

技術報告

連続焼鈍法によるプレス成形性の優れた 35~40
kgf/mm² 級高張力冷延鋼板の製造高崎 順介*・入江 敏夫*²・芳賀 雄彦*³
柳島 章也*・駒村 宏一*Production of 35~40 kgf/mm² Cold Rolled High Strength Steels
with Excellent Press Formability by Continuous AnnealingJunsuke TAKASAKI, Toshio IRIE, Takehiko HAGA,
Fumiya YANAGISHIMA, and Koichi KOMAMURA

Synopsis:

Dual phase (DP) steels with low yield to tensile strength ratio of 45% and extra deep drawing high strength (EDDH) steels with high \bar{r} value above 2.0 have been successfully produced in a multipurpose continuous annealing line with cooling rate of 40°C/s by gas jet.

Dent resistance of trunk lid panel made from 1.2Mn-0.5Cr DP steel sheets of 0.70 mm thickness is higher than that made from Al killed mild steels of 0.90 mm thickness. In order to obtain tensile strength between 40 to 46 kgf/mm², it is effective to control C content within 0.025~0.040%, and to adjust annealing temperature precisely just above 740°C.

Excellent deep drawabilities are attained by reducing C content down to 0.004% or less in 0.03Nb-0.06P-0.05Al EDDH steels. In actual production, the extremely low carbon content is attained by the combination of decarburizing with bottom blown vessel (down to 0.015%C) and subsequently with reformed RH degasser in about 15 min (less than 0.003%).

The EDDH steels have lower yield strength than 20 kgf/mm² and higher elongation than 42%.

In the multipurpose continuous annealing line, the strip tensions in soaking section and rapid cooling section in the furnace are regulated independently to avoid heat buckling at 830°C and fluttering caused by gas jet, respectively.

1. 緒 言

自動車々体の軽量化のために、ゲージダウンした高張力鋼板の使用量が増加してきた。高張力鋼板の主体は、35~40 kgf/mm² 級の P 添加 Al キルド鋼であり、パネル類に使用されているが、耐デント性（へこみ）や深絞り性の点で P 添加 Al キルド鋼が採用できない部品もかなり残されている。

これらに対応するため、形状凍結性や耐デント性が問題になる浅絞り部品用にフェライト-マルテンサイトから成る混合組織鋼板¹⁾²⁾ (Dual Phase Steel; DP 鋼板)、および深絞り性が要求される部品用に、極低 C-Nb-P 系の超深絞り用高張力鋼板³⁾⁴⁾ (Extra Deep Drawing High Strength Steel; EDDH 鋼板)が開発された。DP 鋼板は α - γ 共存温度域での加熱とマルテンサイト形成のための急速冷却が、また EDDH 鋼板は Nb を含

有しているため再結晶温度が高く、かつ P の粒界偏析による脆化を防止するために急速冷却が、それぞれ必要であり、従来の箱焼鈍法では製造が難しい。本報はガスジェットにより、40°C/s の急速冷却が可能な多目的連続焼鈍炉を用いて、これらの鋼板を工業的に製造する場合の技術的な特徴および製品の品質について述べたものである。

2. 製造工程と品質上の特徴

本報における 40 kgf/mm² 級 DP 鋼板は、Table 1 に示すように、C-Mn-Cr の成分系⁵⁾を採用している。この鋼板は、①降伏応力 (YS) が低く、形状凍結性が優れている、② n 値が大きく、加工硬化能、歪伝播能が大きく、③焼付硬化能が大きく、耐デント性が優れているなどの特徴を有し、自動車の浅絞り用外板パネルに適している。また最近、深絞り性の優れた高張力鋼板として、

昭和 46 年 10 月 31 日受付 (Received Oct. 31, 1981)

* 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (Chiba Works, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chiba 260)

*² 川崎製鉄(株)技術研究所 (Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

*³ 川崎製鉄(株)阪神製造所 (Hanshin Works, Kawasaki Steel Corp.)

極低 C-Al-Nb 鋼に P を添加した 35 kgf/mm² 級 EDDH 鋼板が開発された。この鋼板は Table 1 に示すように延性が良好で、2.0 以上の非常に高い \bar{r} 値を示すことが特徴であり、従来の高張力鋼板ではプレス成形が難しかったフェンダーなどの深絞り成形部品に適している。

これらの鋼板の製造工程を Fig. 1 に示す。40 kgf/mm² 級 DP 鋼板については、材質のばらつきを少なく

Table 1. Typical chemical compositions and mechanical properties.

	(wt%)						
	C	Si	Mn	P	Al	Cr	Nb
DP steel	0.032	0.03	1.20	0.010	0.030	0.49	—
EDDH steel	0.003	0.02	0.20	0.065	0.075	—	0.025
	(thickness 0.7mm)						
	YS (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	EI (%)	YEI (%)	$n_{5-15\%}$	\bar{r}	BH* (kgf/mm ²)
DP steel	19.6	42.7	39.0	0	0.280	1.20	5.0
EDDH steel	20.4	36.1	43.3	0	0.260	2.15	1.2

* Increment of flow stress by 170°C 20min. baking after 2% prestrain.

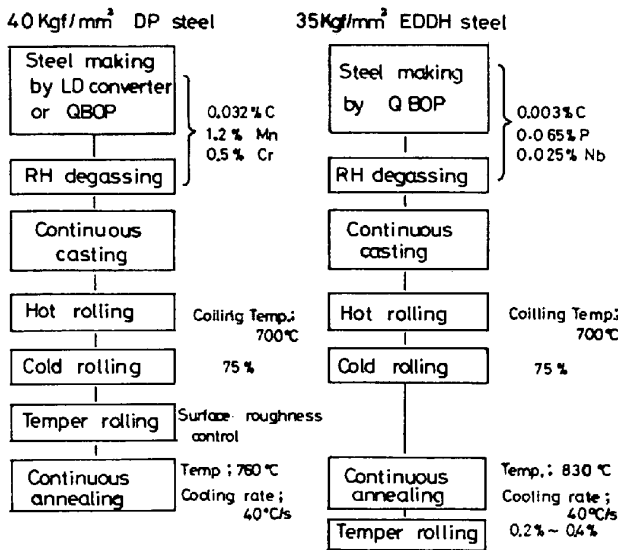


Fig. 1. Manufacturing processes for dual phase steels and extra deep drawing high strength steels.

するため、転炉、RH 脱ガスで高精度の成分調整を行い、成分偏析をさけるため、連続製造工程を採用している。熱間圧延に際しては、 α 粒中の C, Mn および Cr を γ 粒中へ濃化させ、 α 粒を純化することにより降伏比を低くするため、700°C の高温で巻き取る。この種の鋼では、連続焼鈍後のスキンプス圧延は降伏応力を上昇させる⁶⁾ ので、冷間圧延後表面粗度調整のためのスキンプス圧延を行う。

一方、35 kgf/mm² 級 EDDH 鋼板は、QBOP-RH 脱ガスの工程で、C 含有量 30 ppm 程度の極低炭素鋼とし、Nb, P を添加後連続スラブとする。高い \bar{r} 値を得るため、Nb 炭窒化物の析出による固溶 C の低減を目的として熱間圧延後 700°C の高温で巻き取る。冷間圧延後連続焼鈍し、表面粗度調整のため、0.2~0.4% の軽圧下のスキンプス圧延を行う。すなわち、固溶 C, N がほとんどなく、焼鈍ままの状態でも降伏点伸び (YEI) が発生しないので、スキンプス圧延の目的は表面粗度調整するだけでよいからである。なお、DP 鋼板、EDDH 鋼板の形状はともに連続焼鈍ままの状態できわめて平坦であり、スキンプスやレベラーによる形状矯正の必要はない。

これらの鋼板はいずれも Fig. 2 に示す多目的連続焼鈍ラインで製造される。この連続焼鈍ラインは入側洗浄設備、加熱帯、均熱帯、第 1 冷却帯 (急冷または徐冷)、第 2 冷却帯 (徐冷または過時効処理)、第 3 冷却帯 (急冷) からなり、同一のパスで 3 種類のヒートサイクルを作りわけることができる。DP 鋼板、EDDH 鋼板はいずれも、Fig. 2 ② に示すように、第 1 冷却帯の第 1 パスで、焼鈍温度から 300°C まで、ガスジェット法により 40°C/s の冷却速度で急冷され、その後第 2 冷却帯の入口までの間に 95°C まで冷却される。C-Mn-Cr 系 DP 鋼板の降伏応力は、30°C/s~50°C/s の冷却速度で冷却したとき、最も低くなる²⁾。また、極低 C-Nb-P 鋼における、P の粒界偏析による脆化は、40°C/s の急速冷却により完全に防止できる⁴⁾。鋼板は第 2 冷却帯で、

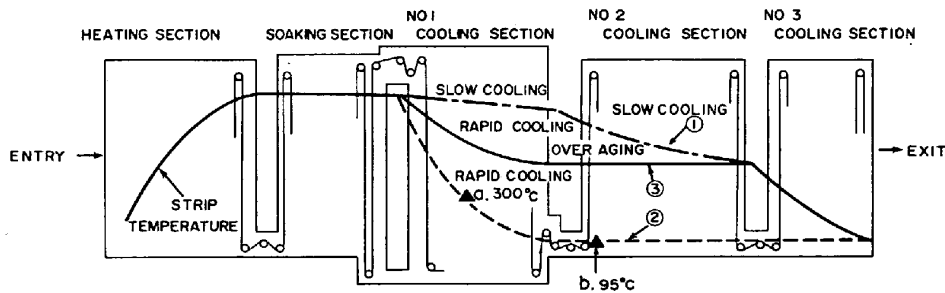


Fig. 2. Schematic diagram of furnace structure and heat cycles for the multipurpose continuous annealing line.

くり返し曲げを受けるが、第2冷却帯をバイパスした場合と比較して、降伏応力上昇などの材質劣化は認められなかつた。

3. 混合組織鋼板 (DP 鋼板)

3.1 引張強さ (TS) の管理

C-Mn-Cr 系 40 kgf/mm² 級 DP 鋼板の降伏応力は、軟鋼板と同程度に低く、実用化にあつては、TS の管理が重要であつた。実機のトランク・リッド・アウトターへの DP 鋼板の適用例について述べる。この部品は従来、厚さ 0.75 mm の軟鋼板を使用していたが、耐デント性を向上させる目的で 40 kgf/mm² 級 DP 鋼板の適用が計画された。採用にあつて 0.70 mm の 40 kgf/mm² 級 DP 鋼板と、厚さ 0.80~0.90 mm の軟鋼板の耐デント性の比較調査を行つた。耐デント性調査用パネルは実車の金型でプレスし、プレス後のパネル中央部の加工歪み量は、相当歪みで 2.5% であつた。その後、塗装焼付を行い、コーナー 30R の硬質ゴム圧子を使用し、永久歪みが発生し始める荷重を測定した。結果を Fig. 3⁸⁾ に示すが、厚さ 0.70 mm の 40 kgf/mm² 級 DP 鋼板の耐デント性は、0.90 mm の軟鋼板のそれより優れていることがわかる。この理由は、C-Mn-Cr 系 DP 鋼板の低歪み域における n 値が高く、かつ焼付硬化能が大きい⁹⁾ ので、製品パネルの降伏強度が高くなつたからであろう。しかし量産プレスの段階では張り剛性が不足するパネルが発生した。原因調査のため、7700 枚の実機プレス成績を調査し、張り剛性不足と素材材質との関係を調査した。Table 2 にその結果を示すが、YS が 19~23 kgf/mm² と低いにもかかわらず TS が 46 kgf/mm² 以上になると、張り剛性不足のパネルが多発する傾向があることがわかつた。この理由は、この部品の場

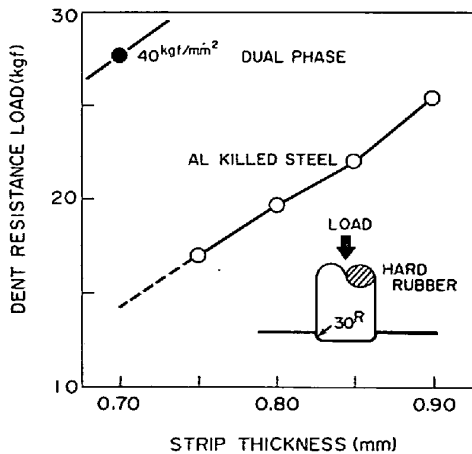


Fig. 3. Relationship between dent-resistance force and thickness of trunk lid outer panel⁸⁾.

Table 2. Relationship between the tensile strength of sheets and percent of rejection due to lack of panel stiffness.

TS (kgf/mm ²)	40	41	43	44	45	46	47
YS (gf/mm ²)	19~20	21~23	19~23	20~22	22~23	22~23	22~23
*P.R.(%)	0	0	0	3	4	33	100

* P.R : percent of rejection

合、プレス金型からパネルを離型した後の折り曲げ工程において、TS の高い鋼板を使用した場合パネル形状の変化が大きくその結果パネルの曲率半径も大きくなつたためと推定される。このように、実用化にあつては、YS を低く管理することはもちろんのこと、TS を 40 kgf/mm² 以上で、できるだけ低くかつそのばらつきを ±3 kgf/mm² 以内に管理する必要があることがわかつた。

3.2 出鋼成分の制御

40 kgf/mm² 級 DP 鋼板の成分変動による TS の変化を調査するため、それまでに試験的に製造していた 89 個のデータを用い、変数増減法による重回帰分析を行い、(1) 式の結果を得た。これらのデータの条件のばらつきは、C : 0.030~0.044%, Mn ; 1.17~1.44%, Si ; 0.04~0.09%, CT ; 683~732°C, 焼鈍温度 ; 740~781°C, 冷却速度 ; 20~50°C/s であつた。

$$\begin{aligned}
 TS(\text{kgf/mm}^2) = & a + 158.3^{**}[C(\%)] \\
 & + 13.2^{**}[Mn(\%)] + 33.0^{**}[Si(\%)] \\
 & - 0.246^{**}[CT(^{\circ}C)] + 0.111^{**}[AT(^{\circ}C)] \\
 & \dots\dots\dots (1)
 \end{aligned}$$

ただし CT ; 熱延巻き取り温度 (Coiling Temp.)

AT ; 焼鈍温度 (Annealing Temp.)

** ; 有意水準 1% で有意

なお(1)式の相関係数 (R) は 83.2% であつた。この結果 C, Si, Mn のうち TS におよぼす影響の最も大きい元素は、C 含有量であることがわかる。

次に C 量の YS および YEL におよぼす影響を調べるため成分として、Mn ; 1.20~1.30%, Cr ; 0.47~0.53%, Si ; 0.04~0.09% を含有する溶鋼の C 含有量を 0.015~0.065% の範囲で変えた素材を、770°C × 40s 均熱、40°C/s の冷却速度の条件で連続焼鈍した場合の材質変化を調査した。結果を Fig. 4 に示すが、C 量が 0.025% 以下では YEL が発生し、YS も上昇する。これは混合組織が形成されなかつたためと考えられる。一方、TS を 46 kgf/mm² 以下にするためには、C 量の上限を 0.040% 以下に管理する必要がある。

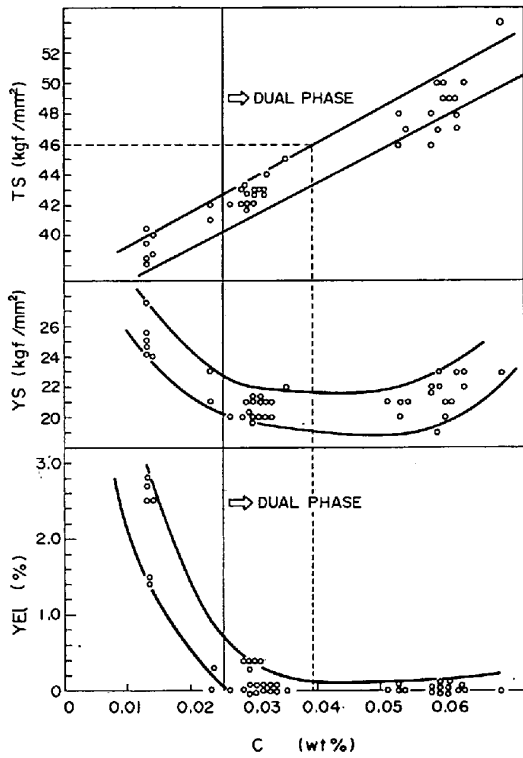


Fig. 4. Influence of carbon content on mechanical properties of C-Mn-Cr dual phase steel sheets (thickness 0.70 mm).

3.3 連続焼鈍条件の制御

0.032%C-1.2%Mn-0.49%Cr の成分を有するコイルを用いて、670~850°C の各温度で 40s 均熱後、40°C/s で冷却した場合の均熱帯における板温度と材質の関係を Fig. 5 に示す。板温度が 730°C 未満のとき YS が著しく高くなるのは、焼鈍中に γ が生成されず、混合組織とならなかつたためと考えられる。740°C 以上の温度で焼鈍温度が高くなるほど TS が高くなるのは、温度の

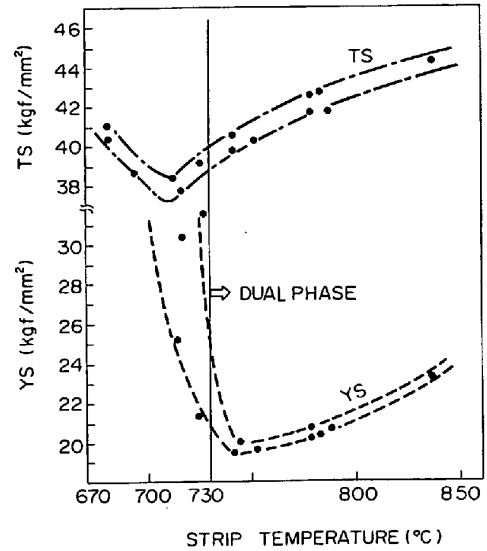


Fig. 5. Effect of annealing temperature on TS and YS (0.032%C-1.20%Mn-0.49%Cr, thickness 0.70 mm).

上昇とともに γ 体積率が増加し、冷却後のマルテンサイト体積率も増加するためと考えられる。40 kgf/mm² 級 DP 鋼板を製造する場合、C含有量は 0.03% 以上になりやすく、そのため TS が高くなりすぎるので、焼鈍温度は混合組織が得られる範囲内で、できるだけ低く、かつ精密な制御が必要である。そのため連続焼鈍ラインでは、コンピュータを使用したダイナミック板温制御を実施している。この方法は、プロセス・コンピュータがマスター・コンピュータからコイルごとの化学成分および熱延条件を素材情報として受け取り、(1)式により目標とする焼鈍温度を決定する。目標とする鋼板温度に短時間で変更するため、Fig. 6 に示すように、コイル継ぎめ部分で自動的にラインスピード、および炉設定温度が変

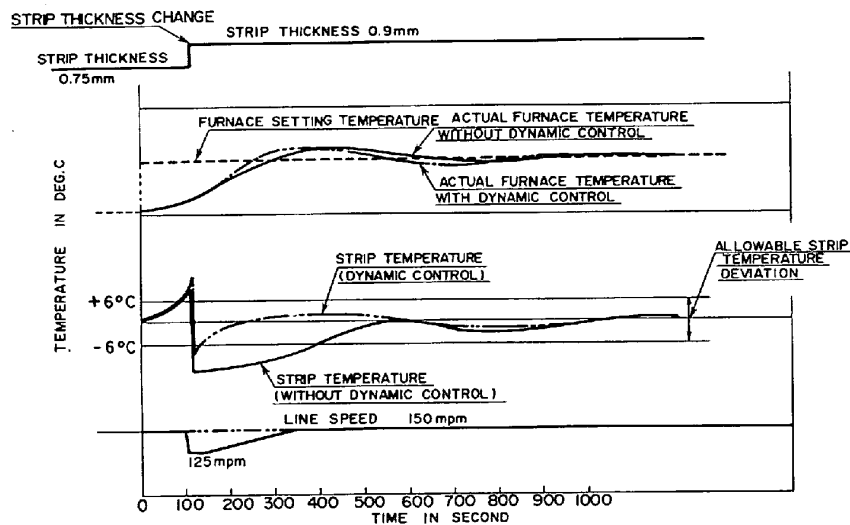


Fig. 6. Changes in strip temperature by the dynamic control of furnace temperature and line speed.

更される。

3.4 材質実績

以上述べたごとく、成分および焼鈍温度の制御により製造した 40 kgf/mm² 級 DP 鋼板の材質は、 $\bar{x} \pm \sigma$ で表現すると、TS(kgf/mm²) = 42.7 ± 1.03, YS(kgf/mm²) = 19.6 ± 1.12, El(%) = 38.5 ± 1.20 に管理できるようになった。

4. 超深絞り用高張力鋼板 (EDDH 鋼板)

4.1 極低炭素鋼溶製技術

Fig. 7 は、P ; 0.060 ~ 0.070 %, Nb ; 0.020 ~ 0.030, Al ; 0.060 ~ 0.080 %, Mn ; 0.15 ~ 0.20% を含有する C 60 ppm 以下の、極低炭素-Nb-P 添加鋼を連続焼鈍ラインで 830°C × 40s の均熱後、40°C/s で冷却した場合の C 含有量と材質の関係を示す。C 含有量が 30 ppm 以下になると \bar{r} 値は 2.0 以上となり深絞り性の良好な 35 kgf/mm² 級 EDDH 鋼板が得られることがわかった。EDDH 用の溶鋼を安定して溶製するには、転炉および RH 脱ガスの工程で、(a) 転炉の出鋼 C をできるだけ下げること、(b) RH 脱ガス時の攪拌を強化し、C 移動定数と反応界面積を大きくし脱炭反応の進行を促進させること、の 2 点が重要である。LD 転炉で

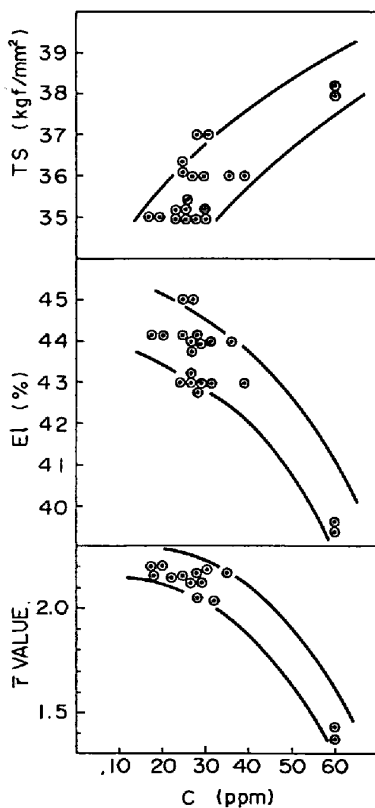


Fig. 7. Effect of carbon content on mechanical properties of extra deep drawing high strength steel sheets (thickness 0.70 mm).

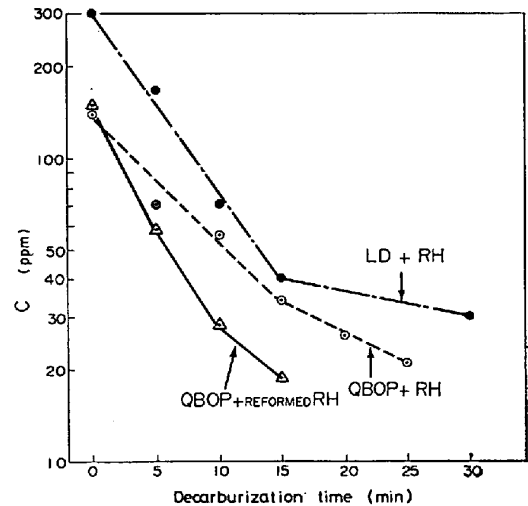


Fig. 8. Decarburization in molten steel by combination process of converter and RH degassing.

は、C 量は 350 ppm 程度が、経済的に吹き下げ得る限界であるが、底吹き転炉 (QBOP) では、150 ppm まで容易に脱炭が可能である。また、RH 脱ガス装置の環流管の径を大きくすることにより、攪拌能力の大きい RH 脱ガス装置に改造し、QBOP との組み合わせにより短時間の RH 脱ガス処理で、極低炭素鋼の溶製が可能となった。Fig. 8 に (a) LD 転炉 + 改造前 RH, (b) QBOP + 改造前 RH, (c) QBOP + 改造 RH の 3 種類の工程で極低炭素鋼を溶製した場合の脱炭時間と C 量の関係を示す。RH 脱ガス終了時 C 含有量 30 ppm の溶鋼とするには、QBOP + 改造 RH 方式は、LD 転炉 + 改造前 RH 方式に比べて脱炭処理時間は約 1/3 であり、このように QBOP の利点と攪拌能力を向上させた改造 RH 脱ガス装置の組み合わせにより、極低炭素鋼が経済的にかつ安定して溶製できる。

4.2 連続焼鈍技術

EDDH 鋼板は、極低炭素鋼のため高温強度が著しく低く、連続焼鈍の加熱、均熱中にヒートバックル (しわ) が発生しやすい。従来の CAL ではこれを防止するために加熱、均熱帯の鋼板張力を下げると、同時に急冷帯の張力も低くなり、冷却用のガスジェットにより鋼板がフラッターリングをおこし、ノズルに接触して、きりきり発生原因となりやすい。多目的連続焼鈍ラインでは、Fig. 9 に示すように、第 1 冷却帯入口部と出口部に、炉内ブライドルロールを設置し、第 1 冷却帯内の鋼板張力は、他帯と独立して制御できる。また、第 1 冷却帯入口部のロールを速度制御の基準となるマスター・ロールとし、このロールを境にして、鋼板が加熱され膨張するセクションと、冷却され収縮するセクションの鋼板張力を分離して制御することにより、高精度の鋼板張力

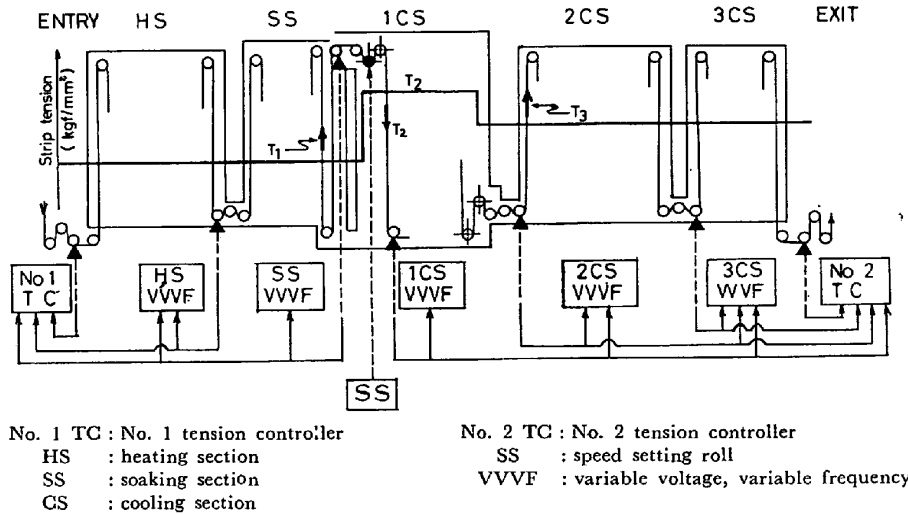


Fig. 9. Schematic diagram of automatic strip tension controlling system.

制御ができる。さらにハース・ロールの駆動に、VVVF (Variable Voltage, Variable Frequency) 制御を施した交流モータを採用し、同一帯内の鋼板張力も任意にかえることができる。

EDDH 鋼板を焼鈍する場合、各帯の鋼板張力は 0.7 mm 厚 × 1250 mm 幅の場合で、Fig. 10 に示すように、(1) ヒートバックル発生防止のため、加熱、均熱帯鋼板張力 (T_1) は、0.8 kgf/mm² 以下にする、(2) 第 1 冷却帯での鋼板のフラッタリング防止のため、第 1 冷却帯張力 (T_2) は、0.8 kgf/mm² 以上にする、(3) 炉内ブライドルロールのスリップ疵を防止するため、 T_1 、 T_2 は(2)式の関係を満足することが必要である。

$$T_1 \exp(-2\pi\mu) < T_2 < T_1 \exp(2\pi\mu) \dots\dots\dots (2)$$

ただし μ はまさつ係数である。

以上の結果、最適操業条件は Fig. 10 の表面疵の発生しない領域を示す三角形に内接する円の中心点で与えられる T_1 、 T_2 であることを見だし、表面疵がなく平坦

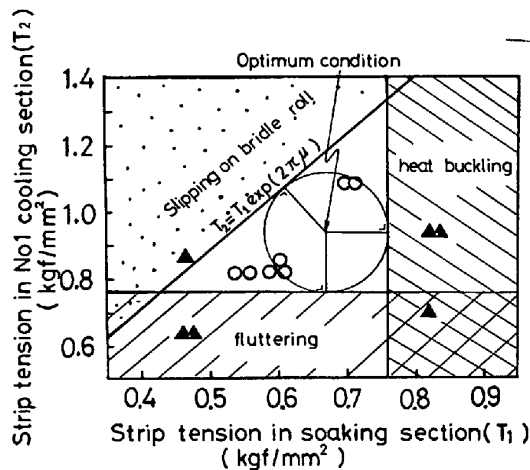


Fig. 10. Optimum combination of strip tensions in soaking and cooling section.

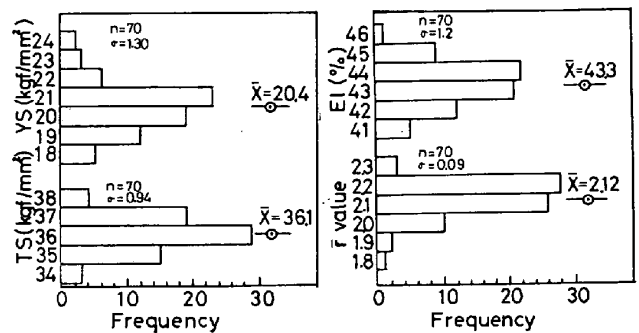


Fig. 11. Mechanical properties of extra deep drawing high strength steel sheets.

度の優れた EDDH 鋼板が製造できるようになった。

4.3 材質実績

このようにして製造した EDDH 鋼板の材質実績を Fig. 11 に示す。従来の P 添加高張力鋼板に比べて、YS が低く、延性が良好で \bar{r} 値も 2.0 以上であり、非常に優れた材質特性が得られている。

5. 結 言

ガスジェット法により 40°C/s の急速冷却ができる多目的連続焼鈍炉を用いて、40 kgf/mm² 級 DP 鋼板および 35 kgf/mm² 級 EDDH 鋼板を工業的に製造し、次の結果を得た。

1) 厚さ 0.70 mm の DP 鋼板から作ったトランク・リッド・パネルの耐デント性は、0.90 mm の軟鋼板のそれより大きい。また折り曲げ成形過程でパネル形状が変化するような部品においては、TS が 46 kgf/mm² を超えると張り剛性が不足する。

2) C-Mn-Cr 系 DP 鋼板の TS は、C、Mn、Si 量、熱延巻き取り温度および連続焼鈍温度に依存し、溶融中の C 量を 0.025~0.040% に調整すること、および焼

鈍温度を 740°C 直上にするにより、40~46 kgf/mm² に制御できる。

3) 極低炭素 Nb-Al-P 系 EDDH 鋼板は、C が 40 ppm 以下のときにすぐれた深絞り性が得られる。底吹き転炉 (QBOP) を用いると容易に C を 0.015% まで下げることができ、さらに環流管の径を大径化するなどの改善を行つた RH 脱ガス装置により、脱炭処理 15 min 以内で 30 ppm まで脱炭できる。

4) 炉内プライドルとハースロール回転速度の VVVF 制御により、均熱帯と急冷帯における鋼板張力を独立して制御できる連続焼鈍炉を用いて、830°C の焼鈍温度でも、均熱帯でのヒート・バックルが発生せずかつ急冷帯できりきずつかずに、35 kgf/mm² 級 EDDH 鋼板が製造できる。

5) 以上述べた方法により、材質を $\bar{x} \pm \sigma$ で表現すると、YS(kgf/mm²) = 19.6 ± 1.12, TS(kgf/mm²) = 42.7 ± 1.03, El(%) = 38.5 ± 1.20 の材質特性を有する DP 鋼板が、また YS(kgf/mm²) = 20.4 ± 1.30, TS(kgf/mm²) = 36.1 ± 0.94, El(%) = 43.3 ± 1.2, \bar{r} = 2.12 ± 0.09 の

EDDH 鋼板が工業的に安定して製造できる。

文 献

- 1) 橋口耕一, 西田 稔, 加藤俊之, 田中智夫: 鉄と鋼, 64 (1978), S257
- 2) K. HASHIGUCHI, M. NISHIDA, T. KATO, and T. TANAKA: Kawasaki Steel Technical Report, (Sep. 1980) No. 1, 70
- 3) 佐藤 進, 入江敏夫, 橋本 修: 鉄と鋼, 66 (1980), S1123
- 4) N. OHASHI, T. IRIE, S. SATOH, O. HASHIMOTO, and I. TAKAHASHI: SAE paper No. 810027 (Feb. 1981)
- 5) 大橋延夫, 高橋 功, 橋口耕一: 塑性と加工, 17 (1976) 190, p. 883
- 6) T. IRIE, S. SATOH, K. HASHIGUCHI, I. TAKAHASHI, and O. HASHIMOTO: Kawasaki Steel Technical Report (Mar. 1981) No. 2, p. 14
- 7) F. YANAGISHIMA, Y. SHIMOYAMA, M. SUZUKI, H. SUNAMI, T. HAGA, Y. IDA, and T. IRIE: : Kawasaki Steel Technical Report (Mar. 1981) No. 2, p. 14
- 8) 角南秀夫, 柳島章也, 高崎順介, 高橋 功, 橋口耕一: 日本金属学会会報, 20 (1981), p. 288
- 9) 阿部英夫, 山本健一, 中川吉左衛門: 川崎製鉄技報, 12 (1980), p. 611