

技術報告

UDC 669.14-426.2 : 621.785.47 : 543.546 : 620.172.242

流動層パテント処理鋼線の諸性質*

高橋 栄治**・清水 勝**

隠岐 保博**・石上 修**

The Mechanical Properties of Wires and Wire Rods Patented in Fluidized Bed

Eiji TAKAHASHI, Masaru SHIMIZU,
Yasuhiro OKI, and Osamu ISHIGAMI

Synopsis:

In order to improve the drawability of wires and wire rods and to obtain the desirous mechanical properties of drawn wires, lead patenting has long been utilized to practical use. There are, however, some problems about environmental hygiene in the works and environmental pollution in the cause of molten lead. As a means of solving those problems, the fluidized bed patenting method has been studied and developed.

Under the various conditions of fluidized bed temperature, air velocity and cooling time in fluidized bed, experiments on cooling of heated wires and wire rods in fluidized bed have been carried out. Excellent mechanical properties of the materials patented in fluidized bed, as good as those in lead bath can be obtained by optimization of such factors as fluidized bed temperature, air velocity, cooling time in fluidized bed and austenitizing temperature. The fluidized bed patenting can be successfully applied to the materials from 1 to 11 mm in diameter. The scattering of mechanical properties of the materials patented in fluidized bed is the same as or less than that in lead bath. The drawability of the materials patented in fluidized bed is the same as that in lead bath.

1. 緒 言

プレストレストコンクリート用鋼線、ワイヤー、バネなどに使用される炭素鋼線には、通常伸線性の向上および伸線後の諸性質を所定の値にするために、鉛パテント処理や空気パテント処理が行なわれる。この鉛パテント処理においては、溶融鉛の温度が 500°C から 650°C と高くなるため、鉛ヒュームが発生する、また酸化鉛が微粉となり空中を浮遊する、鋼線の表面に付着した鉛を落とすために用いられる川砂の中に鉛が混入し、その後処理に困る、熱処理後の鋼線の冷却に用いる水中に鉛が入る、熱処理中に生ずる酸化鉛の再生処理にも問題があるなど、職場の環境衛生および公害発生に関して処置すべき多くの事がある。また、品質についても鋼線表面に付着した鉛が完全に除去できないとその後の伸線工程を乱す。

以上のような煩雑な処理を避けるため、鉛パテント

法に代わるパテント法の開発が望まれている。この新しいパテント法として、気体流動層を冷却媒体とした流動層パテント法を採用し、その実用化に成功した。本報告においては、流動層パテント処理された鋼線の機械的性質およびその性能について述べる。

2. 供試材と実験方法

2-1 供試材

実験に用いた試料としては市販の硬鋼線材を使用した。5.5 mmφ 未満の鋼線を試料とする場合には空気パテント処理した 5.5 mmφ 線材から所定の線径に伸線し、供試材とした。これら供試材の化学成分を Table 1 に示す。

2-2 実験設備と熱処理工程

鋼線の熱処理工程を以下に述べる。スイフトより出た鋼線を加熱炉で 900°C に連続的に加熱し、次に長さ 3

* 昭和50年10月本会講演大会にて発表 昭和50年12月19日受付 (Received Dec. 19, 1975)

** (株)神戸製鋼所 (Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakino-hama-cho Fukiai-ku Kobe 651)

Table 1. Chemical composition of specimens (wt %).

Specimen	Diameter (mm ϕ)	C	Si	Mn	P	S	Total Al
SWRH 62A	5.5	0.60	0.19	0.42	0.011	0.015	tr.
SWRH 62A	7.0	0.63	0.22	0.50	0.023	0.022	tr.
SWRH 72A	2.0	0.74	0.21	0.48	0.012	0.013	tr.
SWRH 72A	5.5	0.74	0.21	0.48	0.012	0.013	tr.
SWRH 72A	9.5	0.74	0.21	0.47	0.012	0.020	tr.
SWRH 77A	5.5	0.75	0.25	0.54	0.016	0.024	0.051
SWRH 77A	7.0	0.75	0.23	0.53	0.024	0.018	0.056
SWRH 82B	9.5	0.82	0.22	0.72	0.010	0.021	0.056

m, 幅 2 m の流動槽に入れ急冷しパーライト変態させる。ここで、溶融鉛で鋼線を冷却した場合の冷却曲線にできるだけ近づけ、現在の鉛パテンティング処理鋼線の性質と変わらないようにするために、流動槽の後に長さ 4 m, 幅 2 m の保持炉を設置した。保持炉温度は 500°C に保たれた。保持炉を出た鋼線は水冷後、巻取機で巻取られる。

流動槽における流動化流体としては空気をを用い、専用ブローにより流動槽下方より圧送した。この圧送空気の量を変えることにより流動化流速が変えられる。また流動槽が大きい槽側壁の影響は無視でき、鋼線の通る領域では、この流速は均一である。また流動層温度は鋼線による入熱のため、かなりの温度に達する。したがって本設備の冷却装置としては水冷スプレーを用い、水の蒸発熱を利用することにより温度調節を行なった。この流動層温度の検出は熱電対を層内に入れることにより行なわれた。流動層温度は $\pm 10^\circ\text{C}$ 以内におさえられた。また線温の測定は熱電対の測定端を鋼線に溶接し、鋼線と一つしよに装置内を通すことにより行なわれた。

2.3 処理材の伸線方法

流動層パテンティング材 SWRH 62A 5.5 mm ϕ 鋼線を約 15% 塩酸にて酸洗い、水洗、りん酸塩被膜処理を行なった後、次の条件で伸線した。この処理材を 22' 連続伸線機によりダイススケジュール 5.5 mm ϕ \rightarrow 4.9 mm ϕ \rightarrow 4.4 mm ϕ \rightarrow 4.0 mm ϕ \rightarrow 3.5 mm ϕ \rightarrow 3.2 mm ϕ \rightarrow 2.8 mm ϕ \rightarrow 2.5 mm ϕ \rightarrow 2.3 mm ϕ \rightarrow 2.0 mm ϕ , 仕上げ速度 150m/min の条件で伸線した。平均減面率は 1 ダイスで約 20% である。潤滑剤には金属石けんを使用した。なお、連続伸線機のダイスの数は 5 個であるので 2 回連続伸線した。比較のため鉛パテンティング材の伸線も行なったが、伸線条件は流動層パテンティング材の場合と同じである。

3. 流動層の冷却特性

流動層がパテンティング処理に適している理由として次の特性が挙げられる。流動層の一般的特性として挿入

物-流動層間の伝熱係数が大きいことのほか、流動層温度を精密かつ均一に調整保持できる、液体と違い凝固点がなく広範囲に流動層温度を変えることができる、液体と類似した挙動を示すため容器間の流動粒子の運搬が容易であるなど熱処理用冷却媒体として非常に有利である。また処理鋼線の表面に付着物もなく、後の工程を乱すこともない。

流動層の冷却能力は一般に伝熱係数により表示されている¹⁾。この伝熱係数は流動化速度により変化する。したがって流動層温度を一定に保つた場合、処理鋼線の冷却曲線は流速に対して依存性を示す。

冷却能力を変える因子として流動物質が挙げられる。流動層パテンティングの文献²⁾⁻⁵⁾は 1964 年より見られるが、流動物質としてアルミナ、シリコンカーバイド、フェロシリコンなどが使用されている。また熱延直後の鋼線の冷却に流動層が用いられており、この方法ではジルコンサンドを流動物質として使用している。山腰らの報告⁶⁾によればシリカ砂、アルミナ砂に比べて冷却能力の大きいことが示されている。したがって本研究においては流動物質として平均粒度 150 メッシュのジルコンサンドを使用した。

Fig. 1 は流動層による鋼線の冷却曲線を示したものである。比較のため 35m/sec の風速で衝風冷却を行なった場合および溶融鉛中で鋼線を冷却した場合の冷却曲線

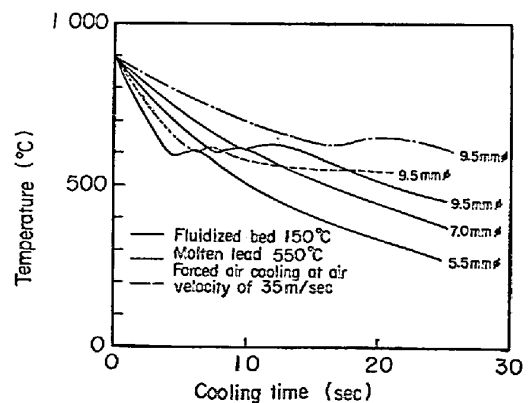


Fig. 1. Cooling curves of wire rods in various cooling medium.

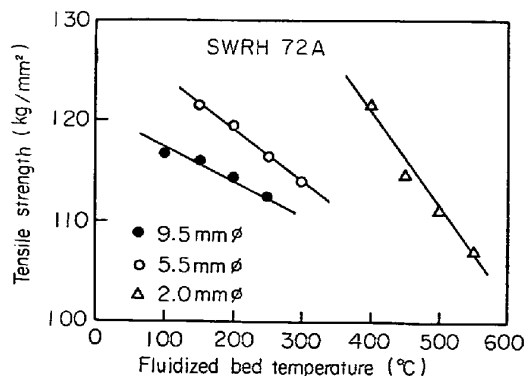
も示している。流動層中での冷却と溶融鉛中での冷却を比較した場合、流動層の冷却能力の方が小さいため、パテンティング処理で重要なオーステナイト化温度から変態開始温度 (500°C ~ 650°C) までの鋼線の冷却速度を溶融鉛の冷却速度と同一にするためには、流動層温度を溶融鉛温度より低くしなければならない。流動層の冷却能力を検討する方法として冷却曲線より伝熱係数を計算する方法を採用した。これによると、シルコンサンド流動層 (流動化流体の速度 12 cm/sec) では約 650 kcal/m²·hr·°C, 溶融鉛では約 3000 kcal/m²·hr·°C, 35 m/sec の風速で衝風冷却を行なった場合には約 300 kcal/m²·hr·°C である。図中に示さなかつたが、空中放冷の場合は約 60 kcal/m²·hr·°C である。

4. 流動層パテンティング材の機械的性質

処理材の機械的性質は主にオーステナイト化温度より変態開始温度までの冷却速度に影響を受ける。したがって、機械的性質を支配する因子として流動層温度が考えられる。また流動層の冷却能力は流動化流体の速度に依存するところが大きく、この流速は処理材の機械的性質に影響をおよぼす。また処理材の機械的性質は鋼線の流動層における冷却時間にも影響を受ける。このほか処理材の性質を支配する因子としてオーステナイト化温度の影響も考えられる。以下に各支配因子の影響の詳細について述べる。

4.1 流動層温度の影響

Fig. 2 は流動層温度を変化させた時の SWRH72A 2.0 mm φ, 5.5 mm φ, 9.5 mm φ の鋼線の引張強さの変化について示したものである。処理材の引張強さにおよぼす流動層温度の影響は処理鋼線の線径により変化し、流動層温度 100°C の変化に対して 2.0 mm φ で約 10 kg/mm²



Air velocity: 12 cm/sec, Cooling time in fluidized bed: 9.5 mm φ 22 sec, 5.5 mm φ 12 sec, 2.0 mm φ 6 sec.

Fig. 2. Influence of fluidized bed temperature on tensile strength of 0.72% carbon steel wires and wire rods.

mm², 5.5 mm φ で約 5 kg/mm², 9.5 mm φ で約 2.5 kg/mm² 引張強さに変化が見られる。すなわち太径の鋼線ほど流動層温度感受性は弱い。また鉛パテンティング処理における温度感受性は 5.5 mm φ 鋼線で溶融鉛温度 10°C の変化に対して引張強さの変化は約 2 kg/mm² であり、流動層パテンティング処理の方が引張強さの冷却媒体温度依存性は小さい。

また SWRH72A の鉛パテンティング材の引張強さの一般的な目標値は 115 kg/mm² であり、流動層パテンティング処理でこれと同じ引張強さを得るためには、2 mm φ で約 450°C, 5.5 mm φ で 300°C, 9.5 mm φ で約 150°C で処理すればよいことがわかる。流動層温度を変えることにより、これより高い引張強さを得ることも可能である。

4.2 流動化流体の速度の影響

Fig. 3 は流動層温度 100°C, 200°C, 300°C のときの引張強さにおよぼす流速の影響について示している。試料としては SWRH77A, 7.0 mm φ を使用した。図のように最小流動化速度 (3.5 cm/sec) より約 12 cm/sec の流速まで引張強さは急激に増加し、その後ほぼ一定の値を示している。この傾向は流動層温度が変化しても同じである。

4.3 冷却時間の影響

鋼線の引張強さにおよぼす冷却時間の影響について、Fig. 4 に示す。冷却時間を調整する方法としては流動層中の鋼線の通過位置を傾斜させ流動層の高さを変えることにより行なった。線速度は 5.5 mm φ 材で 12 m/min, 7.0 mm φ 材で 8.5 m/min と一定に設定した。図に示すように鋼線の引張強さと冷却時間の関係は 2 つの領域よりなる。冷却時間 0 秒からある秒数までの時間では引

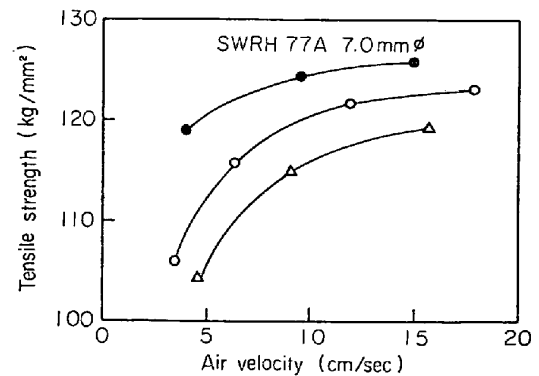
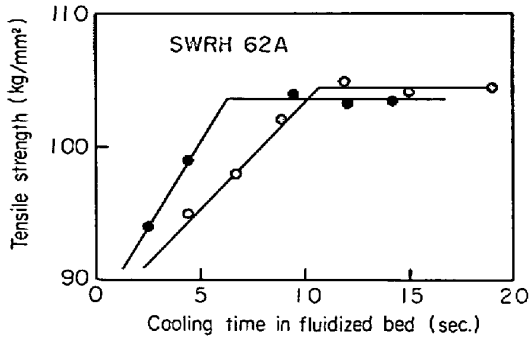


Fig. 3. Influence of air velocity on tensile strength of 0.77% carbon steel wire rods cooled at various fluidized bed temperature. (Fluidized bed temperature ● 100°C, ○ 200°C, △ 300°C, cooling time in fluidized bed 15 sec.)

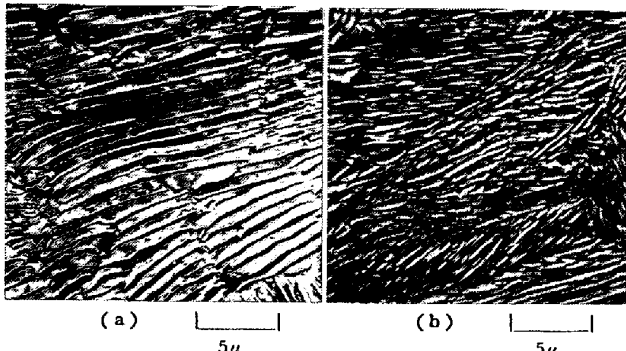
張強さは時間に対してほぼ直線的に増加する傾向を示しその後引張強さは冷却時間を変えてもほぼ一定の値をとっている。

Photo. 1は Fig. 4 の 5.5 mmφ 鋼線の各引張強さに



Air velocity : 12cm/sec.
 ● 5.5mmφ Fluidized bed temp. 300°C
 ○ 7.0mmφ Fluidized bed temp. 250°C

Fig. 4. Influence of cooling time in fluidized bed on tensile strength of 0.62% carbon steel wire rods.



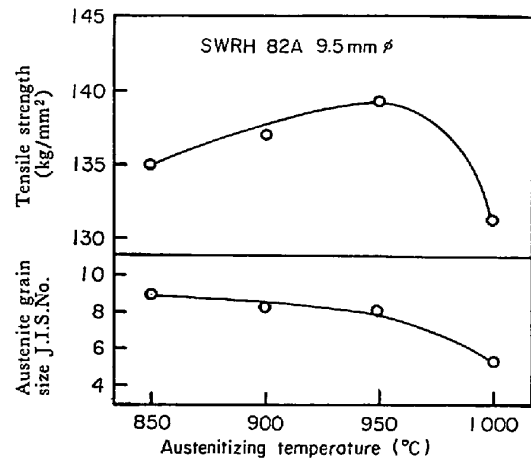
Cooling time (a) 2.5sec (b) 9.5sec

Photo. 1. Electro replica micrographs of 0.62% carbon steel wire rods patented in various cooling time in fluidized bed. (Air velocity 12cm/sec. bed temp. 300°C)

対応する内部組織の例を示したものである。引張強さの変化に対応してパーライトのラメラ間隔は冷却時間 2.5sec から 9.5sec と時間が長くなるにつれて狭くなり、また 9.5sec, 12sec, 14sec の場合にはラメラ間隔はほぼ同じで、微細パーライト組織である。また初析フェライトもほとんど見い出されず、鉛パテンティング処理材の内部組織と同じである。

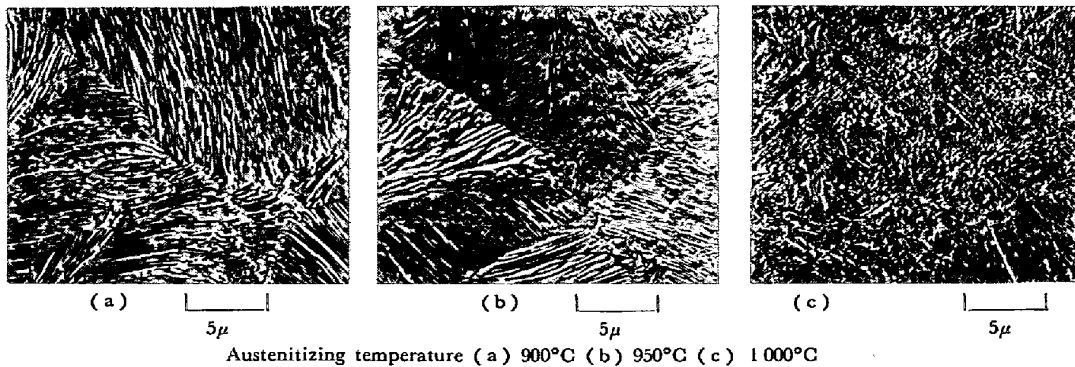
4.4 オーステナイト化温度の影響

オーステナイト化温度の機械的性質におよぼす影響については従来より報告⁷⁾⁸⁾されている。しかしこれらの報告では冷却媒体として熔融鉛を使用しており、流動層パテンティング処理でオーステナイト化温度の影響について報告された例はない。鉛パテンティング法と流動層パテンティング法における変態挙動の差異は前者では等温変態的な挙動をするのに対し、後者では連続冷却的な変



Air velocity 12cm/sec, fluidized bed temperature 120°C, Cooling time in fluidized bed 22sec.

Fig. 5. Influence of austenitizing temperature on tensile strength of 0.82% carbon steel wire rods.



Austenitizing temperature (a) 900°C (b) 950°C (c) 1000°C

Photo. 2. Electro replica micrographs of 0.82% carbon steel wire rods in fluidized bed at austenitizing temperature 900~1000°C. (Air velocity 15 cm/sec., bed temp. 120°C)

態となっている点にある。したがってオーステナイト化温度の影響についても相違するであろう。

Fig. 5 は処理材の引張強さにおよぼすオーステナイト化温度の影響について示したものである。各オーステナイト化温度でのオーステナイト結晶粒度も並記している。Photo. 2 は各オーステナイト化温度での処理材の電子顕微鏡組織の例を示している。図に示すようにオーステナイト化温度の上昇とともに引張強さも増加の傾向を示しているが、オーステナイト化温度 1000°C では 950°C の場合に比べ低下している。このような傾向は Photo. 2 の組織より容易に説明できる。 900°C では微細パーライト組織を示し、 950°C でパーライトのラメラ間隔はさらに微細化し一部上部ベイナイトが現われている。また 1000°C では内部組織全域で上部ベイナイト組織になっている。従来より報告⁷⁾⁹⁾¹⁰⁾のあるように、引張強さはパーライトラメラ間隔の微細化とともに増加し上部ベイナイト組織では低下する。本実験の結果はこれらの報告と一致している。またこの引張強さおよび組織は Fig. 5 に示したオーステナイト結晶粒度と対応関係を示している。粒度番号の減少とともにパーライトのラメラ間隔は小さくなり、引張強さも増加している。しかしオーステナイト粒が極度に粗大化したオーステナイト化温度 1000°C では上部ベイナイト組織となり、引張強さは低下している。

このような機械的性質および内部組織と結晶粒度との関係は次のように説明できる。連続冷却変態を利用する場合には鋼線を同一冷却条件で冷却させてもオーステナイト結晶粒が粗大化すると、変態曲線は長時間側に移行するため鋼線の変態開始温度は低くなる。したがってパ

ーライトのラメラ間隔は減少し、引張強さも高くなる。また極度に結晶粒が粗大化した場合には上部ベイナイトが現われてくる。

以上に述べた 4.1 から 4.4 の各因子を適当に組み合わせれば任意の引張強さを得ることができる。しかし実操作においては、ばらつきを最小限におさえるのが望ましい。したがって引張強さを変える因子として流動層温度を採用し、流速は多少の変動があつてもばらつきの因子とならないように 12 cm/sec 以上とする。また冷却時間についても、同じ理由により Fig. 4 に示した引張強さ一定の冷却時間域、たとえば $5.5\text{ mm}\phi$ 材では 12 sec を採用する。またオーステナイト化温度についてはオーステナイト結晶粒が極度に粗大化しないように 900°C から 950°C の温度域がよいだろう。

5. 機械的性質におよぼす(C+0.2Mn) wt% の影響

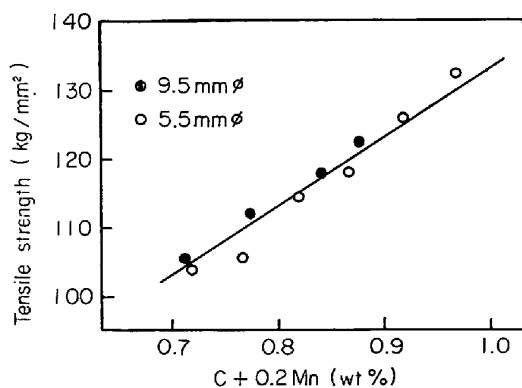
Fig. 6 は鋼線の引張強さを (C+0.2Mn) wt% で整理したものである。なお図中の点は Table 1 以外の鋼種のものについても記入した。処理条件は $5.5\text{ mm}\phi$ 鋼線で流動層温度 300°C 、流動層中での冷却時間 12 sec 、流速 12 cm/sec である。また $9.5\text{ mm}\phi$ 鋼線では流動層温度 150°C 、流動層中の冷却時間 22 sec 、流速 12 cm/sec である。図に示されている直線は鉛パテンティング処理材の一般的な目標値である。図よりわかるとおり、先に述べた処理条件で鉛パテンティング処理材とほぼ同じ引張強さの値が得られている。

本実験設備では $11\text{ mm}\phi$ の線径までしか実験を行っていないが SWRH72A で引張強さ 114 kg/mm^2 の値を得ている。また処理線径の下限については現在までのところ $1.0\text{ mm}\phi$ まで処理し鉛パテンティング処理材と同じ機械的性質を得ている。

6. 流動層パテンティング材のばらつき

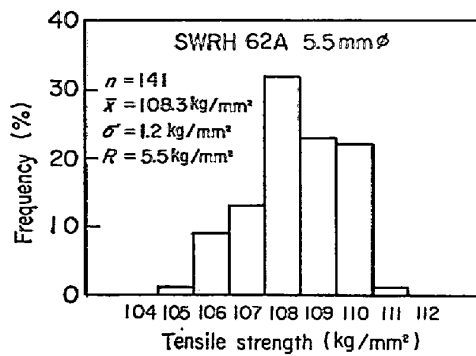
流動層パテンティング処理材は鉛パテンティング処理材に比べ、その性質の温度依存性が小さく、かつ流動層の温度均一性がよいため機械的性質のばらつきは小さいと思われる。

Fig. 7 は SWRH62A $5.5\text{ mm}\phi$ の鋼線、 400 kg コイルを流動層パテンティング処理し、約 10 m ごとに採取した試片の引張強さの結果である。試片数 141、引張強さの平均値 108.1 kg/mm^2 、標準偏差 1.2 kg/mm^2 、範囲 5.5 kg/mm^2 の結果を得た。このばらつき結果は鉛パテンティング処理材に比べ、同じであるかわずかに小さい。



Air velocity 12 cm/sec
 ● $9.5\text{ mm}\phi$ Fluidized bed temperature 150°C
 Cooling time in fluidized bed 22 sec
 ○ $5.5\text{ mm}\phi$ Fluidized bed temperature 300°C
 Cooling time in fluidized 12 sec

Fig. 6. Relation between (C+0.2Mn) wt% and tensile strength of wire rods. Solid line is usual aiming value in lead patenting.



Air velocity : 15cm/sec
 Fluidized bed temperature : 250°C
 Cooling time in fluidized bed : 12sec.

Fig. 7. Distribution of tensile strength of 0.62% carbon steel wire rods in a coil.

7. 流動層パテンティング材の伸線

パテンティング処理された鋼線は通常伸線加工が加えられるため、処理材の伸線性は非常に重要である。Fig. 8はSWRH 62A, 5.5 mm φ鋼線の流動層パテンティング材を伸線加工した結果を示している。比較のため、鉛パテンティング処理材の結果も示している。引張強さ、絞りとも流動層パテンティング材と鉛パテンティング材は同じ挙動を示している。

以上述べたような実験結果をもとに、流動層パテンティング設備1号機が設置され稼動中であるが現在、材質的には問題なく極めて順調である。

8. ま と め

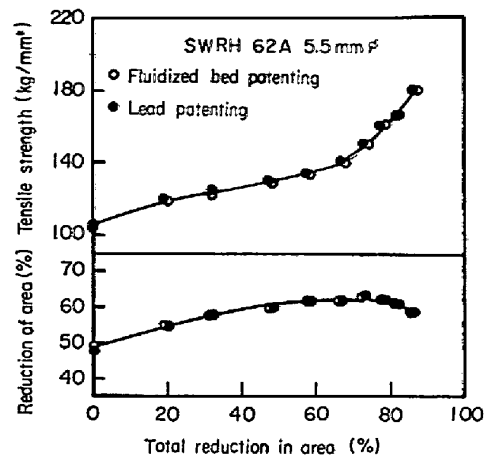
ジルコンサンドを流動物質として用いた流動層パテンティング法について研究し、処理材の機械的性質について次の結果を得た。

(1) 処理材の機械的性質を支配する因子として、流動層温度、流動化流体の速度、流動層中の冷却時間、オーステナイト化温度が挙げられる。

(2) (1)に述べた因子を変えることにより、鉛パテンティング材と同じ機械的性質を得ることができる。

(3) 流動層パテンティング処理適用可能線径の上限は現段階で 11 mm φ までと広範囲の線径まで処理可能である。

(4) 流動層パテンティング材の機械的性質のばらつ



Air velocity : 12cm/sec, Fluidized bed temperature : 300°C,
 Cooling time in fluidized bed : 12sec

Fig. 8. Mechanical properties of drawn wires.

きは鉛パテンティング材のばらつきと同じかそれ以下である。

(5) 流動層パテンティング材の伸線についても問題なく、鉛パテンティング材と同じ機械的性質が得られる。

以上の結果より流動層パテンティング法は鉛パテンティング法に十分替り得る方法であると言える。

文 献

- 1) 白井: 化学工学, 29 (1965), p. 928
- 2) A. P. BASKAKOV, V. Ya. ZUKOV, S. V. GRACHEV, and V. S. VERSHINIA: Stal in English, (1964) 7, p. 574
- 3) V. Ya. ZUKOV, A. P. BASKAKOV, S. V. GRACHEV, G. K. MALIKOV, and A. S. ZAVAROV: Stal in English, (1965) 1, p. 586
- 4) R. J. STOTT: Wire Industry, 36 (1969) 426, p. 521
- 5) R. W. REYNOLDSON and M. J. VIRR: Wire Industry, 39 (1972) 467, p. 918
- 6) 山腰, 金田, 鈴木, 新名, 柳, 初岡: 鉄と鋼, 58 (1972) 14, p. 1969
- 7) T. CAHILL and B. A. J. JAMES: Wire and Wire Products, 43 (1968) 3, p. 73
- 8) 平野, 高橋, 山田: 金属学会誌, 32 (1968), p. 238
- 9) N. RIDLEY: Wire Industry, 37 (1970) 441, p. 829
- 10) B. M. ARMSTRONG and G. M. STURGEON: Wire Industry, 32 (1965) 373, p. 73