ステルモア設備の第1風冷帯のコンベヤ上に設置した。ミスト水量は線材径、鋼種に応じて調整するが、過冷組織の発生を防止して均一な微細パーライトを得るために、温度計により最適制御される。

Photo 1にミストフードの外観を示す。不使用時にはステルモアコンベヤサイドに待機させており、コンベヤ上にセットするのに必要な時間は数秒とコンパクトな設備である。したがって、ステルモア通常操業への切り替えが容易に行われる。

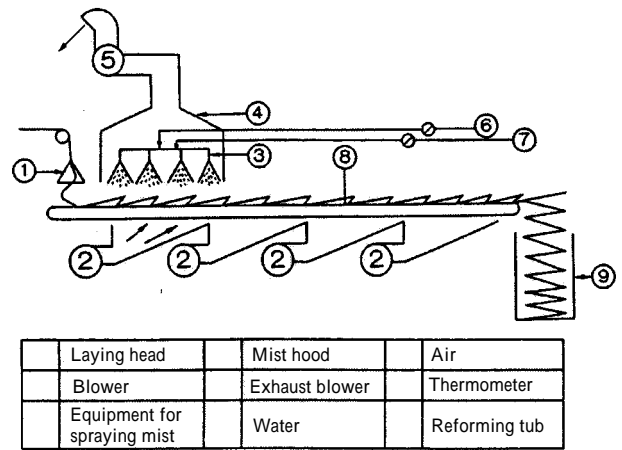


Fig.4 Schematic view of mist patenting process

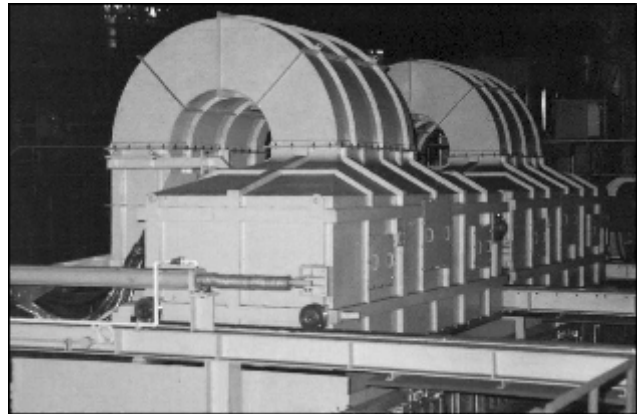


Photo 1 Appearance of mist hood

2.2 ミスト冷却条件の設定

MP法は強冷却が可能なることから、SC法より低温側で冷却を進行させることができる。しかしながら、冷媒として溶融鉛を使用するLPとは違い、MP法は常温の空気-水を使用することから、冷却条件によってはマルテンサイトやベイナイトなどの過冷組織の発生も考えられたため、成分ごとに臨界冷却条件を求めた³⁾。実験は、Table 1に示す成分を用い、全自動変態点測定装置により冷却曲線を測定し、成分ごとに過冷組織の発生を回避できる臨界の熱伝達係数hを求める形で実施した。Fig.5に線材直径8.3の場合の成分-熱伝達係数-変態組織の関係を例示する。成分の指標として、ここでは、式(1)で示される理想臨界直径D_iを用いた。

Table 1 Examples of chemical compositions of steels for experiment

| Steel | (mass%) | | | | | | |
|---------|---------|------|------|-------|-------|------|------|
| | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr |
| SWRH42B | 0.44 | 0.24 | 0.88 | 0.011 | 0.008 | 0.04 | 0.04 |
| SWRH52A | 0.53 | 0.21 | 0.47 | 0.011 | 0.008 | 0.03 | 0.04 |
| SWRH62A | 0.64 | 0.20 | 0.50 | 0.009 | 0.009 | 0.04 | 0.05 |
| SWRH62B | 0.62 | 0.26 | 0.80 | 0.010 | 0.008 | 0.03 | 0.04 |
| SWRH72A | 0.71 | 0.21 | 0.48 | 0.010 | 0.009 | 0.04 | 0.05 |
| SWRH82B | 0.82 | 0.20 | 0.74 | 0.009 | 0.009 | 0.03 | 0.05 |

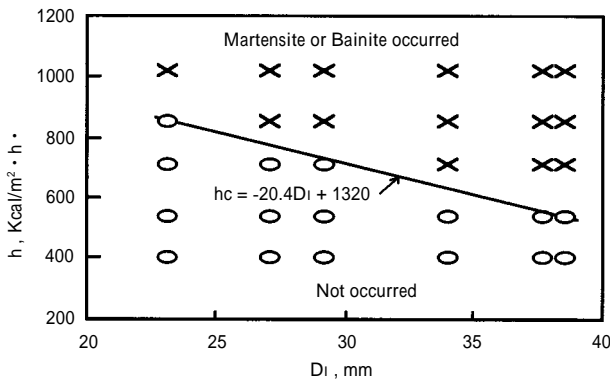


Fig.5 Effect of D_1 and h on transformed microstructures

$$D_1 = A \sqrt{C\% (1+0.64Si\%) (1+4.10Mn\%) (1+0.52Ni\%) (1+2.33Cr\%)} \quad \dots\dots (1)$$

ここで、A はオーステナイト結晶粒度の係数を表わす。Fig.5 より、変態組織に対して、成分と冷却条件の両者が影響を及ぼし、 D_1 の上昇とともに h が小さい領域でも過冷組織が発生するようになる。そして、過冷組織の発生を回避できる臨界の冷却条件 h_c として、式(2)が得られた。

$$h_c (\text{Kcal/m}^2 \cdot \text{h}) = -20.4D_1 (\text{mm}) + 1320 \quad \dots\dots (2)$$

以上のようにして求めた臨界の熱伝達係数をMP法で得るために、水量、気水比の調整を実施し、鋼種、線材径に応じて最適冷却条件を設定している。

3. ミストパテンティング活用線材の特性

3.1 高炭素鋼線材...既存鋼の高強度化、高延性化

3.1.1 MP線材の特性

Fig.6には0.4～0.8%Cの5.5 mm硬鋼線材の引張特性をSC線材と比較して示す。MP線材はSC線材よりも引張強さが約100MPa高く、絞りも高い。

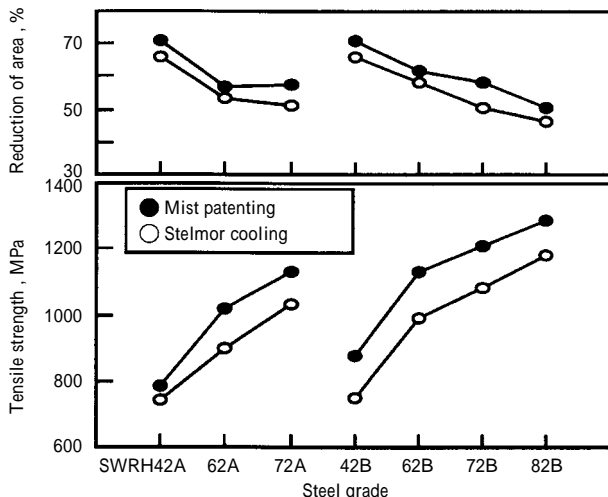


Fig.6 Mechanical properties of patented wire rods (5.5)

Photo 2にSWRH62B, 11 mm線材のSEM組織を示す。なお、比較としてSC線材とLP線材の組織も合わせて示す。MP線材のパーライトラメラ間隔は、SC線材に比較して狭い。

MP線材は熱間圧延後にダイレクトパテンティングされるため、旧オーステナイト結晶粒がLP線材より小さく、また、冷却能力の向上により低温側で変態が進行するため、パーライトラメラ間隔はSC線材より狭くなる。その結果、高強度化と同時に高延性化する⁴⁾。

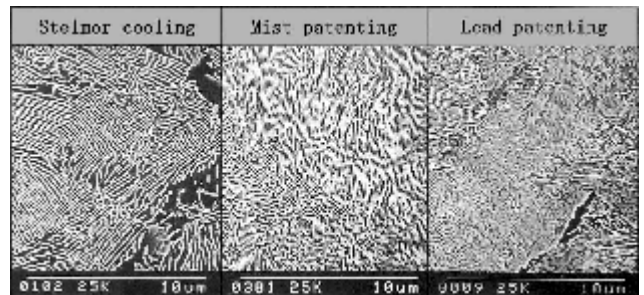


Photo 2 Microstructures of patented wire rods (SWRH62B, 11)

3.1.2 MP材の鋼線特性

ピアノ線は時には90%以上もの高減面率で伸線加工されて鋼線として使用されるので、単に強度のみならず絞り、捻回値などの延性が必要である。

Fig.7にはSWRH42BならびにSWRH62Aの伸線加工特性を示す。いずれの鋼種も減面率93～94%という過酷な伸線加工においても、絞りの低下が少なく、また仕上がりの鋼線の捻回値も30回以上と良好な値を示している。

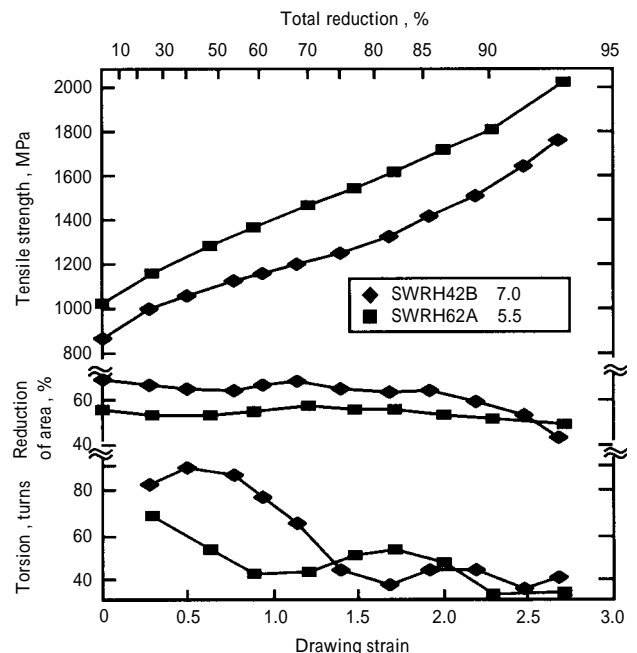


Fig.7 Drawing properties of mist patented wire rods

鋼線のねじり試験においてデラミネーション（縦割れ）が発生することがある。こうした鋼線は、たとえばPC鋼撚り線を製造する工程において、撚り線加工に耐えられず断線を起こす。SC材の限界伸線ひずみが約1.5であるのに対しMP材の限界は約2.5まで向上している。この結果SC材では約1700MPaの強度の鋼線しか得られなかったが、MP材により約2100MPaまでの高強度化が可能となった。

SWRH82Bの9.0 mm線材を4.0 mmに伸線加工し、380 低温焼鈍したPC鋼線の試作結果をTable 2に示す。引張特性、ならびに、リラクセーション値もLP材と同等である。

3.2 中炭素Uボルト用線材...熱処理加工プロセスの省略

3.2.1 開発のねらい

自動車のサスペンション部品として板ばね固定用のUボルトがある。これは、S48Cクラスの中炭素鋼線材を焼入れ焼戻し（QT）して製造されている。そこで、Table 3に示すように、MPの高い冷却能を活用して、QT処理省略を検討した。

3.2.2 ミクロ組織

Photo 3にS48C、10 mmのMP材を用いて製造したUボルトのミクロ組織を示す。MP材はダイレクトパテント組織組織ままであるため、フェライト・パーライト組織である。なお、現行材は、焼入れ焼戻し組織である。

3.2.3 機械的特性

Fig.8に加工工程での機械的特性の変化を示す。引き抜き率は約15%であるが、現行のS48C-QT材よりも降伏強

さが低いため、U曲げ加工が容易であり、曲げ加工時のスプリングバック量はMP材の方が小さくなる。また、Fig.9にはベーキング温度による機械的特性の変化を示すが、180 ~ 250 でのベーキング処理により、引張強さとともに降伏強さも現行品と同等以上になり、製品での耐久性も良好となる。製品での絞りは現行品よりは若干低め傾向にはあるが、50%以上を確保しており高値である。

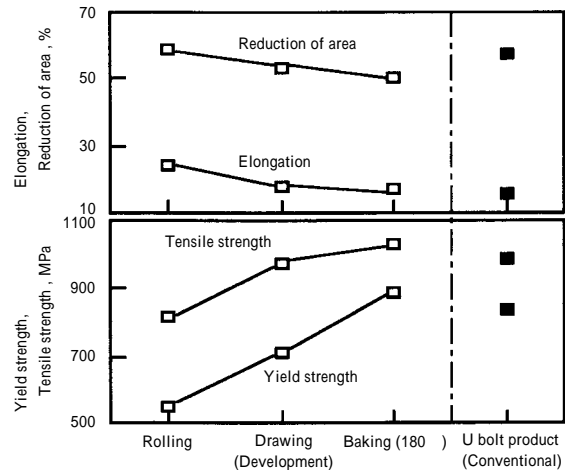


Fig.8 Comparison of mechanical properties (U bolt)

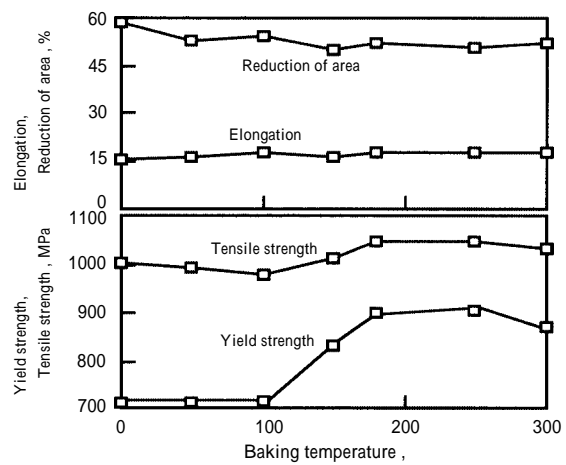


Fig.9 Relationship between baking temperature and mechanical properties for S48C drawn wire

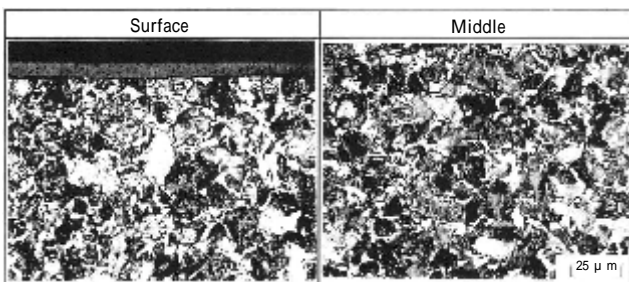


Photo 3 Microstructures of U bolt(S48C-MP, 10)

Table 2 Result of tensile strength and relaxation loss of drawn wire

| Sample | Tensile properties | | | | Relaxation loss (%) |
|---------------|----------------------|------------------------|----------------|-----------------------|---------------------|
| | Yield strength (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elongation (%) | Reduction of area (%) | |
| Mist patented | 1772 | 1910 | 6.4 | 50.9 | 0.97 |
| Lead patented | 1815 | 1947 | 6.0 | 51.3 | 1.04 |

Table 3 Basic concept for development of U bolt

| Grade | Process | | | | |
|------------------------|---------|---------------------------|-----------------|---------|------------------------|
| Development (S48C-MP) | Billet | Rolling (Mist patenting) | Drawing | Cutting | U bolt forming |
| Conventional (S48C-QT) | Billet | Rolling | Quench·Tempered | Drawing | Cutting U bolt forming |
| | | U bolt forming : U bend | Form rolling | Plating | Baking |

3.3 低炭素ばね用鋼線材...新鋼種開発

3.3.1 開発のねらい

自動車のシートフレームにはワイヤー構造のフレームがある。このワイヤー用線材としてSWRM6クラスの低炭素鋼やSWRH62A, SWRH82Bといった高炭素鋼が使用されてきたが、Table 4に示すように、低炭素鋼は強度が低いために重量が増える、高炭素鋼は強度が高いものの溶接性が悪く、かしめにより接合せねばならず生産性に劣るという問題があった。

そこで、強度は高炭素鋼なみで溶接性に優れた低炭素ばね用鋼線材を開発することを目的に、高強度化、高延性化の手段としてMPの高い冷却能を利用することにした。

3.3.2 線材の特性

開発した低炭素ばね鋼の化学成分をTable 5に示す。低炭素-Mn-Cr鋼であるが、耐へたり性向上のため高Siとした。

Table 5 Chemical compositions of developed steels (mass%)

| Steel | C | Si | Mn | Cr | Nb | Ti |
|-------|------|------|------|------|-------|-------|
| A | 0.13 | 0.76 | 1.48 | 0.52 | added | added |
| B | 0.14 | 0.84 | 1.97 | 0.55 | added | added |

Fig.10にA, B鋼MP材の強度、絞りをSC材と比較して示す。A鋼において強度はSC材よりも100MPa高く、また絞りも7 mm以上の太径材になると10%以上も向上している。A鋼, B鋼の強度はそれぞれSWRH62A, SWRH82Bに相当している。この機械的性質の違いは、いずれもベイナイト組織であるが、MP材の組織はSC材に比べて微細であり、特に10 mmMP材の炭化物の大きさは5.5 mmSC材と同等にまで微細化されており、MPにより炭化物が微細化して高強度化、高延性化が達成されたと考えられた。

3.3.3 鋼線の材料特性

開発鋼線は高炭素鋼線より降伏強さが高く、このため回転曲げ疲労限も高くなる。また、低温焼鈍後の強度はSiによる軟化抵抗のため高炭素鋼線より高く、また絞りは低温焼鈍により向上するという特徴を有している。

Fig.11に突き合わせ溶接部の硬さ分布を示す。従来材SWRH62Aは溶接ままではマルテンサイトが発生してそのままでは使用することができないので、後熱処理として焼なまし処理を施す必要がある。この後熱処理によりピッカース硬さ250~300HVに低下してしまい、溶接部の軟化は避けられないものであった。これに対してA鋼は溶接ままでも約400HVで、小さな硬さ低下にとどまっている。

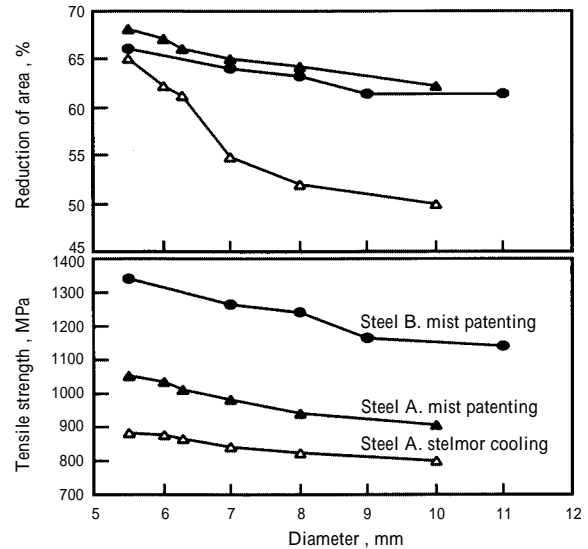


Fig.10 Relationship between rod diameter and mechanical properties of developed steels

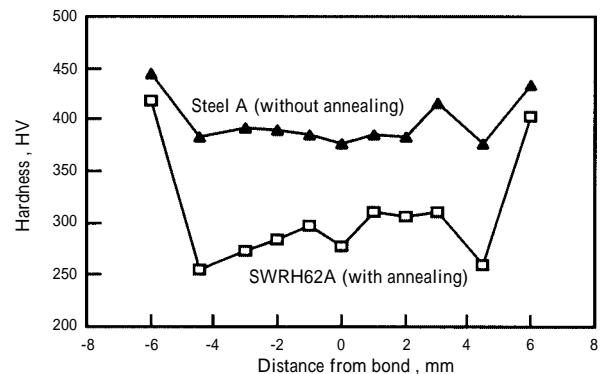


Fig.11 Hardness distribution of welded portion of clutch cover ring of developed steel

また、Table 6に示すように、引張試験、90°衝撃曲げ試験においてもA鋼は異常が見られず、溶接ままでの使用が可能であることを確認した。

開発したA鋼をシートフレームに適用することによって従来使用のSWRM6に比べて36%の軽量化、ならびに従来使用のSWRH62Aのかしめ方式から、溶接による接合に切り換えたことにより20%の生産性向上を達成した。

Table 6 Comparison of weldability of developed steels

| Steel | Size (mm) | Annealing | Tensile strength of bond (MPa) | Rupture part | Bending test | |
|---------|-----------|-----------|--------------------------------|--------------|--------------|-----|
| | | | | | Bond | HAZ |
| A | 3.2 | Not | 1422 | HAZ | OK | OK |
| | 3.2 | Done | 1191 | HAZ | OK | OK |
| SWRH62A | 3.2 | Not | 1393 | HAZ | NG | NG |
| | 3.2 | Done | 1152 | HAZ | OK | OK |

Table 4 Basic concept for development of low carbon steel wire rods for several springs

| Grade | | Strength | Ductility | Weldability | Total |
|--------------|---------------------------------|----------|-----------|-------------|-------|
| Conventional | High carbon type (SWRH62A, 82B) | | | | |
| | Low carbon type (SWRM6 class) | | | | |
| Development | (Low C-high Si-Mn-Cr type) | | | | |

4. おわりに

既存のステルモア設備の第1衝風冷却帯にミスト噴射装置を設置し、ミストパテティング法を確立した。この手法を活用することにより、LP材なみの高強度の高炭素鋼線材の製造が可能となった。また、Uボルト加工工程の中で、焼入れ焼戻しプロセス省略可能な中炭素鋼線材の製造が可能となった。さらに、低炭素鋼に適用することにより、高強度で、溶接性に優れたばね用線材の製造が可能となった。その他、本稿では触れなかったが、非調質ボルトほかの多数の製品開発に活用されている。

参 考 文 献

- 1) 日本鉄鋼協会．鋼材の強制冷却．特別報告書 29(1978)-101.
- 2) 大和田能由ほか．材料とプロセス．Vol.5(1992)-2066.
- 3) 村上俊之ほか．材料とプロセス．Vol.12(1999)-1301.
- 4) 玉井豊ほか．塑性と加工．Vol.39(1998)-359.

<問い合わせ先>

エヌケーケー条鋼㈱ 仙台製造所 商品技術部
研究開発グループ

Tel. 022 (258) 5523 村上 俊之
toshiyuki_murakami@nkbs.co.jp

エヌケーケー条鋼㈱ 仙台製造所 商品技術部
商品技術第二グループ

Tel. 022 (258) 5515 玉井 豊
yutaka_tamai@nkbs.co.jp