

© 1986 ISIJ

棒鋼，線材向低炭素連铸鋼種の開発とその諸特性

技術報告

田口喜代美*・角南英八郎*²・西川勝彦*・手塚勝人*³
江口豊明*⁴・玉井 豊*⁵・庄司貞雄*³

Development of Low Carbon Continuous Cast Steels for Bar and Wire Rod and Its Properties

Kiyomi TAGUCHI, Eihachiro SUNAMI, Katsuhiko NISHIKAWA, Katsundo TEZUKA
Toyoaki EGUCHI, Yutaka TAMAI and Sadao SHOJI

Synopsis:

For bar and wire rod applications low carbon steels of the continuous cast bloom have been developed. Aluminum content is controlled, using RH degassing process, from 0.003 to 0.01% not only to minimize Al_2O_3 inclusion but also to prevent the subsurface blowholes in the bloom section. Nitrogen content is also reduced under 0.003% by the hardblowing of LD process and shrouding during casting.

Comparing the rimmed steel wire rod, this new steel shows the smaller breakage diameter and higher ductility at the high speed continuous wire drawing. At the coldheading test the surface and center of this steel has shown the higher ductility. At the higher annealing temperature the ferrite grain of this Al-killed steel tends to grow suddenly. Boron addition is effective to the prevention of the abnormal grain growth and brittle behavior of annealed products. Because of the high cleanliness and low segregation of continuous cast bloom, the size and amount of inclusions are smaller and hence the machinability of this steel is not so good. Higher sulphur content is desirable for the higher machinability. The depth of carburization is relatively small. Boron addition increases the austenite grain size and hardenability of carburized products.

1. 緒 言

従来，棒鋼，線材向の軟鋼素材としては，リムド鋼塊材が広く使用されていたが，最近ブルーム連铸の均質性，良好な表面性状を利用して，リムド代替鋼種の開発が進んできている¹⁾²⁾。既に薄板向に汎用鋼種として，RH脱ガスを利用して，低Al-低N連铸鋼種の開発を行った^{3)~5)}。この製造技術をさらに発展させ，今回棒鋼，線材の種々の用途に合致した鋼種の開発を行った。

従来使われていたリムド鋼は sol. Al はなく，低Nであるため，塑性加工性，浸炭焼入性，焼鈍性が良好であり，さらに凝固形態に起因する表面と中心の特性の差がユーザーの希望する相反する二つの特性，強度と塑性加工性もしくは塑性加工性と切削性を同時に満足させていた。従って連続铸造材で代替するには，まず塑性加工性

の点から低Nであることを基本とし，切削性の点から Al_2O_3 の生成を防止し，浸炭焼入性，焼鈍性の点から AlN の生成を防止するため Al はできるだけ低くした。またユーザーが強度と塑性加工性の両方を希望する場合清浄性の良くなる成分，製造条件を選択し，塑性加工性と切削性の両方を希望する場合には逆に硫化物系介在物を塑性加工性の許される限界まで増加させた。以下棒鋼，線材向低 Al 低 N 鋼 (Low Aluminum Low Nitrogen Steel for Bar and Wire rod) を LANS-BW と呼ぶ。

本報告では，まず低 Al 鋼の製造条件とビレットの品質，低 Al-低 N 連铸鋼の強度，延性，介在物の状況，次に伸線性，焼鈍性，冷鍛性，切削性について述べ，次に浸炭焼入性を改善した結果を述べる。

昭和 60 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 60 年 9 月 3 日受付 (Received Sep. 3, 1985)

* 日本鋼管(株)京浜製鉄所 (Keihin Works, Nippon Kokan K. K.)

*² 日本鋼管(株)中央研究所 (現：日本鋼管(株)新潟製造所) (Technical Research Center, Now Niigata Works, Nippon Kokan K. K., 2-3 Kamiouse-cho Niigata 950)

*³ (株)吾嬭製鋼所技術研究所 (Technological Research Center, Azuma Steel Co., Ltd.)

*⁴ (株)吾嬭製鋼所技術研究所 工博 (Technological Research Center, Azuma Steel Co., Ltd.)

*⁵ (株)吾嬭製鋼所仙台製造所 (Sendai Works, Azuma Steel Co., Ltd.)

2. 成分、製造技術とビレット、棒線の各種特性

LANS-BW は京浜製鉄所の 250t 転炉で溶製し、RH 脱ガスで精錬する。400×520mm 断面 4 ストラッド垂直型ブルーム連铸機で铸造し、114mm 角ビレットに分塊圧延される。ビレットは吾嬭製鋼所千葉製造所もしくは仙台製造所にて、棒鋼、線材に圧延する。

2.1 低 Al 鋼の製造

sol. Al が 0.003% 以上になると生成する脱酸生成物は硬い Al_2O_3 になるとされており⁶⁾、細引伸線時にダイスの摩耗を促進し、また切削される時には切削工具の寿命に有害であるとされている。また Al 自体は N と結合して、圧延後や焼鈍時に AlN を析出して結晶粒の成長を阻害し、材質を硬くするので、できるだけ低くすることが望ましい。しかし、現在採用している sol. Al 調整の技術は、RH 脱ガスを利用し、酸素プローブを用いて、フリー酸素を測定しつつ、添加必要 Al 量を決めており、Fig. 1 に示すように 0.01% までばらつき、 Al_2O_3 の生成しないとされている 0.003% 以下にコントロールすることは不可能であった。さらに実際操作を行っていくうちに sol. Al が 0.002% 以下のヒートではブルーム連铸の铸造末期に取鍋の溶鋼上のスラグによる再酸化が起こり、sol. Al を Al_2O_3 とし、さらに増加したフリー酸素はブルーム CC のモールド内の凝固前面で [C] と反応してブルーム表層下にブローホールを作る。これは分塊圧延後ビレット表面疵となり、Fig. 1

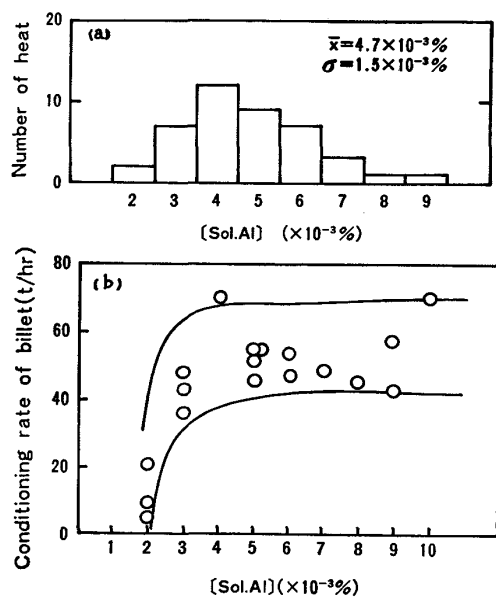


Fig. 1. Histogram of soluble Al in ladle (a) and relation between sol. Al and billet conditioning rate (b).

に示すように、ビレット表面手入能率が低下する。従って Al 含有量の下限は 0.003% 以上としている。

凝固前面に生成するブローホールを電磁攪拌による溶鋼流動によつて防止し、従つて sol. Al の下限値を低下させることが行われている⁷⁾。しかし今回リムド代替低炭素鋼の連铸においてモールド内に旋回型電磁攪拌を適用したところ、長辺中央では凝固前面の溶鋼の流動速度が 40 cm/s もあつても、コーナー部では流動がほとんど停滞し、sol. Al の低いチャージでは铸造末期になるとブルーム表層下にブローホールが発生し健全な表面のビレットを得るにはビレット表面の重手入が必要であった。その結果、電磁攪拌は CO ブローホール防止の目的では使用していない。

2.2 低 N 鋼の製造

鋼中の Al 量が少なく、さらに N 量が高い場合、伸線や冷鍛の際に加工硬化が大きくなる。溶鋼中の N を少なくするため転炉はハードブロー条件をとり、出鋼の際 N の吸収を防止するため未脱酸状態で出鋼し、RH 処理時の Ar ガスの流量を増加した。さらに铸造に至るまでの断気を行つて 30 ppm 以下にしている。

2.3 棒鋼、線材の強度と延性

LANS-BW は少量ながら sol. Al と N を含有してい

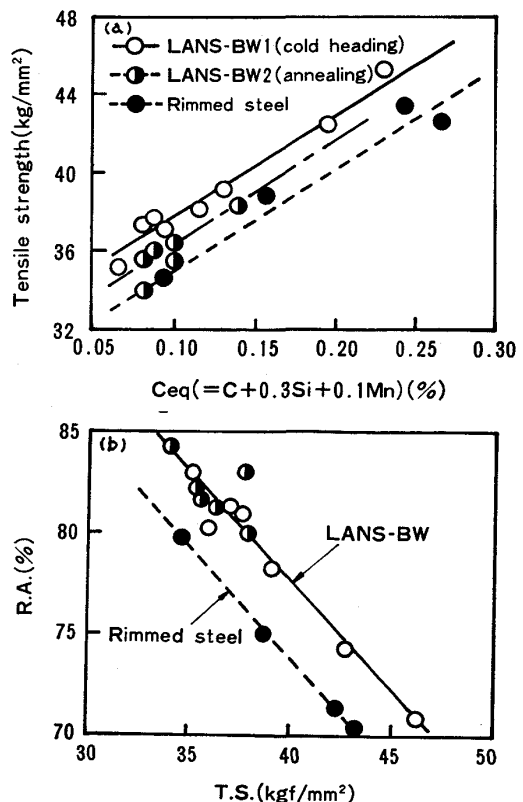


Fig. 2. Effect of carbon-equivalent on tensile strength of as-rolled wire rod (5.5 mm ϕ) (a) and relation between tensile strength and reduction in area (b).

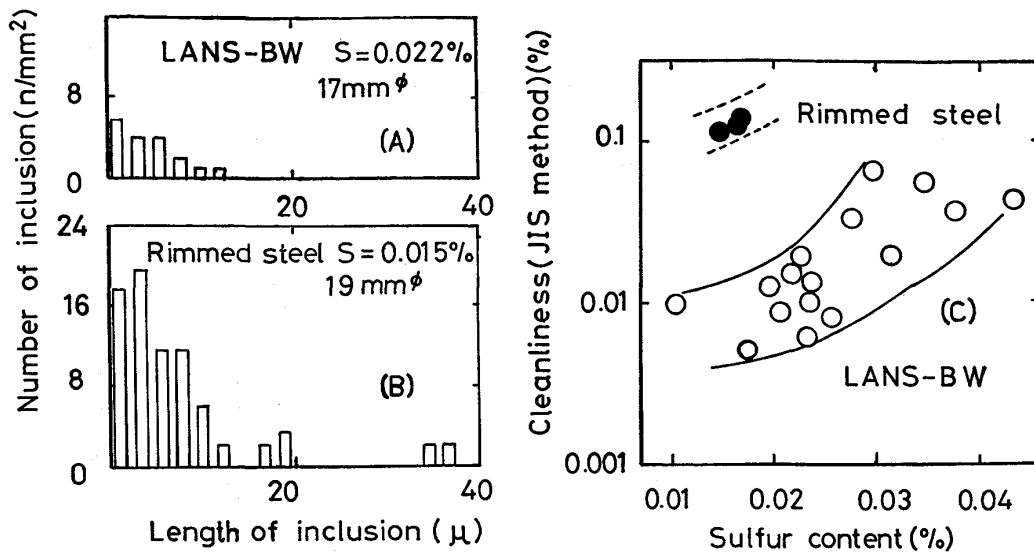


Fig. 3. Histogram of inclusion length in bar of LANS-BW (a) and rimmed steel (b) and relation between sulfur content and cleanliness of hot-rolled billet (c).

るため AlN が析出し、リムド鋼から圧延した線材より細粒となっており、同一成分レベルでは Fig. 2 に示すように、引張強さはリムド材より高くなっている。しかし絞りに見られるように延性は高い。引張強さの低減方法としては固溶元素の添加量を減少させるか、結晶粒を大きくする方法がある。ユーザーの次の工程の都合で固溶元素の低減が不可能な場合には、ボロンを添加して N を BN として固定し、AlN の析出を防止し、結晶粒の成長を期待し、それによつて強度を低目にしていく。(以下の説明で、B を添加するタイプを LANS-BW2 と呼び、単純低 Al-低 N タイプを LANS-BW1 と呼ぶ。)

2.4 棒鋼，線材の介在物

リムド鋼と LANS-BW の棒鋼中の介在物のサイズ分布を調査したところ Fig. 3 に示すように、リムド材では S 量が低目でも介在物量が多く、また大型の介在物が多い。また LANS-BW では S 量が増すにつれて介在物面積率は増加するがリムド材に較べてはるかに小さい。これはリムド鋼で酸化物系介在物があることと中心偏析が存在するためである。(リムド鋼塊から分塊圧延されたビレットの C 断面の中心部の [C] 濃度を鋼塊長手方向に沿って分析して見るとトップ近傍で 2 倍以上の正偏

析が見られる。) LANS-BW の介在物状況は冷鍛性には有利であるが、切削性には不利である。LANS-BW で切削性を上げる場合は S を上げ硫化物系介在物を増加させる方法をとるが、サイズ、サイズばらつきともに小さい

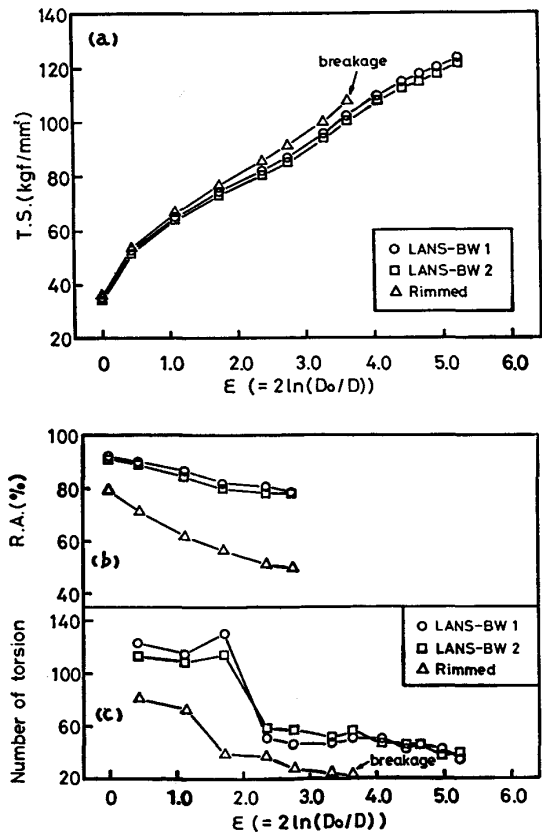


Fig. 4. Workhardening curves during drawing (a) and change of R. A. and number of torsion with drawing strain (b), (c).

Table 1. Chemical composition of samples.

Steel	C	Si	Mn	P	S	Al	B	N
LANS-BW1	0.04	0.01	0.20	0.019	0.021	0.008	Tr.	0.0020
LANS-BW2	0.04	0.01	0.20	0.022	0.021	0.005	0.0020	0.0022
Rimmed	0.04	Tr.	0.25	0.021	0.022	Tr.	Tr.	0.0020

Steel grade : SWRM 6

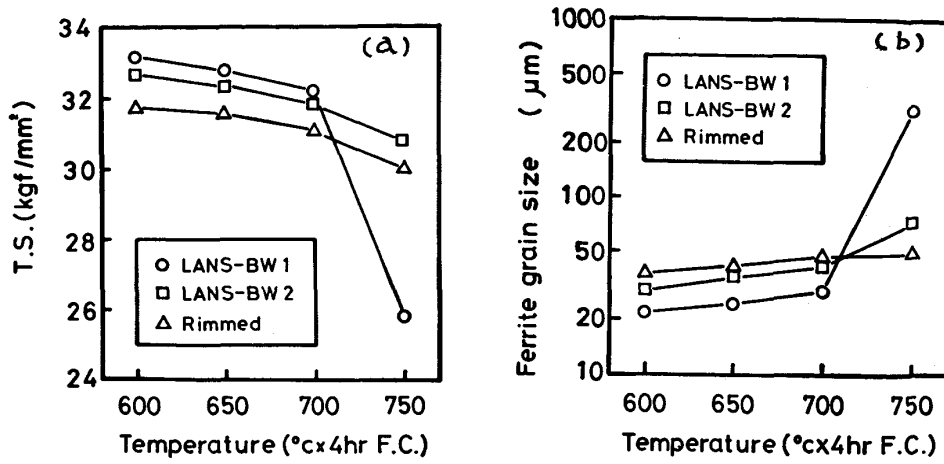


Fig. 5. Effect of annealing temperature on *T. S.* (a) and the ferrite grain size of 3.5 mm ϕ wires (b).

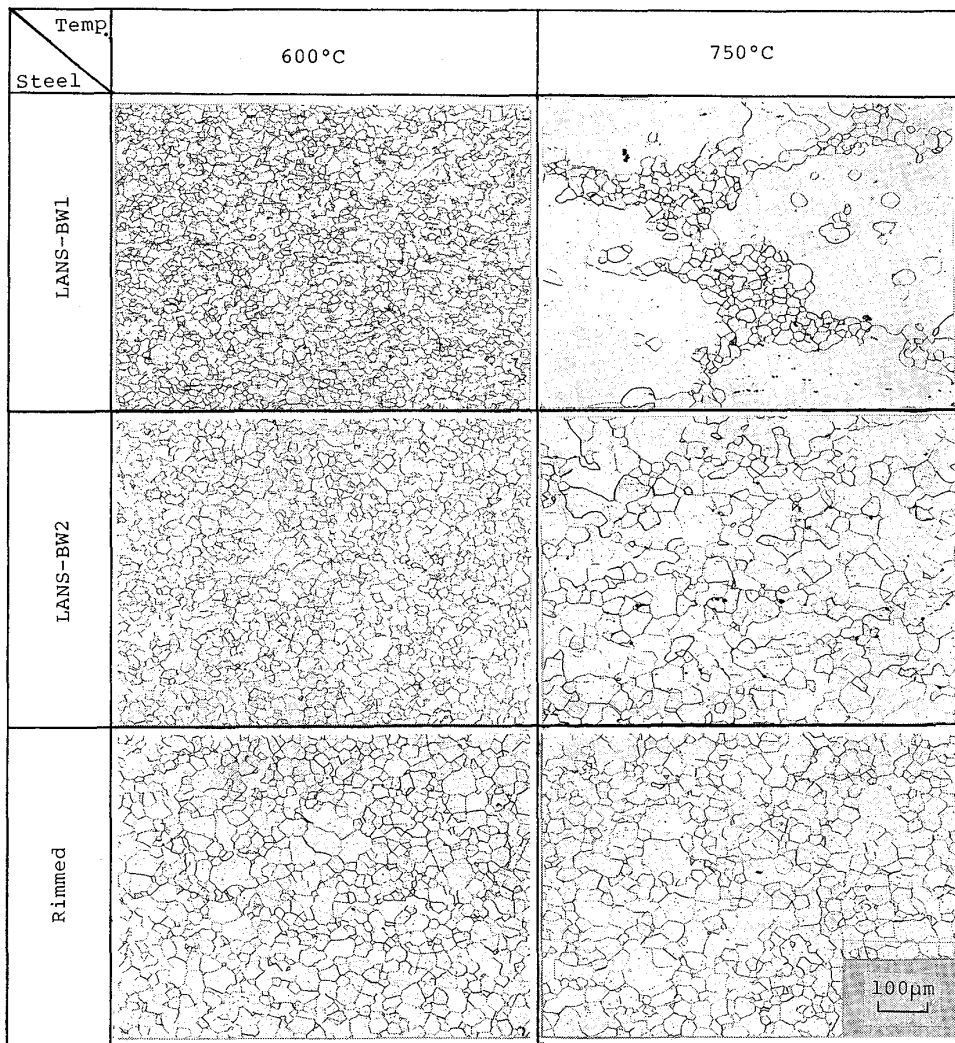


Photo. 1. Microstructures of 3.5 mm ϕ wire drawn and annealed.

介在物が増加し，冷鍛性もリムド材より良好となる。

2.5 伸線性，焼鈍性，冷鍛性，切削性

Table 1 に供試材の化学成分を示す。試験材は 114 mm 角ビレットから 5.5 mm 丸の線材および 44 mm ϕ の棒鋼に圧延した。

2.5.1 伸線性

軟鋼線材 SWRM6 に相当する 5.5 mm ϕ 線材を 0.4 mm ϕ まで 12 枚のダイスを用いて連続伸線した。各ダイスにおける伸線材をサンプリングし，強度と絞りと捻り試験における捻回値を Fig. 4 に示す。伸線仕上速度は 700 m/min である。リムド鋼が 0.9 mm ϕ で断線したのに対し，LANS-BW1, 2 とも断線は見られず，伸線加工による加工硬化はリムド鋼に比べて小さく，伸線途中の各線径における絞り値も高く，伸線加工性が良好である。

2.5.2 焼鈍性

なまし鉄線など伸線後焼鈍工程を通る用途では，焼鈍によつて安定した軟化挙動をとることが重要である。Fig. 5 に示すように，5.5 mm ϕ 線材を 3.5 mm ϕ に伸線した後 600°C から 750°C に軟化焼鈍した時の引張強さは，LANS-BW1 で 700°C を超えると大きく低下する。これは焼鈍材のフェライト粒が大きく成長して，Photo. 1 に示すように混粒にもなっているからと考えられる。LANS-BW1 では焼鈍時 AIN が析出し，1 次再結晶粒径が 20 μm と細かいため，2 次再結晶における粒成長の駆動力が大きく，700°C を超えると AIN 自身が成長し，フェライト粒界における粒界ピン止め効果がなくなつたため急速に粒成長が起こつたものである。このような粗大粒は次の冷間加工時の加工性を損なう場合がある。これに対して LANS-BW2 では，B の添加によつて N の固定をはかつたので，AIN の析出はみられず，1 次再結晶で比較的大きくなり，そのため 2 次再結晶の粒成長の際の駆動力が小さく，高温の焼鈍においても粗大粒の発生はみられず，安定した整粒が見られる。

2.5.3 冷鍛性

冷鍛性試験は線材の圧縮試験とタッピングねじ試作試験を行つた。圧縮試験は圧延ままの 5.5 mm ϕ 線材から高さ 8.25 mm の試験片を切り出し，その外周に長手方向に深さ 0.8 mm，角度 30°，切欠先端半径 0.15 mm の切欠きをつけ，上下面を潤滑なしで拘束し，長手方向に圧縮した。その際切欠底に割れが発生した圧縮率でもつて限界圧縮率とした。Fig. 6 に示すように，いずれの鋼種も強度が高くなるにつれて，限界圧縮率は小さく冷間加工性は低下してくるが，LANS-BW はどの強度レベルにおいても，リムド鋼と比べて限界圧縮率が高い。

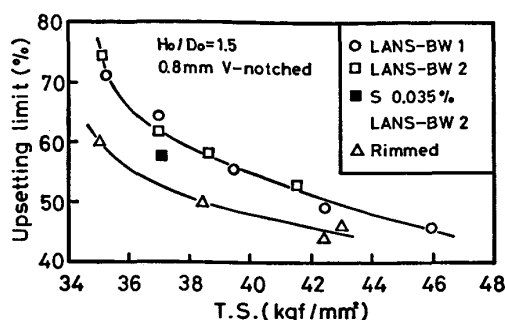


Fig. 6. Relation between tensile strength of 5.5 mm ϕ wire rod and upsetting limit.

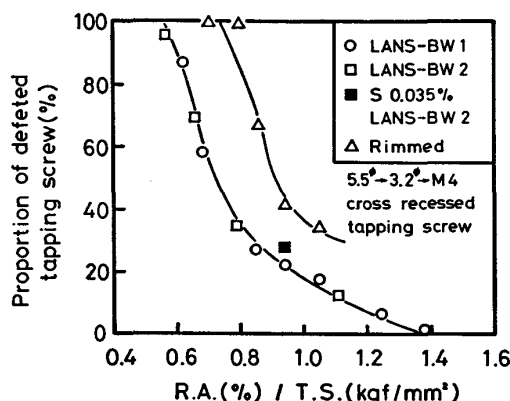


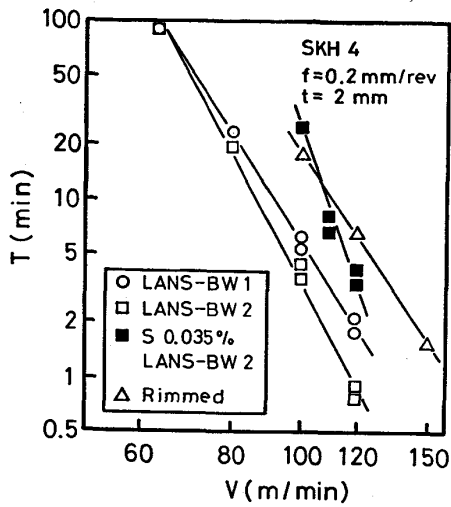
Fig. 7. Relation between ($R.A./T.S.$) and proportion of defect tapping screw in thread rolling of 3.2 mm ϕ drawn wires.

また前述したように切削性を改善する目的で S を 0.035% まで高めても，冷鍛性は多少低下するが，リムド鋼より良好である。

タッピングねじ試作試験は，5.5 mm ϕ 線材を 3.2 mm ϕ に伸線後，そのまま冷鍛，転造によつて M4 タッピングねじに加工した。タッピングねじの先端部は線材の中心部に対応し，そこが延性の不足で欠けたり，割れたりして形状不良となる比率を調査すると，Fig. 7 に示すように，伸線されたワイヤーの絞りが高く，強度が低いほど転造不良率は小さくなる傾向がどちらの鋼種でも見られるが，ここでも LANS-BW はリムド鋼に比べてワイヤー中心の清浄性が良いため良好な転造結果が得られている。

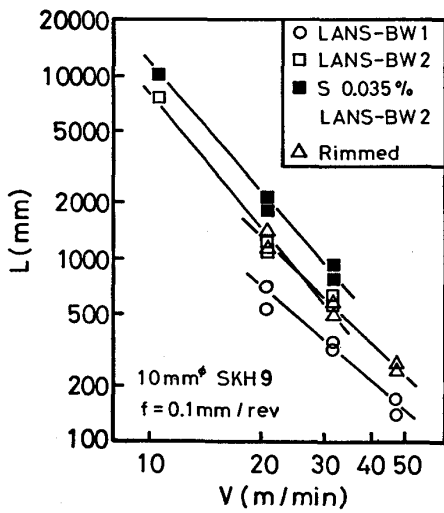
2.5.4 切削性

切削性試験については，丸棒を対象に，SKH4 のハイスバイトを用いた旋削試験を行い，さらに 114 mm 角ビレットの C 断面を対象に，SKH9 のハイスドリルを用いた穴あけ試験を行つた。Fig. 8 に旋削試験の結果，Fig. 9 にドリル穴あけ試験の結果を示す。いずれも切削速度を上げると工具の寿命が低下することを示している。同一切削速度ではリムド鋼の方が切削性は良好で，



Steel grade : SWRM 8

Fig. 8. Relation between machining speed and tool life (turning).



Steel grade : SWRM 8

Fig. 9. Relation between machining speed and tool life (drilling).

工具寿命が大きい。これは 2・4 で述べたようにリムド鋼中に大型介在物が多量に存在しているため、切削時に、塑性変形するチップの中で、介在物が切欠効果を発揮し、変形、破断が容易になるためである。LANS-BW において S を 0.035% に増加すると、旋削ではリムド鋼とほぼ同等、ドリル穴あけではリムド鋼より良好な切削性となる。

2.6 浸炭焼入性

自転車や産業機械部品で表面硬度や耐摩耗性の向上を目的として、これら低炭素鋼においても、加工後浸炭焼入れが施される場合がある。Photo. 2 に見られるように低炭素鋼、特に LANS-BW では浸炭硬化深さがばらつく傾向がみられるので、まず LANS-BW とリムド鋼の浸炭焼入性の差について調査した。

浸炭焼入れは 920°C で 3~8 h 行つた。浸炭後焼ならした硬度分布から炭素拡散深さを求めたが、この深さは、浸炭焼入硬度分布曲線と、通常の焼入硬度分布曲線との交点に相当する (Fig. 10)。ユーザーにおける浸炭性評価はロックウェル硬度計による表面硬さで行われることが多いので、Fig. 11 に示すように、有効硬化深さ (ビッカース硬度計で浸炭層の硬度分布を測定して、550 HV になる位置までの深さ) と表面硬さとの間に

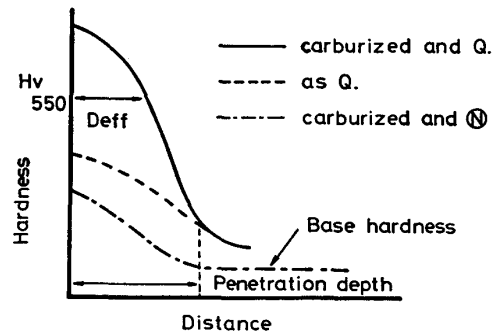
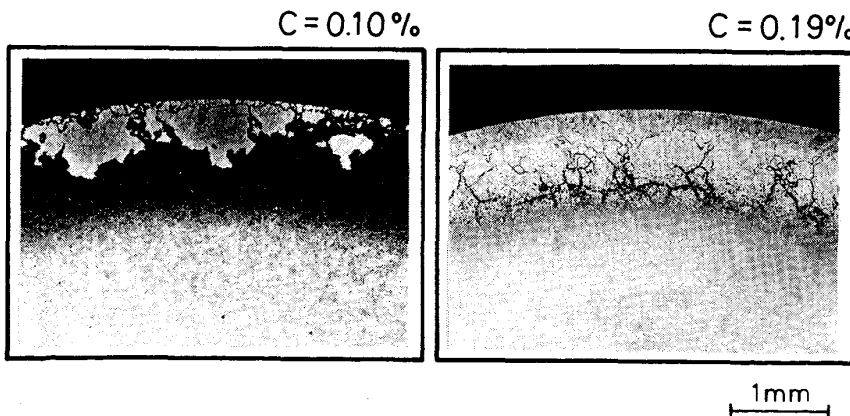


Fig. 10. Schematic curve of hardness profile.



Left : Al-killed steel Right : rimmed steel

Photo. 2. Microstructure of carburized hardened layer.

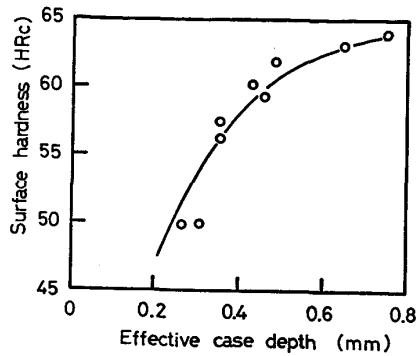


Fig. 11. Relation between effective case depth and surface hardness.

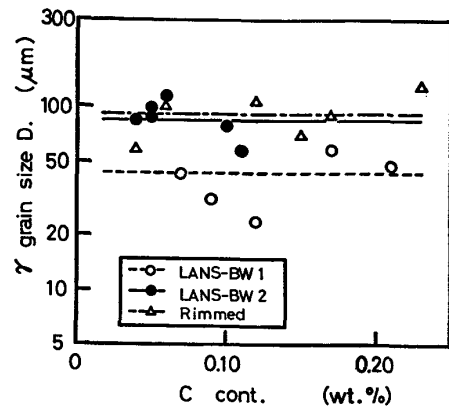


Fig. 14. Austenite grain size of carburized steels.

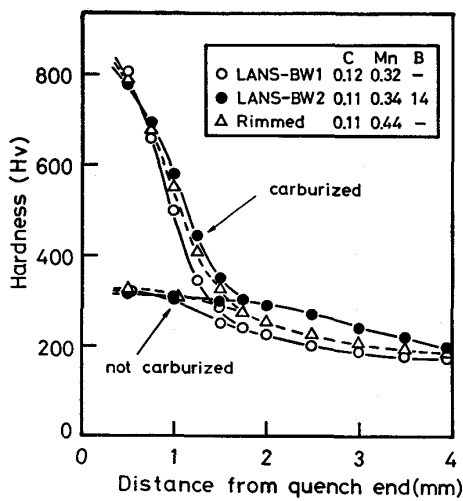


Fig. 12. End quenched hardness profiles of carburized and not carburized specimens.

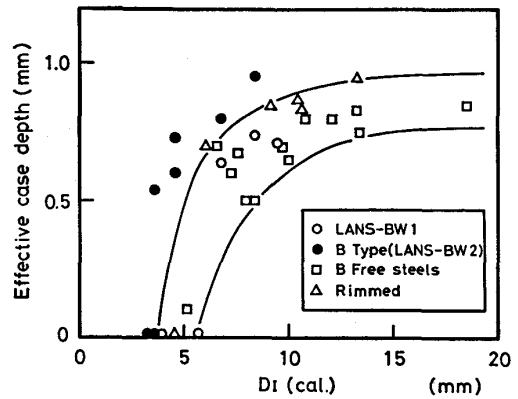


Fig. 15. Relation between D_1 and effective case depth.

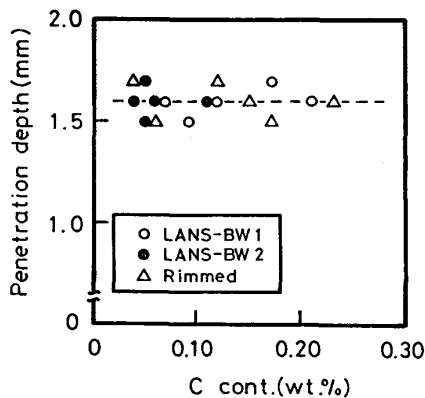


Fig. 13. Penetration depth of carbon.

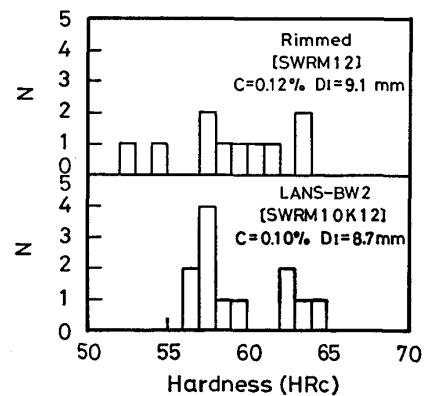


Fig. 16. Histogram of surface hardness of carburized steels.

良い対応があることを確認している。

Fig. 12 にリムド鋼，LANS-BW1 と LANS-BW2 の一端焼入れと，浸炭面を噴水焼入れした結果を示す。焼入条件が適切であった本試験では鋼種間の差はほとんど出なかつたが，有効硬化深さは LANS-BW1 よりリムド鋼の方が大きい。LANS-BW とリムド鋼とで炭素拡散深さが異なるかどうか調査したところ Fig. 13 に

示すように，リムド，LANS-BW1，LANS-BW2 の間に差異は見られなかつた。次に各鋼種間の浸炭層の γ 粒径を比較した。Fig. 14 に示すように，リムド鋼に対して，B を含有しない LANS-BW1 では AIN の析出の効果で細粒化し γ 粒度番号で 2 番程度小さくなつており，それに対し B を添加している LANS-BW2 の γ 粒径はリムド鋼とほぼ同じになつている。次に B 自体の効果を見るため， γ 粒度と合金成分から求まる理想臨界直

径 D_I と有効硬化深さとの関係を見ると, Fig. 15 のようになる. D_I 値は Grossman の式による計算値で, ボロンファクターを含めていないので, LANS-BW2 はボロンの焼入性向上効果があつて, リムド鋼を含むその他の鋼種のグループからはずれて, 高い浸炭硬化性を持っていることを示している. 以上の結果を踏まえて, ユーザーにおける実炉での試験結果を Fig. 16 に示す. リムド鋼に比べて, γ 粒度をリムド並みにし, さらに焼入性を上げた LANS-BW2 の浸炭表面硬さのヒストグラムはばらつきも小さく, 良好な結果を得ている.

3. 結 言

棒鋼, 線材向リムド鋼に対応する低炭素鋼をブルーム連铸機で製造するため, 低 Al, 低 N 鋼をベースにした鋼種について調査した結果, 次の結論を得た.

1) 有害な AlN , Al_2O_3 を減少させるため低 Al 化を目指し, RH 脱ガス, O_2 メーターによる管理, 無酸化鑄造を行い sol. Al を 0.01% 以下にすることが可能となつた.

2) 連铸ブルーム表層下のブローホールは 0.002% 以下で生成することがわかつた. この対策としてモールド内電磁攪拌が有効でないことがわかつたので, sol. Al を 0.003% 以上とすることとした.

3) 転炉のハードブロー操業, 未脱酸出鋼, RH 処理時の Ar 流量増加, 鑄造までの断気によつて N は 0.003% 以下となつた.

4) リムド鋼に比べて, 高速伸線時の伸線限界径が小さく, 伸線各線径において引張試験を行うと絞り値が高く, 振り試験で破断までの回数が大きく, 延性が良好であることがわかつた.

5) 清浄度が良好で, 介在物径が小さいため線材の表

層, 中心部はどちらも冷鍛性が高い.

6) この程度の低 Al 低 N ではまだ AlN が析出し, 圧延ままで細粒となり, 同一添加元素レベルではリムド鋼に比べて高強度になる. 低強度材が要求される場合, 添加元素低減と B 添加の 2 方法があることがわかつた.

7) AlN が析出すると, 高温焼鈍においてフェライト粒の異常粒生長が発生した. その対策として, B 添加によつて N を固定する方法が有効であることがわかつた.

8) リムド鋼に比べて酸化物系介在物が少なく, 硫化物系介在物もサイズが均一で小さいことから切削性は劣る. 切削性を重視する場合には S 量を増加することが必要である.

9) 浸炭焼入れされる場合も, AlN の析出によつて, 加熱時のオーステナイト粒の生長が遅く, 焼入性が劣っていることがわかつた. これに関しても, B を添加し, AlN の析出を防止し, オーステナイト粒をリムド鋼並みにするとともに焼入性の向上をはかつた. この方法によつて浸炭有効層深さの増加が可能となつた.

文 献

- 1) 喜多村実, 川崎正蔵, 松尾勝良, 松田義弘, 松井秀雄, 柴田隆雄: 鉄と鋼, 67 (1981), S 832
- 2) 落合征雄, 大羽 浩, 飛田洋史, 南雲道彦: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 2001
- 3) 楯 昌久, 室賀 脩, 荒木健治, 井上伊佐雄, 渡辺 馨, 高橋正敏: 鉄と鋼, 67 (1981), S 1125
- 4) 荒木健治, 高橋正敏, 山名秀夫, 豊田康寛, 須田豊治, 高田芳一: 鉄と鋼, 67 (1981), S 1126
- 5) 藪内捷文, 渡辺 馨, 荒木健治, 柴山 裕, 高田芳一, 三辻晴夫: 鉄と鋼, 67 (1981), S 1127
- 6) 竹内栄一, 藤井博務, 大橋徹郎, 円野 仁, 高尾滋良, 古垣一成, 喜多村治雄: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 1615
- 7) I. OCHIAI and M. NAGUMO: Wire J. International, 17 (1984), p. 82