

技術報告

高張力熱延鋼板の製造法とその特性

高橋 功*・青柳 信男*・滝沢 昇一*

桑形 政良*²・西田 稔*³・加藤 俊之*³

Production Technology and Mechanical Properties of High Strength Hot Rolled Steel Sheets

Isao TAKAHASHI, Nobuo AOYAGI, Shoichi TAKIZAWA

Masayoshi KUWAGATA, Minoru NISHIDA, and Toshiyuki KATO

Synopsis:

The various types of high strength hot rolled steel sheets for automotive use have been developed. The effects of hot rolling conditions, especially cooling condition and coiling temperature, on the mechanical properties and the flatness of hot strip are discussed. It was found that the cooling pattern during traveling on runout table as well as coiling temperature was important factor to obtain as-hot-rolled dual phase steel sheet having the uniform properties.

The dual phase steel sheets have a lower yield ratio, high work hardening rate and good ductility, compared with conventional high strength steel sheets. Some examples of the application of these high strength steel sheets are also introduced.

1. 緒 言

1960年代後半の米国での安全対策、その後の排ガス規制、1973年以来の石油価格の高騰など自動車を取りまく環境はますます厳しくなってきた。とくにガソリン価格の上昇につれて、自動車の燃費向上の社会的要請が強くなってきた。

燃費向上対策のおもな方法として、エンジンの効率向上と車体重量の軽量化がある。軽量化の手段としては、小型化、FF化、合理的設計および材料変更がある^{1)~3)}。

車体軽量化材料として低コストで使用性能の優れた高張力鋼板が脚光をあび本格的実用化段階に入った。最近の国内自動車メーカーでの高張力鋼板の採用はめざましく、車体(ホワイトボディ)重量の25%を越える使用率の乗用車も開発されている。トラックでは積載効率向上のためにも軽量化が進められている⁴⁾。

従来、高張力熱延鋼板は自動車のメンバーやフレームなどの強度部材へ適用されてきたが、これらの鋼板には所定の強度が要求されるため、高降伏点型鋼板の製造が行われてきた。ところが最近では、より一層の軽量化への要求が高まるにつれて、成形性の良い高張力熱延鋼板を適用しようという動きが強くなってきた。一方熱延鋼

板は耐久部品に用いられることが多く、疲労強度や溶接強度の増加が望まれている。これに応じて、成形性の優れた混合組織型高張力鋼板が開発され注目を集めている^{5)~7)}。

本報告はこれら各種の高張力熱延鋼板の製造法の特徴を述べるとともに、機械的性質を比較すると同時に若干の適用例について紹介する。

2. 高張力熱延鋼板の製造法

2.1 固溶・析出強化型高張力熱延鋼板

鋼板を強化する手段として Si, Mn, Cr 等の固溶強化元素の添加, Ti, Nb, V 等の炭窒化物による析出強化がある。強度の低い領域では主として前者が、強度の高い領域では両者が併用して用いられている。析出強化元素のうち Ti は Nb や V と異なり介在物形態制御作用があるため、鋼板の圧延直角方向の機械的性質を向上させ、鋼板の異方性を減少させる⁸⁾⁹⁾。また Nb は多量に添加しても強度増加は飽和するのに対し、Ti はより高い範囲まで強度を増加させることができる。

析出強化元素を用いる場合、スラブ加熱温度によってその元素の固溶量が変化するので、最終の熱延鋼板の機械的性質は加熱温度の影響を受ける。0.05%C-1.2%Mn

昭和 56 年 10 月 26 日受付 (Received Oct. 26, 1981)

* 川崎製鉄(株)水島製鉄所 (Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp., I Mizushimakawasakidori Kurashiki 712)

*² 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (Chiba Works, Kawasaki Steel Corp.)

*³ 川崎製鉄(株)技術研究所 (Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

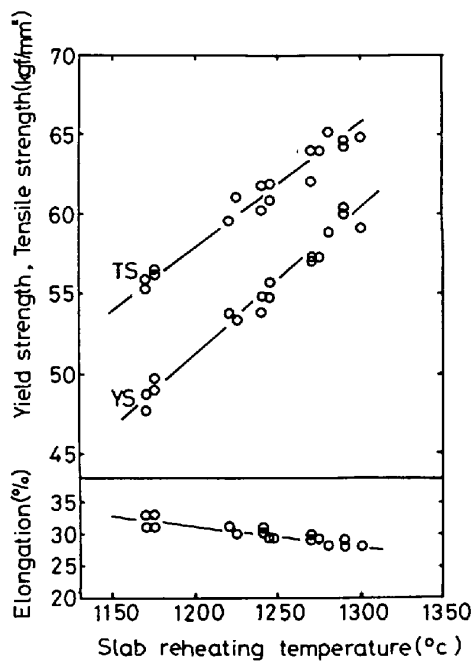


Fig. 1. Effect of slab reheating temperature on the tensile properties of 0.05%C-1.2%Mn-0.065%Ti steel (thickness : 3 mm).

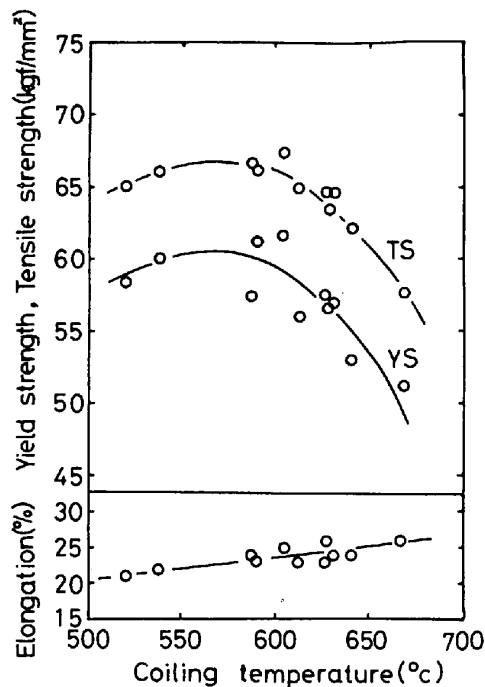


Fig. 2. Effect of coiling temperature on the tensile properties of 0.05%C-1.15%Mn-0.05%Ti steel (thickness : 1.6 mm).

-0.065%Ti 鋼の機械的性質に及ぼす加熱温度の影響を Fig. 1 に示す。加熱温度の上昇とともに、降伏強度、引張強度が増加する。熱延鋼板は熱延後コイル状に巻き取られるが、その時の温度が析出を左右する。機械的性質に及ぼす熱延巻き取り温度の影響を Fig. 2 に示す。巻

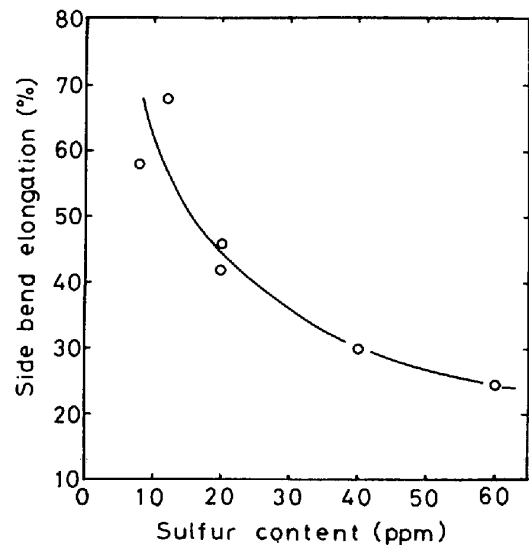


Fig. 3. Relation between sulfur content and stretch flangeability (side bend elongation) for 0.12%C-1.4%Mn-0.03%Ti hot rolled steel sheet (2.3 mm in thickness) of 60kgf/mm² grade [tensile strength].

き取り温度が 600°C を越えると析出物の粗大化による強度の低下が認められる。したがって、析出強化型鋼板(通常 HSLA と呼ばれる)の製造にはスラブ加熱温度、コイル巻き取り温度の管理が重要である。

一般に、鋼板は高強度化するにつれて成形性は劣化する。熱延鋼板で材料によって大きな差が認められる伸びフランジ性も鋼板の高強度化とともに劣化する。鋼中 S 含有量の低減は伸びフランジ性を向上させることが知られている。引張強さ 60 kgf/mm² 級高張力鋼板の伸びフランジ性を表すサイドベンド伸び¹⁰⁾と S 含有量の関係を Fig. 3 に示す。極低 S 量領域でも S 含有量の低減とともに一層伸びフランジ性が改善される。したがって Ti 添加鋼板においても伸びフランジ性の向上のために S 含有量を低減させることは効果的である。

2.2 混合組織型高張力熱延鋼板

フェライト地中に微細なマルテンサイトを分散させて高強度化する、いわゆる混合組織鋼板 (Dual phase steel) の製造方法として、熱延後に熱処理を行う方法と熱延のまま製造する方法の 2 種がある。前者は連続焼鈍法による混合組織冷延鋼板の製造法¹¹⁾と本質的には同一である。ここでは熱延のまま製造する方法の特徴について述べる。

熱延後の冷却中にフェライト変態を促進させ、その後冷却してパーライトを生成させることなくコイル状に巻き取るには適切な成分と冷却条件の選択が必要である。

0.05C-1%Si-1.5%Mn-1%Cr 鋼の連続冷却変態曲線

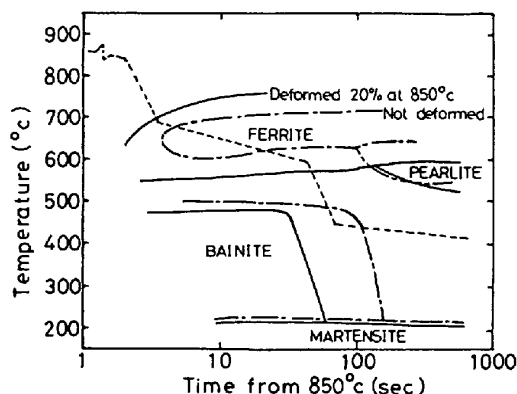


Fig. 4. Schematic representation of hot-strip mill processing for dual phase steel and effect of deformation on continuous-cooling transformation for 0.05%C-1%Si-1.5%Mn-1%Cr steel, austenitized at 930°C for 5min. Broken line corresponds to the coiling curve after hot rolling.

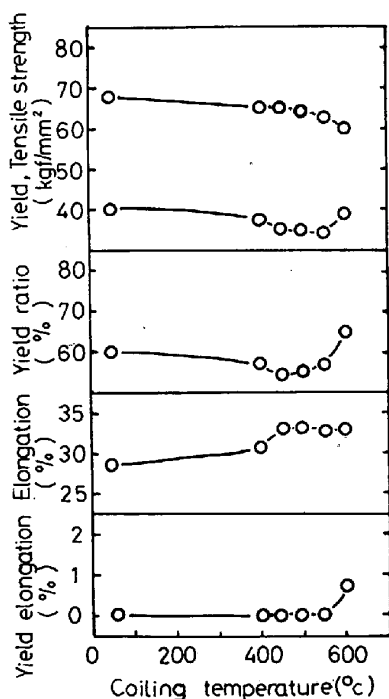


Fig. 5. Effect of coiling temperature on mechanical properties of as-hot-rolled dual phase steel containing 0.05%C-1%Si-1.5%Mn-1%Cr.

12)をFig. 4 に示す。図中の破線で示すように鋼板を冷却させれば混合組織が得られることがわかる。すなわちパーライト変態やベイナイト変態をさせることなく熱延後の冷却条件を選ぶ必要がある。したがって熱延条件、冷却条件の機械的性質に与える影響が大きいことが示唆される。熱延後、中間に空冷を含み前後を約 60°C/s で水冷し熱延巻取温度を変化させた。熱延巻取温度の機械的性質に及ぼす影響を Fig. 5 に示す。540°C 以上の巻

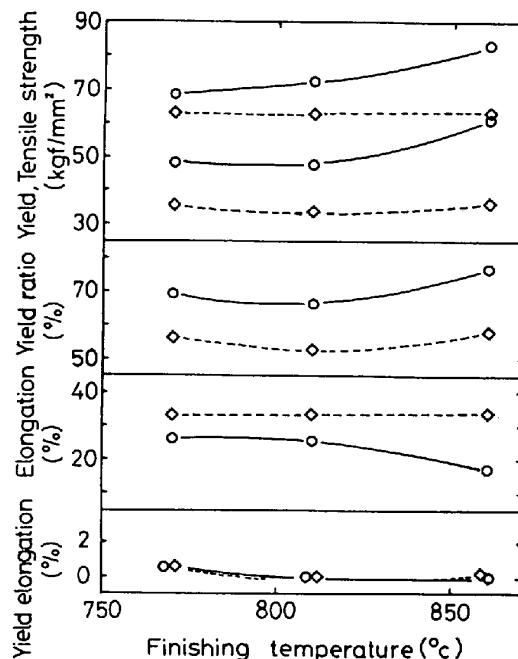


Fig. 6. Effect of finishing temperature on mechanical properties of as-hot-rolled dual phase steel containing 0.05%C-1%Si-1.5%Mn-1%Cr. ○ water cooled immediately after hot rolling. ◇ cooled by the broken line shown in Fig. 4.

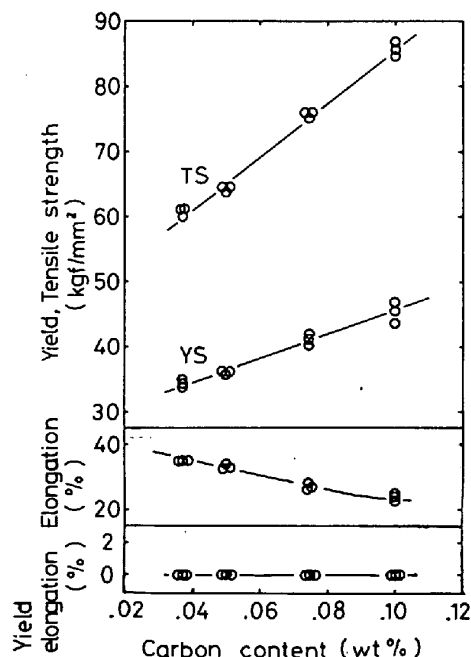


Fig. 7. Effect of carbon content on mechanical properties of as-hot-rolled dual phase steel containing 1%Si-1.5%Mn-1%Cr. Finishing temperature; 780-820°C. Coiling temperature; 400°C.

き取り温度では降伏伸びが現れる。それ以下の温度では降伏伸びが現れず、降伏比が 65% 以下になる。引張強さは巻き取り温度が低くなるにつれて増加するが、降伏

応力は 540°C 程度で最小となる。すなわち巻き取り温度 540°C 以下で混合組織が得られることがわかる。

熱延仕上げ温度 (Finishing Temperature) の機械的性質に及ぼす影響を Fig. 6 に示す。熱延後直ちに水冷する場合には、熱延仕上げ温度の上昇につれて強度が増加する。一方熱延後 Fig. 4 の破線に示す前後半冷却を行う¹³⁾と仕上げ温度の機械的性質に及ぼす影響が小さくなり安定した性質を得ることができる。

1%Si-1.5%Mn-1%Cr 鋼の C 含有量を変化させて混合組織鋼板を製造した結果を Fig. 7 に示す。C 含有量の増加とともに引張強さ、降伏強さがほぼ直線的に増加し、降伏比はやや低下する。0.01%C の増加で引張強さは約 4 kgf/mm² 増加する。このことから化学成分、とくに炭素量の管理は厳密に行う必要がある。

混合組織鋼板を得るには、本質的に通常の熱延巻き取り温度より低い温度で巻き取ることが必要である。低温巻き取りによる鋼板の品質上の問題点として、室温での形状において耳のびが大きくなり、平坦度不良が発生する。形状不良の原因の 1 つにホットランアウトテーブル上での鋼板幅方向の温度差がある。これが室温まで冷却されると、鋼板幅端部に圧縮の残留応力が発生し耳のび形状になると推定される。このことを確認するため、ホットランクーラントの一部を幅端部のみ水冷しない方法 (シール法) を実施し形状改善を試みた。Fig. 8 に通常の鋼板全幅を水冷した場合と板幅端部を水冷しない場合のコイラー入側での板幅方向の温度分布を示す。通常の水冷方法では端部の温度は中央部に比べ 30~40°C 低い、シール法では逆に 40~50°C 高い。350°C で巻き取られたコイルの室温での両者の形状を調べた結果を Fig. 9 に示す。すなわちシール法により低温巻取材の平坦度が改善されることが確認された¹⁴⁾。

以上の種々の検討結果をもとに製造された 60 kgf/mm² および 80 kgf/mm² 級の熱延のまま混合組織型高張力熱延鋼板のコイル長さ方向、幅方向の機械的性質の変動を Fig. 10 に示す。コイル長さ方向、幅方向ともばらつきのない高張力熱延鋼板が製造された。

3. 高張力熱延鋼板の特性

強化機構の異なる高張力熱延鋼板の引張強さと全伸びとの関係を Fig. 11 に示す。引張強さの増加とともに全伸びは一樣に低下する。しかし強化機構によつて異なり、同一強度水準で比較すると混合組織鋼板の伸びが最大で、固溶強化鋼板、析出強化鋼板の順である。混合組織鋼板は降伏強度が低く、一樣伸びが大きいのである。混合組織鋼板のなかでも成分系、製造条件によつて

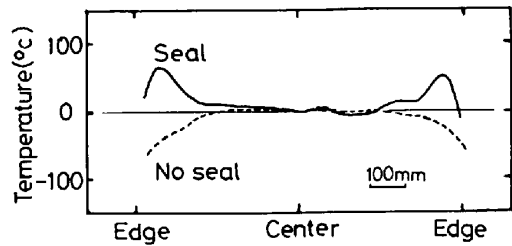


Fig. 8. Temperature distribution in transverse direction of hot strip at the entry side of coiler.

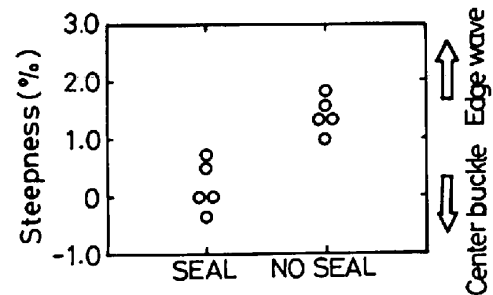


Fig. 9. Effect of edge sealing of hot run coolant on the flatness of hot strip.

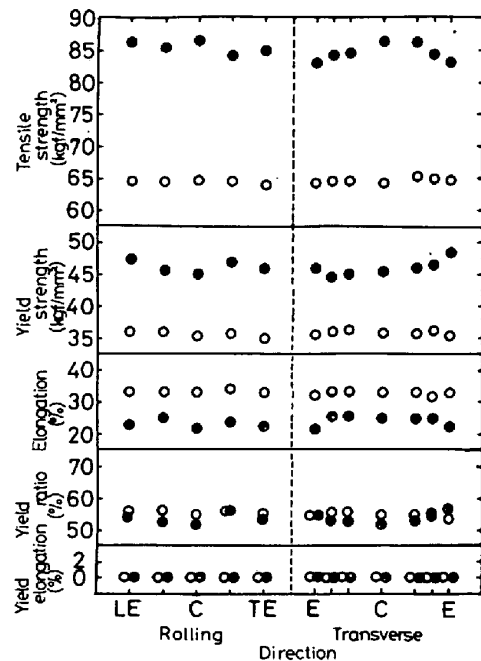


Fig. 10. Mechanical properties variation along rolling direction (left) and transverse direction (right) of as-hot-rolled dual phase steel sheets having the tensile strength of 60 kgf/mm² (○) or 80 kgf/mm² (●). LE and TE correspond to leading end and tail end of hot strip coil, respectively. E and C mean edge and center of the strip width.

Table 1. The chemical compositions and mechanical properties of high strength hot rolled steel sheet of 2.3mm thickness.

Type	Grade	Chemical compositions (wt%)							Tensile properties									
		C	Si	Mn	P	S	Ti	Cr	Y S (kgf/mm ²)	T S (kgf/mm ²)	El (%)	Y El (%)	Y R (%)	n_{5-15}	\bar{r}	Notched tensile elongation (%)	HV	Minimum bend radius
Precipitation hardening	50	0.08	0.04	0.96	0.015	0.003	0.03	—	47.6	54.3	30	1.8	88	0.149	0.90	8.6	162	0 t
	55	0.04	0.04	1.07	0.017	0.003	0.05	—	49.7	57.2	28	2.2	87	0.134	0.98	7.7	162	0 t
	60	0.05	0.55	1.25	0.019	0.003	0.06	—	54.0	62.3	29	3.4	87	0.175	0.94	7.2	189	0 t
Solution hardening	50	0.06	0.53	1.45	0.019	0.003	—	—	36.9	50.0	35	1.1	74	0.191	0.94	11.2	147	0 t
	55	0.08	0.52	1.58	0.022	0.003	—	—	43.5	55.0	32	2.0	79	0.206	0.89	10.1	157	0 t
Dual phase	55	0.05	0.49	1.24	0.018	0.004	—	1.03	31.5	55.1	35	0	57	0.225	0.83	11.0	151	0 t
	60	0.05	1.03	1.30	0.021	0.003	—	1.06	35.9	61.0	34	0	59	0.220	0.83	9.7	156	0 t
	65	0.05	1.00	1.40	0.022	0.003	—	1.08	37.8	66.9	32	0	57	0.209	0.83	9.3	178	0 t

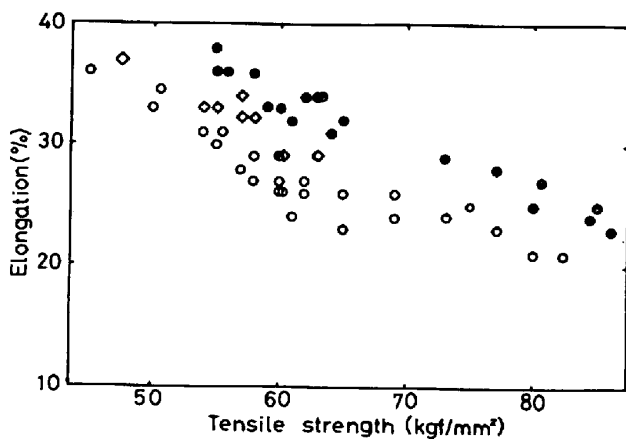
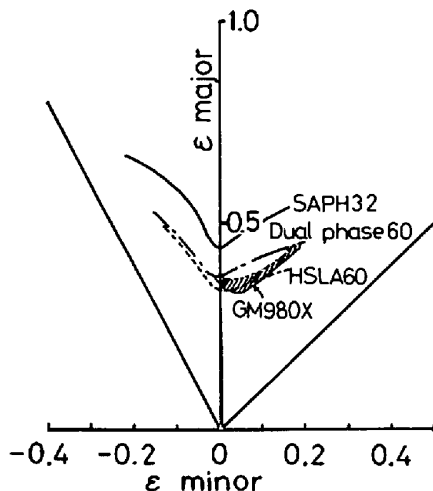


Fig. 11. Strength-ductility relationships for as-hot-rolled dual phase steels (●), solution strengthened steels (◇) and precipitation strengthened steels (○) (thickness: 2.9mm).

Fig. 12. Forming limit diagrams of 60kg/mm² grade hot rolled steel sheets.

強度と伸びの関係が異なるとされているが Fig. 11 の Si-Mn-Cr 混合組織鋼板の伸びは他の成分系に比べて高いといえる。

引張強さ 50~60 kgf/mm² 級熱延鋼板の化学成分と機械的性質の例を Table 1 に示す。降伏比 (降伏強度と

引張強さの比) は混合組織鋼板が一番低く、固溶強化鋼板、析出強化鋼板の順に高くなる。したがって加工硬化係数 (n 値)、伸びはこの順に低下している。JIS 5 号引張試験片の中央部両端に 2mmV の切り欠きを入れた試験片による切り欠き引張伸びは伸びフランジ性の指標となる¹⁵⁾が、混合組織鋼板の切り欠き引張伸びが高い。

5mmφ のグリッドマークを用いて求めた成形限界曲線を Fig. 12 に示す。図中の GM980X は Rashid によつて求められた混合組織鋼板の値¹⁶⁾である。60 kgf/mm² 級高張力鋼板の成形性は軟鋼板 (SAPH 32) に比べて劣るが、2軸張り出し成形においては混合組織鋼板 (Dual Phase 60) が析出強化鋼板 (HSLA 60) より優れている。

浅絞り成形において、スプリングバック量は降伏強度が低いほど小さいことは良く知られている。熱延鋼板で比較的多く用いられるハット型曲げ成形におけるスプリングバック量と材料特性値の関係を Fig. 13 に示す¹⁷⁾。ここでのスプリングバック量はダイ肩半径部の幅拡がり量を用いた。ダイ肩半径部の幅拡がり量は側壁のそりとポンチ底弾性回復に支配され、成形条件の影響が大きい。しかし材料特性値との関係では、低降伏強度の効果は減少するものの、わずかにスプリングバックには有利である。

60 kgf/mm² の高張力熱延鋼板の引張疲労試験結果を Fig. 14 に SAH 41 と比較して示す。高張力熱延鋼板の疲労限はいずれも SAPH 41 のそれより高い。疲労限を母板の引張強さとの比でみると、SAPH 41 で 63%、混合組織鋼板で 71%、析出強化鋼板 (HSLA) で 82% である。

4. 適用例

高張力熱延鋼板を実際にプレスした部品の例を Photo. 1 に示す。高張力熱延鋼板の特性は製造法により異なるので、部品に要求される性能に応じて使いわけの必

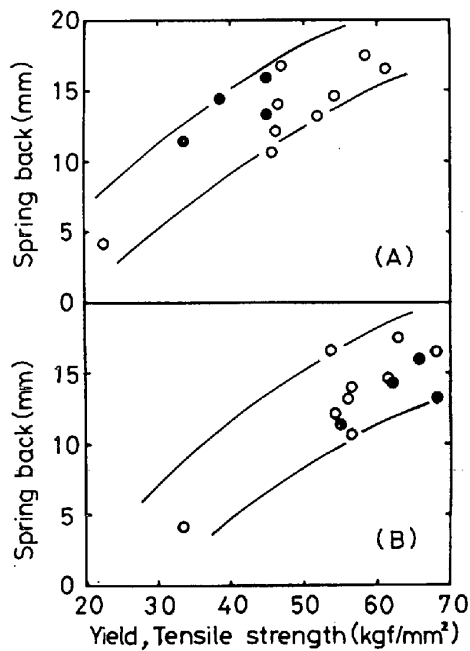


Fig. 13. Effect of yield (A), tensile strength (B) on spring back of hat type press.
● dual phase steel, ○ precipitation strengthened steel.

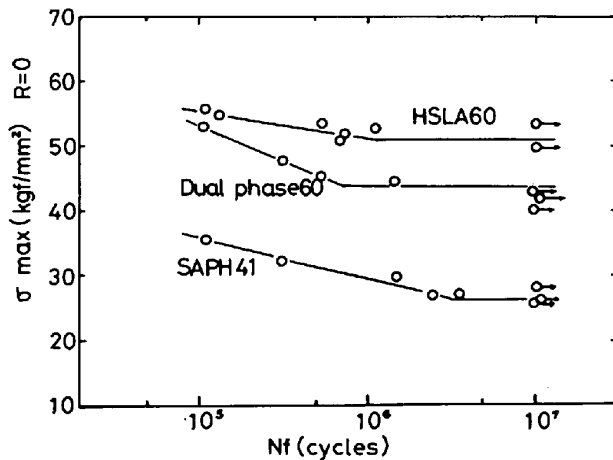


Fig. 14. Fatigue behavior of high strength hot rolled steel sheets for R=0.

要がある。写真のリヤアームなどは降伏比の低い混合組織鋼板が有利である。熱延鋼板の使用部品の中で代表的難成形部品であるスタイルド・ホイール・ディスクにも 60 kgf/mm² 級高張力鋼板がプレス可能で、混合組織鋼板がより容易に成形できる。高張力鋼板を用いたホイールの回転曲げモーメント試験の耐久寿命は、鋼板の疲労限に比例して増加することが確められており、ホイールの軽量化のために 60 kgf/mm² 級の高張力鋼板の試用が進められている。一方ホイール・リムにはフラッシュパット溶接後の成形のため、析出強化鋼板の使用が望ましい¹⁸⁾¹⁹⁾。

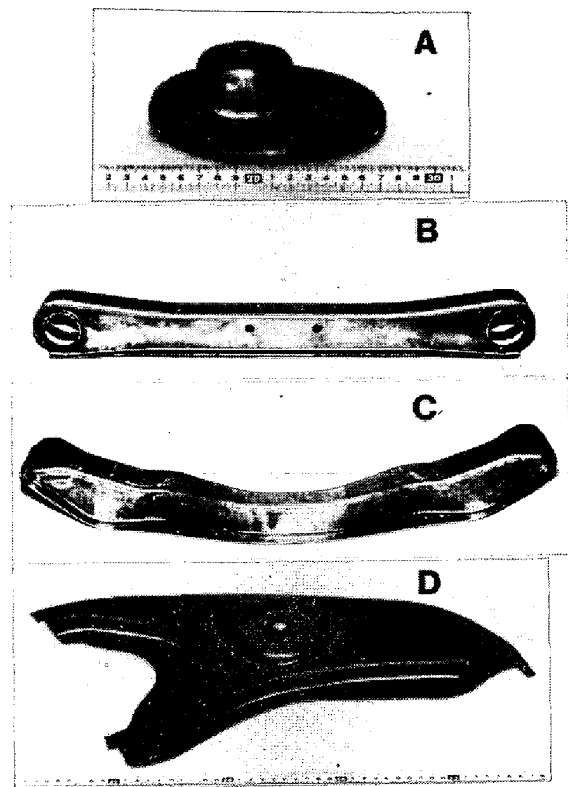


Photo. 1. Examples of automotive parts using high strength hot rolled steel sheets.
Seat upper front spring (A), lower link (B)-60 kgf/mm² grade precipitation strengthened steel sheet.
Member front suspension (C), rear arm (D)-60 kgf/mm² grade as hot rolled dual phase steel sheet.

高張力熱延鋼板は冷延鋼板に比べて低炭素当量で高強度が得られる。そのため溶接後の硬度上昇が少ないので溶接パイプに用いられる。このパイプは拡張性・曲げ性が良好なためオートバイのフレームなどに適用されている。

5. 結 論

各種の高張力熱延鋼板の製造上の問題点を簡単に述べるとともに、鋼板の特徴と応用例について紹介した。

そのほかスポット溶接性、溶接疲労については別稿²⁰⁾にゆずつた。

高張力熱延鋼板が、従来トラックのフレーム、メンバー類へ使用されてきたが、さらに車体重量の軽量化のために高強度化あるいはより成形の困難な部品への適用が進められるだろう。

文 献

- 1) 吉田清太: 鉄と鋼, 63 (1979), p. 1588
- 2) 新美 格: 日本金属学会報, 20 (1981), p. 678
- 3) 木村茂夫: 自動車技術, 35 (1981), p. 898
- 4) 魚里 進, 久松定興: 自動車技術, 34 (1980), p. 868

- 5) 高橋政司, 国重和俊, 岡本篤樹: 日本金属学会報 19 (1980), p. 10
- 6) 吉川 敬: 日本金属学会報, 19 (1980), p. 439
- 7) A. P. COLDREN and G. TITHER: J. Metals, 30 (1978) 4, p. 6
- 8) L. MEYER, G. ARNCKEN, F. HEISTERKAMP, B. PRETNER, G. STICH, and U. SCHRAPE: Thyssen Technisch Berichte, 8 (1976), p. 21
- 9) I. TAKAHASHI, T. KATO, T. TANAKA, and T. MORI: Toughness Characterization and Specifications for HSLA and Structural Steels, ed. by P. L. MANGONON, (1977) p. 308 [AIME]
- 10) 中島泰臣: 日本特許, 特公昭 50-35438
- 11) 橋口耕一, 西田 稔, 加藤俊之, 田中智夫: 川崎製鉄技報, 11 (1979), p. 68
- 12) T. KATO, K. HASHIGUCHI, I. TAKAHASHI, T. IRIE, and N. OHASHI: 110th AIME Annual Meeting "Symposium on Fundamentals of Dual-Phase Steels-II" (1981)
- 13) 青柳信男, 小川洋三, 滝沢昇一, 西田 稔, 間野純一, 加藤俊之: 鉄と鋼, 67 (1981), S 534
- 14) 山田信男, 三宅祐史, 滝沢昇一, 内田政雄, 青柳信男, 佐伯真事: 鉄と鋼, 67 (1981), S 953
- 15) 松藤和雄, 大沢紘一, 酒匂雅隆, 下村隆良, 由田征史: 塑性と加工, 21 (1980), p. 890
- 16) M. S. RASHID: Formable HSLA and Dual-Phase Steels, ed. by A. T. DAVENPORT, (1979), p. 1 [AIME]
- 17) 平田基博, 阿部英夫, 中川吉左衛門: 塑性加工春季講演会 (1981), p. 477
- 18) 橋本 弘, 篠崎正利, 加藤俊之, 入江敏夫: 鉄と鋼, 67 (1981), S 542
- 19) 篠崎正利, 橋本 弘, 加藤俊之, 入江敏夫: 鉄と鋼, 68 (1982) 9, p. 1340
- 20) 篠崎正利, 加藤俊之, 入江敏夫, 高橋 功: 鉄と鋼, 68 (1982) 9, p. 1444