

焼付硬化型冷延高強度鋼板の製造と応用

野村 伸吾*・宮原 征行*・柚島 善之*
 亀野 克己*・川本 国雄*・小久保一郎*²

Development and Application of Box-annealed Bake-hardenable Steel Sheets

Shingo NOMURA, Masayuki MIYAHARA, Yoshiyuki YUTORI,
 Katsumi KAMENO, Kunio KAWAMOTO, and Ichiro KOKUBO

Synopsis:

The effects of chemical compositions and processing factors on the bake-hardenability have been studied on the box-annealed rephosphorized steels and the steels strengthened by silicon and manganese. The effects of bake-hardening on the dent and crush resistance have been also studied.

Lowering carbon content, increasing hot coiling temperature, and increasing annealing temperature are shown to be effective for the improvement of bake-hardenability. Bake-hardenability also increases with increasing silicon and phosphorus contents and decreasing manganese content. The influence of these elements is diminished by lowering carbon contents.

In order to meet the demands of automobile manufacturers, bake-hardenable rephosphorized steel sheets are successfully produced on an industrial scale in Unitized Annealing Department.

Application of bake hardening is effective to improve dent and crush resistance. Dent resistance is more improved than crush resistance due to bake-hardening.

1. 緒 言

自動車車体の高強度化が進められてゆく中で、高強度化にともなう加工性の劣化を避けるために、加工の際には軟らかく加工後の塗装焼付処理によつて硬化する焼付硬化型鋼板が注目されるようになってきた。焼付硬化は170°C前後の塗装焼付処理時に鋼中に存在するCあるいはNが転位を固着することにより起こるもので、いわゆるひずみ時効現象である。したがつて鋼中に多量のC、Nを固溶させることにより容易に高い焼付硬化性が得られるが、その場合には常温時効が起りやすくなり機械的性質の劣化やストレッチャーストレインの発生が問題となる。特にNは平衡固溶量が大きいためにその害が著しい。それ故、常温時効性が小さく、かつ焼付硬化性のすぐれた鋼板を製造するには、Nを固定し、かつ固溶C量を適当な値にコントロールすることが必要になる。連続焼鈍法を用いれば、このような固溶C量のコントロールは比較的容易であるが、現状では連続焼鈍により高い r 値を得ることは必ずしも容易ではない。高 r 値を得るためには従来の箱焼鈍法が適しているが、この場合には徐冷であるため固溶Cが残りやすく、高い焼付硬化量は

得られない。

最近、P添加 Al キルド鋼にオープンコイル焼鈍を施すことにより高い焼付硬化性が得られることが報告されて以来¹⁾、箱焼鈍による焼付硬化型鋼板の実用化が進められ²⁾、高 Si、低 Mn、高 P ほど焼付硬化性が向上すること、 A_1 変態点以上の高温焼鈍を行うことやC量を0.005~0.02%程度に低減させることなどにより高い焼付硬化性が得られることが明らかにされている³⁾⁴⁾。焼付硬化は前述のように基本的にはひずみ時効現象であるので、その考え方は新しいものではなく、過去にも多くの報告はあるが⁵⁾、ひずみ時効を積極的に利用するという観点からみると必ずしも十分検討されているとはいえない。本報ではP添加 Al キルド鋼板および Si、Mn にて強化した高強度鋼板の焼付硬化性について調査した結果を述べ、さらに焼付硬化型鋼板の実ラインでの製造結果ならびにその利用技術についても報告する。

2. 実験方法

2.1 化学成分および製造条件

Table 1 に示すP添加 Al キルド鋼、高 Si 系鋼および高 Mn 系鋼を基本成分とし、C、Si、Mn、P 各元素を

昭和 55 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 56 年 10 月 23 日受付 (Received Oct. 23, 1981)

* (株)神戸製鋼所加古川製鉄所 (Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd., 1 Kanazawa-cho Kakogawa 675)

*² (株)神戸製鋼所加古川製鉄所 工博 (Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd.)

Table 1. Chemical compositions of base steels (wt%).

		C	Si	Mn	P	S	Al
AK	Al killed mild steel	0.04	0.02	0.20	0.009	0.003	0.053
Rephos.	Rephosphorized Al killed steel	0.04	0.02	0.25	0.080	0.003	0.050
High Si	High silicon steel	0.05	1.50	0.60	0.010	0.009	0.039
High Mn	High manganese steel	0.08	0.06	1.60	0.010	0.007	0.030

変化させた鋼を実験室で溶解し、供試鋼とした。熱間圧延では仕上げ圧延後、740°C および 520°C に保持した炉中に挿入し、30 min 保持後炉冷することで、それぞれ高温巻き取りおよび低温巻き取り相当の処理とした。2.8 mm の熱延板を酸洗後、0.8 mm の冷延板とした。再結晶焼鈍では UAD オープン焼鈍相当⁶⁾の加熱速度 (約 50°C/h)、冷却速度 (約 100°C/h) とし、均熱は 680°C~750°C×1~3 h 種々の条件で処理した。ついで伸び率 1% のスキンパス圧延を行った。焼付硬化量は JIS 5号試験片に 2% の引張歪みを与え、170°C×20 min の焼付相当処理後、再引張りを行って、焼付処理前後の降伏強度の増加量から求めた。

2.2 耐デント性および圧壊特性

焼付硬化が実際のプレス部品の耐デント性および圧壊特性におよぼす影響を明らかにするために、UAD 焼鈍設備により製造した種々の鋼板を用いて、実験室的に以下の調査を行った。

2.2.1 耐デント性試験

底部球面が 650 mm および 1500 mm の曲率半径をもつ 300 mm φ 円筒工具によりパネルの成形を行った。成形高さはパネル曲率半径に応じて 40 mm~70 mm に変化させ、たて壁部の高さをほぼ一定とした。パネルの降伏強度を直接測定することは困難であるため、パネル頂点の相当歪みを素材に単軸引張りで与え、そのときの変形応力をパネル降伏強度として求めた。

デント試験は定盤上に固定したパネル底部中央に先端半径 50 mm の圧子を介して種々荷重を負荷し、除荷後のくぼみ深さ (以後デント深さと呼ぶ) をダイヤルゲージで測定した。Fig. 6 に測定法を示す。

2.2.2 圧壊試験

自動車のメンバー類を想定した幅 50 mm、長さ 320 mm のチャンネル状部品をプレス成形し、スポット溶接により 2 種類の試験片を作成した。試験片および試験の概要は Fig. 8 および Fig. 10 中に図示した。チャンネルの成形高さは 20 mm~60 mm のものを使用した。耐デント性試験の場合と同様に、必要に応じて焼付相当の処理を実施した。

(1) 縦圧壊試験

高さ 40 mm および 60 mm に成形した 2 個のチャン

ネル状部品をスポット溶接した試験片に、軸方向より圧板を介して負荷を与え、変位量と荷重を測定した。縦圧壊試験では低速圧壊試験のみを行った。試験速度は 60 mm/min 一定とした。

(2) 横圧壊試験

チャンネル状部品を支点間距離 200 mm の治具上に設置し、低速圧壊試験では中央部に先端半径 25 mm、長さ 60 mm の圧子を介して横荷重を加え、荷重と圧子の変位量との関係を測定した。衝撃圧壊試験では低速の場合と同一の先端形状をもつおもりを種々の高さから落下させ、変位量を測定した。

3. 実験結果

3.1 化学成分、製造条件と焼付硬化性

Fig. 1 に Al キルド鋼の焼付硬化性におよぼす P の影響を示す。焼付硬化量 (BH) は焼鈍温度が高いほど、また巻き取り温度 (CT) が高いほど大きいが、いずれの場合にも P の増加とともに焼付硬化量が増加する。ただし P の影響は高温巻き取り材では小さい。Fig. 2 に高 Si 系鋼、高 Mn 系鋼についての結果を示す。この場合にも P 添加 Al キルド鋼の場合と同様 P の添加により焼付硬化量が増加する。なお Si 系高強度鋼は Mn 系鋼に比べて硬化量の絶対値は著しく高い。

Fig. 3 に P 添加 Al キルド鋼 (Rephos.) の焼付硬化性におよぼす C の影響を示す。低温巻き取り材では C 量依存性が大きく、C の低下により焼付硬化量は増加するが、焼鈍温度が高くなるとこの傾向は小さくなる。Fig. 3 には通常の Al キルド鋼板 (AK) についての C

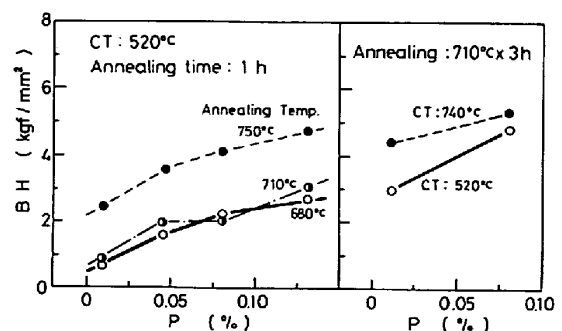


Fig. 1. Effect of phosphorus content on bake-hardenability. (Rephosphorized Al killed steels)

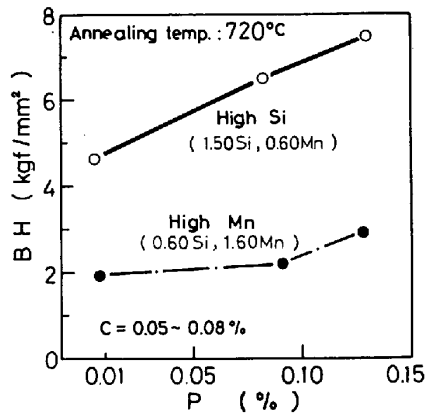


Fig. 2. Effect of phosphorus content on bake-hardenability. (High silicon and high manganese steels)

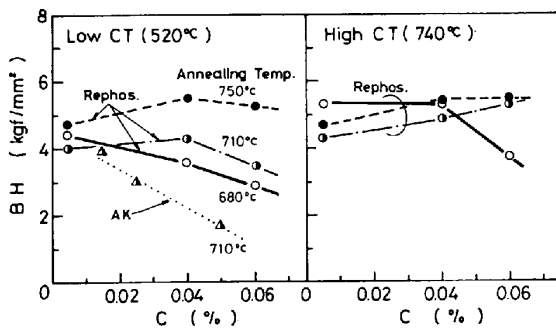


Fig. 3. Effect of carbon content on bake-hardenability. (Rephosphorized Al killed steels. P=0.080%)

の影響をも同時に示しているが、同一温度で比較するとCの影響はP添加Alキルド鋼の方が小さい。一方高温巻き取り材の場合には、このようなCの影響は認められず、どの場合にも高い焼付硬化性が得られている。

Photo. 1 に焼鈍板の光学顕微鏡組織を示す。極低炭材および高温巻き取り材ではいずれも炭化物の数が減少し、その分布間隔が大きくなっている。これまでも報告されているように²⁾焼付硬化性の向上は、焼鈍後の冷却時におけるCの析出サイトであるこれら炭化物の減少により残留固溶Cが増加したこと起因するものと考えられる。写真には示していないが、高温焼鈍の場合にも同様である。³⁾

Fig. 4 には Si 系あるいは Mn 系高強度鋼板の焼付硬化性におよぼすCの影響を示す。この場合にもCの低下とともに焼付硬化量は増加するが、その程度はMn系鋼の方が大きい。したがって極低炭材になるとSi系とMn系の焼付硬化量の差は著しく小さくなる。Pを添加したSiおよびMn系鋼についても同様であるが、この場合にはPの焼付硬化性向上効果がSi系鋼の、しかもCの多い場合に大きいため、Si系鋼ではCの影響が認められなくなっている。

以上のようにSi, Mn, Pなどの影響はCの多い場合すなわちCが炭化物として多量に存在する場合に大きくあらわれている。このことはこれらの元素は炭化物の存在状態に影響を与え、これを通じて固溶C量を変化させる効果が大きいことを示唆しているものと考えられる。

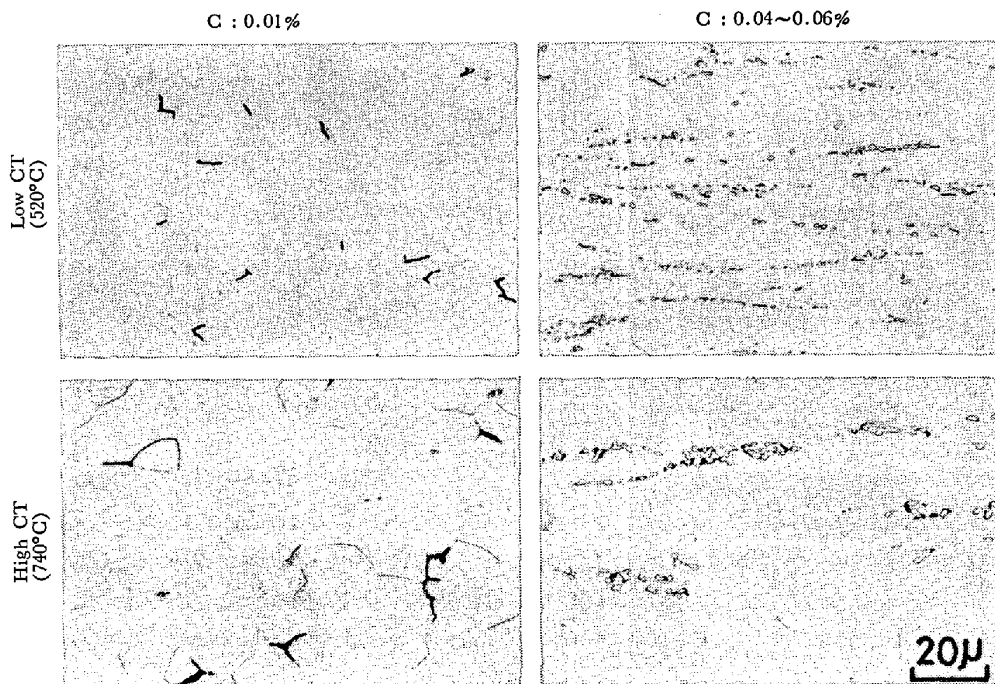


Photo. 1. Effects of carbon content and hot coiling temperature on microstructure of rephosphorized Al killed steels.

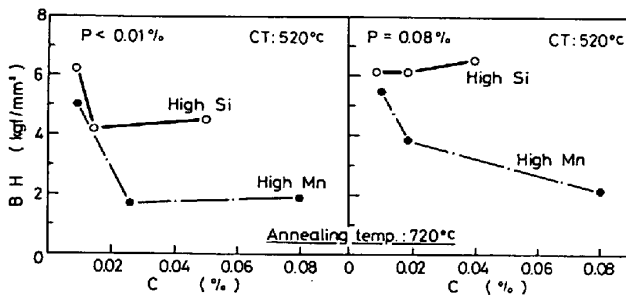


Fig. 4. Effect of carbon content on bake-hardening. (High silicon and high manganese steels)

Fig. 1 で高温巻き取りにより炭化物を十分粗大化させてしまうと P の影響は小さくなるが、この現象も上記のように考えることにより説明できる。

3.2 UAD 焼鈍による製造結果

UAD 焼鈍設備を用いて、P 添加 Al キルド鋼板の製造を行った。上に述べたように、焼付硬化性を高めるにはいくつかの方法があるが、ここでは特に極低炭にはせず、熱延低温巻き取りでオープンコイル高温焼鈍による方法を採用した。冷却速度の速いオープンコイル焼鈍ではタイトコイル焼鈍に比べて約 1~2 kgf/mm² 高い焼付硬化量が得られる。

UAD 焼鈍設備⁶⁾ は、特にオープンコイル焼鈍を効率よく実施するために開発されたもので、従来の多段積みペル型焼鈍炉とは異なり、インナーカバーをもたない一段積みの大径コイル焼鈍であることが大きい特色である。したがって高温焼鈍においてもコイル内の温度が均一に保持され、かつエッジの損傷が少ない。また大型クーラーを内蔵しているため、冷却速度が比較的速く、種々の点で焼付硬化型鋼板の製造に適している。

Fig. 5 にオープンコイル焼鈍により得られた焼付硬化型 P 添加 Al キルド鋼板の特性例を示す。UAD 焼鈍の特徴を反映して、コイル全長にわたって 4~6 kgf/mm² の均一で高い焼付硬化性が得られている。

3.3 焼付硬化の応用

自動車々体部品に要求される諸特性の中で高強度鋼板の使用により、その向上が期待でき、薄肉化に寄与できるものは耐デント性、大変形衝撃強度および耐久強度であると言われている⁷⁾。その中で焼付硬化による特性向上が期待されるものは耐デント性および大変形衝撃強度であると考えられる。これらの特性におよぼす焼付硬化の影響についてはいくつかの報告があるが⁷⁾⁸⁾、焼付硬化の効果を使用鋼板の薄肉化との関連で調査したものは少ない。ここでは引張強さ 35 kgf/mm² 級の焼付硬化型 P 添加 Al キルド鋼を用いて耐デント性と圧壊特性におよ

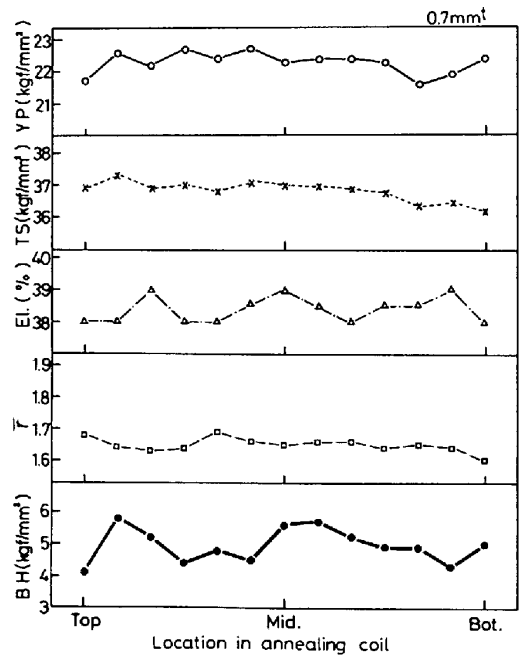
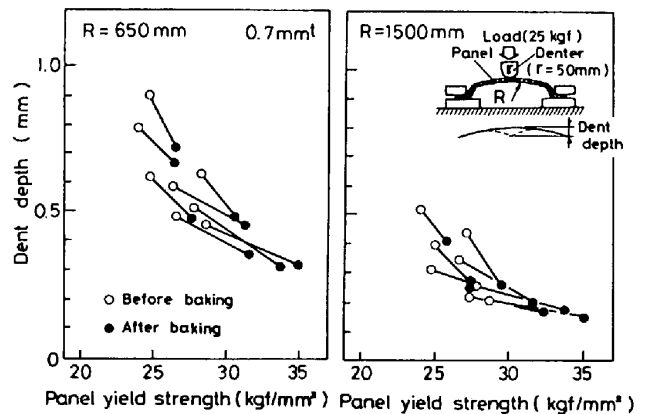


Fig. 5. Typical example of mechanical properties of bake-hardenable rephosphorized steel sheet produced by UAD.



* Uniaxial flow stress at an equivalent strain that corresponds to that of a panel top.

Fig. 6. Relationship between panel yield strength* and dent depth.

ぼす焼付硬化の影響を調査し、その効果を薄肉化の可能性と関連づけて評価した。

3.3.1 耐デント性

前述の UAD 焼鈍設備により製造した P 量の異なる数種の焼付硬化型 P 添加 Al キルド鋼板を用いて、耐デント性におよぼす焼付硬化の効果进行调查した。25 kgf 負荷後のデント深さとパネル降伏強度との関係を Fig. 6 に示す。焼付硬化によるパネル降伏強度の増加により、デント深さが減少し、耐デント性が向上することがわかる。この場合には負荷荷重が大きく、デントはかなり進行しているが、実際の自動車外板パネルではむしろデン

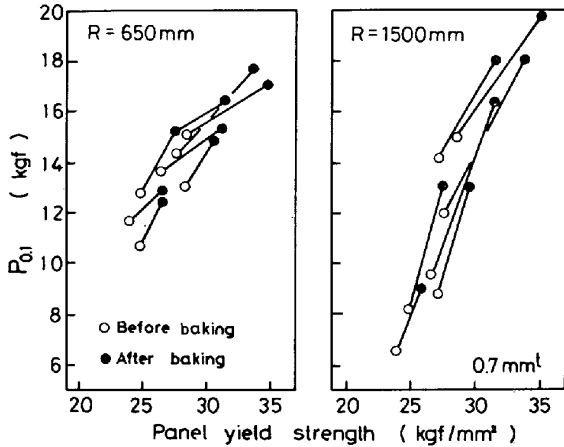


Fig. 7. Relationship between panel yield strength and load required to form a dent 0.1 mm deep.

トの開始荷重が問題になる。実験の精度上、デント開始荷重を正確に求めるのは困難なため、これに近いものとして、微小デントすなわち 0.1 mm デント生成荷重 ($P_{0.1}$) を測定した。結果を Fig. 7 に示す。 $P_{0.1}$ はパネル降伏強度に対しほぼ直線的に増加しており、焼付硬化によるパネル降伏強度の増加が耐デント性の改善に有効なことがわかる。焼付硬化によるパネル降伏点の増分に対する $P_{0.1}$ の増分はパネルの形状によつて異なっており、パネルの曲率半径の大きい場合に大きくなっている。

3.3.2 圧壊特性

低速縦圧壊試験における荷重-変位曲線の例を Fig. 8 に示す。荷重は最初大きいピークを示したのち低下するが、焼付硬化により、このピーク荷重 (P_0) が増加する。ピーク以降の曲線の形状は圧壊途中の座屈状態により変化するが、全体的には焼付硬化により荷重が増加している。ここでは低速圧壊特性をピーク荷重により評価した。Fig. 9 に成形高さ 40 mm の場合について P_0 と素板降伏強度あるいは板厚との関係を示す。ここで用いた圧壊試験片では、鋼板の大部分は試験片作製時に歪みをほとんど受けていないので、素板の降伏強度で整理した。 P_0 は降伏強度の増加とともに増加している。降伏強度が素材成分によつて変化した場合も焼付硬化で変化した場合もともに同一線上を P_0 が変化する。板厚の影響度合は降伏強度の影響に比べると著しく大きい。

Fig. 10 に低速横圧壊試験における成形高さ 20 mm および 60 mm の場合の荷重-変位曲線を示す。この場合には縦圧壊の場合のピーク荷重に相当するものとして急激に塑性変形が開始する点の荷重 (P_0) を採用した。成形高さ 20 mm の場合と 60 mm の場合とで曲線の形が異なっているが、これはこの両者で圧壊による変形の様

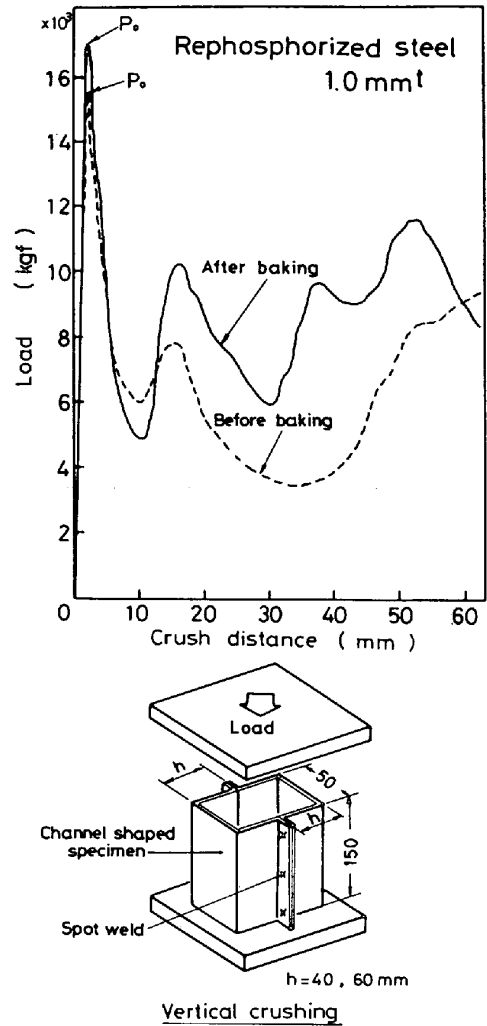


Fig. 8. Examples of load-crush distance curve in low speed crushing test. (Vertical crushing)

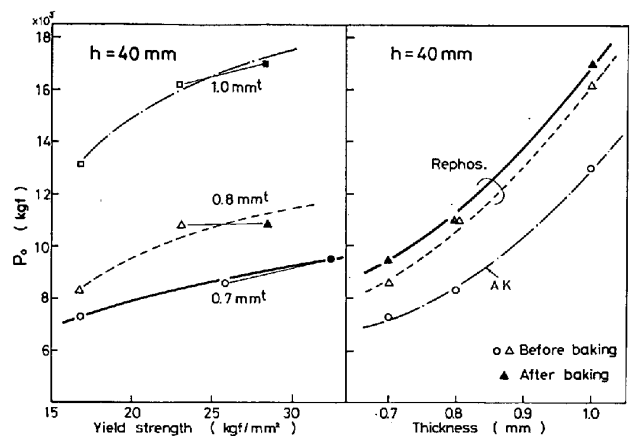


Fig. 9. Effects of yield strength and sheet thickness on crushing load (P_0) in slow speed test. (Vertical crushing)

子が異なることに起因している。すなわち、成形高さ 20 mm のチャンネルの場合には圧壊変形の初期から座屈により部品がV字状に折れ込むのに対し、60 mm の場合に

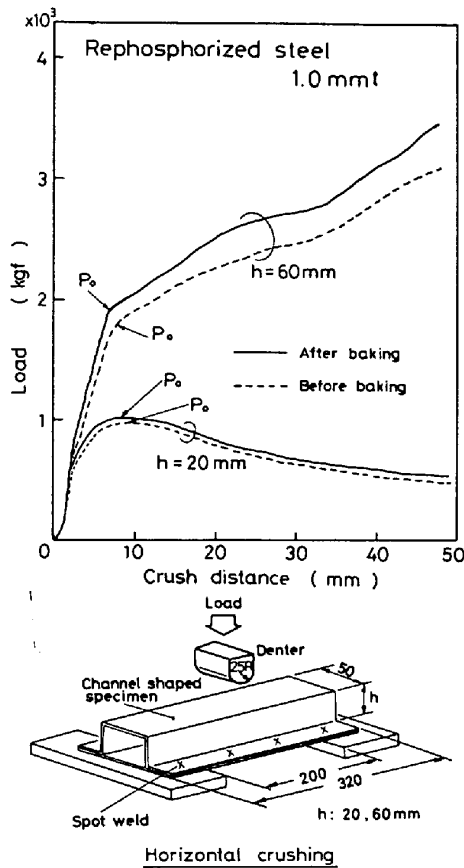


Fig. 10. Examples of load-crush distance curve in slow speed crushing test. (Horizontal crushing)

は初期には圧子のくい込みによる変形が大きく、後期には壁の座屈と座面の引張曲げが混在して複雑な変形となっている。したがって 20 mm の場合には荷重がピークを示したのち低下するが、60 mm の場合には変形の後期まで増加を続ける。Fig. 11 に P_0 と素板降伏強度および板厚との関係を示す。この場合にも縦圧壊の場合と同様焼付硬化の効果が認められるが、その程度は板厚の影響割合に比べると小さい。

Fig. 12(a) に衝撃横圧壊試験におけるエネルギーと変位量との関係を示す。エネルギー量としては本来は部品に吸収されたエネルギー量を採るべきであるが、本実験ではおもりのはねかえり量はわずかであったので、ほぼ与えたエネルギーが全て吸収されたものと考え、おもりの重量と落下高さから計算により求めた。Fig. 12(b) には Fig. 12(a) から変位量が 20 mm になるエネルギー量 (E_{20}) を求め、板厚で整理して示した。低速圧壊試験の場合と同様焼付硬化の効果が明らかに認められる。

以上、耐デント性および圧壊特性におよぼす焼付硬化および板厚の影響について述べた。実用的見地からみれば、焼付硬化の効果は、それによつて補い得る板厚減少の程度によつて評価するのが最も良さそうである。そこ

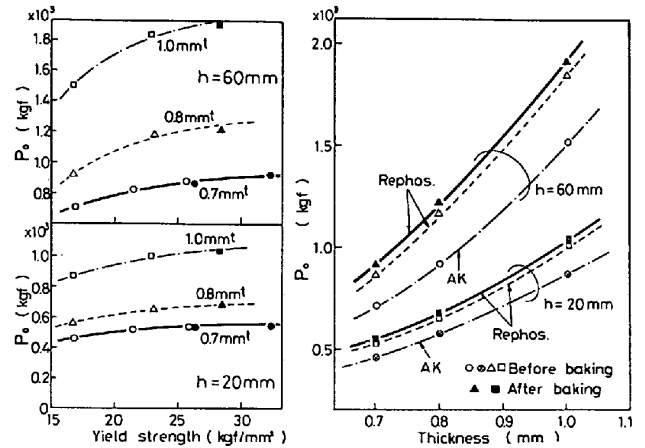


Fig. 11. Effects of yield strength and sheet thickness on crushing load (P_0) in slow speed crushing test. (Horizontal crushing)

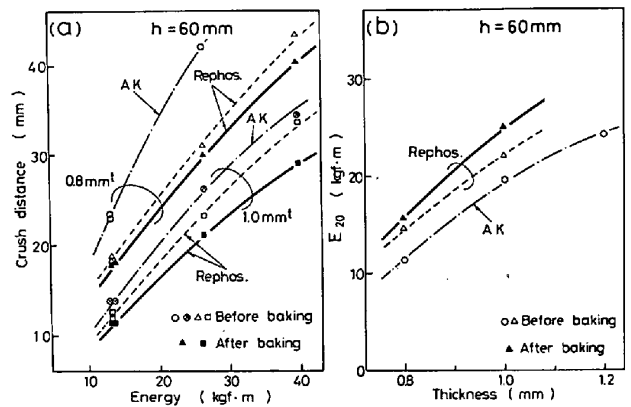


Fig. 12. Effect of sheet thickness on energy required to obtain a crush distance of 20 mm in horizontal impact test.

で上述の結果から板厚 (t) および降伏強度 (σ) の寄与を $t^2\sigma^m$ と仮定して⁷⁾、焼付硬化による耐デント性 ($P_{0.1}$)、低速圧壊特性 (P_0) および衝撃圧壊特性 (E_{20}) などの向上効果を板厚に換算して求めた。静的デント特性におよぼす板厚の影響は本実験では調査していないが、これについては同じパネルについての結果がすでに報告されているため⁹⁾ それらのデータを用いて計算した。なお、実用的な見地から、デント特性に関しては板厚 0.8 mm の、また圧壊特性に関しては 1.0 mm の Al キルド鋼を基準とし、それと同じ特性を得るために必要な板厚を計算した。結果を Table 2 に示す。焼付硬化の効果は静的耐デント性において最も大きくあらわれており、圧壊特性に対する効果はそれに比べると小さいことがわかる。

Table 2. Experimental estimation of sheet thickness required to obtain the same dent and crush resistance as those of mild steel panels.

		thickness (mm)					
		Static dent resistance ($P_{0.1}$)	Static crush resistance (P_0)				Dynamic crush resistance (E_{20})
			Vertical		Horizontal		
		$R = 650, 1500$	$h = 40$	$h = 60$	$h = 20$	$h = 60$	Horizontal $h = 60$
Al killed mild steel YP : 17kgf/mm ² , TS : 31kgf/mm ²		0.80	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Rephosphorized Al killed steel Y P : 23 kgf/mm ² T S : 38 kgf/mm ² B H : 5 kgf/mm ²	Without baking	0.74	0.875	0.84	0.93	0.90	0.915
	After baking	0.68	0.85	0.815	0.91	0.88	0.87
	Δt_{BH}	0.06	0.025	0.025	0.02	0.02	0.045

Δt_{BH} : Thickness reduction achieved by bake-hardening.

4. 結 言

箱焼鈍法による焼付硬化型鋼板の製造方法ならびにその応用に関する検討を行い、下記の結果を得た。

(1) 焼付硬化性の向上にはC量の低減、巻き取り温度の上昇および焼鈍温度の上昇が効果的である。高い焼付硬化量を得るためのC量の下限値は本実験では明確でないが0.004%C程度でも高い焼付硬化量が得られた。

また、PおよびSiは焼付硬化量を増加させ、Mnは逆に低下させる。これらの元素の影響はC量を低減させることにより小さくなる。

(2) UAD 焼鈍設備を用いて、オープンコイル焼鈍により引張強さ 35 kgf/mm² 焼付硬化型高強度鋼板を製造した結果、4~6 kgf/mm² の均一で高い焼付硬化性が得られた。

(3) 上記 35 kgf/mm² 級高強度鋼板を用いて耐デント性ならびに圧壊特性におよぼす焼付硬化および板厚の

影響を調査し、焼付硬化の効果をそれにより達成され得る薄肉化の程度で評価した。圧壊特性に対する焼付硬化の効果に比べると耐デント性に対する効果が大きい。

文 献

- 1) 佐藤益弘, 野村伸吾, 郡田和彦, 星野矩之, 宮原征行, 川本国雄: 鉄と鋼, 65 (1979), S 320
- 2) 高橋政司, 岡本篤樹: 鉄と鋼, 66 (1980), S 367
- 3) 坂元祥郎, 西田 稔, 田中智夫, 平瀬幸一: 鉄と鋼, 66 (1980), S 1122
- 4) 松藤和夫: 第 74・75 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1981), p. 95
- 5) 例えば, 添野 浩: 塑性と加工, 11 (1970), p. 367
- 6) 松永寿男, 平野 坦, 佐藤益弘, 小久保一郎, 片井協一, 郡田和彦: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 126
- 7) 塩川昌男, 古林 忠: 鉄と鋼, 66 (1980), A 189
- 8) 例えば, 塩川昌男, 古林 忠, 納所 宏, 山崎勝二郎, 田中敏夫, 福田水穂: 日産技報, 16 (1980), p. 59
- 9) 柚鳥善之, 野村伸吾, 小久保一郎, 石垣秀生: 塑性と加工, 21 (1980), p. 168