

TRIP型複合組織鋼の伸びフランジ性に及ぼす 温間加工の影響

長坂 明彦*・杉本 公一*²・小林 光征*²・橋本 俊一*³

Effects of Warm Forming on Stretch-flangeability of a TRIP-aided Dual-phase Sheet Steel

Akihiko NAGASAKA, Koh-ichi SUGIMOTO, Mitsuyuki KOBAYASHI and Shun-ichi HASHIMOTO

Synopsis : To improve the stretch-flangeability of a high strength TRIP-aided dual-phase (TDP) sheet steel, the effects of forming temperature, forming rate and clearance on the stretch-flangeability were investigated. Warm hole-punching at 150-200°C and successive warm hole-expanding at about 150°C increased considerably the stretch-flangeability. The warm hole-punching minimized void initiation at matrix/second phase interface, work hardening and a depth of damage layer at hole surface by suppressing the strain-induced transformation in an early stage. Also, it increased the volume fraction of untransformed retained austenite, which contributes to large stretch-flangeability. The warm hole-expanding improved the localized ductility due to the transformation induced plasticity. When a clearance between punch and die was about 10%, the largest stretch-flangeability was obtained with the minimum surface damage on hole-punching. Punching rate influenced hardly upon the stretch-flangeability, although it did somewhat on surface damage.

Key words : stretch-flangeability ; warm forming ; retained austenite ; stability ; transformation-induced plasticity ; strain-induced transformation ; high strength steel.

1. 緒言

乗用車の衝撃安全性および軽量化を目的として開発された高強度鋼板の中で、残留オーステナイト(γ_R)の変態誘起塑性(TRIP)¹⁾を有効に利用したTRIP型複合組織鋼板²⁻⁹⁾(TDP鋼板)はとくに優れた深絞り性^{7,9)}と張出し性^{6,8)}を有する。現在、軽量化効果の最も期待できる足回り部品への適用研究が積極的に行われているが、伸びフランジ性が低いという報告が多く^{10,11)}、その改善が求められている。

一般に高強度複合組織鋼ではフェライト(α_f)+ベイナイト(α_b)複合組織鋼および $\alpha_f + \alpha_b + \alpha_m$ マルテンサイト(α_m)複合組織鋼の伸びフランジ性がとくに優れている¹⁰⁾。TDP鋼の組織($\alpha_f + \alpha_b + \gamma_R$)は、これらの鋼に類似するにもかかわらずその伸びフランジ性が $\alpha_f + \alpha_m$ 複合組織鋼と同程度に低い理由は、ひずみ誘起変態(SIT)により生じた α_m が高炭素濃度を有するため極めて硬く、 α_f 母相との界面でポイドが形成されやすいためであると考えられている^{10,11)}。 γ_R のひずみ誘起変態およびそれによるTRIP効果はとくに加工温度によって制御できるので、伸び³⁻⁵⁾および張出し性⁸⁾と同様に、TDP鋼の伸びフランジ性も温間加工によって改善できると予想される。

このような観点より、本研究ではTDP鋼の伸びフランジ

性に及ぼす温間加工の効果を、パンチ打抜き穴損傷特性(加工変質層深さ、 γ_R の変態量、ポイド発生状況)および穴広げ特性(穴広げ率、加工荷重)の両面より詳細に調査した。また、加工速度およびクリアランスの影響も同時に調査した。さらに、これらの結果を γ_R のSIT挙動から考察した。

2. 実験方法

供試鋼には0.20C-1.50Si-1.50Mn-0.015P-0.0012S-0.041Al, mass%の化学組成を有する真空溶製された厚さ30mmのスラブを用いた。これをまず、1200°Cで均質化処理後、4パスで3.2mmまで熱間圧延を行った。最終圧延温度は800°Cである。冷却速度100°C/s、500°Cで1h保持後炉冷し、酸洗後、室温で1.2mmまで冷間圧延を行った後、以下の熱処理を施した。すなわち、780°Cで1200sの2相域焼なまし後、400°Cの塩浴中に急冷、その温度で1000s保持後油冷のオーステンパ処理を施し、 $\alpha_f + \alpha_b + \gamma_R$ 3相組織を有するTDP鋼とした。以下では、 $\alpha_b + \gamma_R$ 相を第2相と呼ぶ。

引張試験には、圧延方向に平行に作製したJIS13B号引張試験片(幅12.5mm, 標点間距離50mm)を用い、インストロン型万能試験機により行った。試験片の加熱には、一對のプレート状ストリップヒーターを用い、試験前の保持時間

平成8年11月25日受付 平成9年3月7日受理 (Received on Nov. 25, 1996; Accepted on Mar. 7, 1997)

* 長野工業高等専門学校機械工学科 (Department of Mechanical Engineering, Nagano National College of Technology, 716 Tokuma Nagano 381)

* 2 信州大学工学部 (Faculty of Engineering, Shinshu University)

* 3 (株)神戸製鋼所鉄鋼事業本部 (Iron and Steel Division, Kobe Steel, Ltd.)

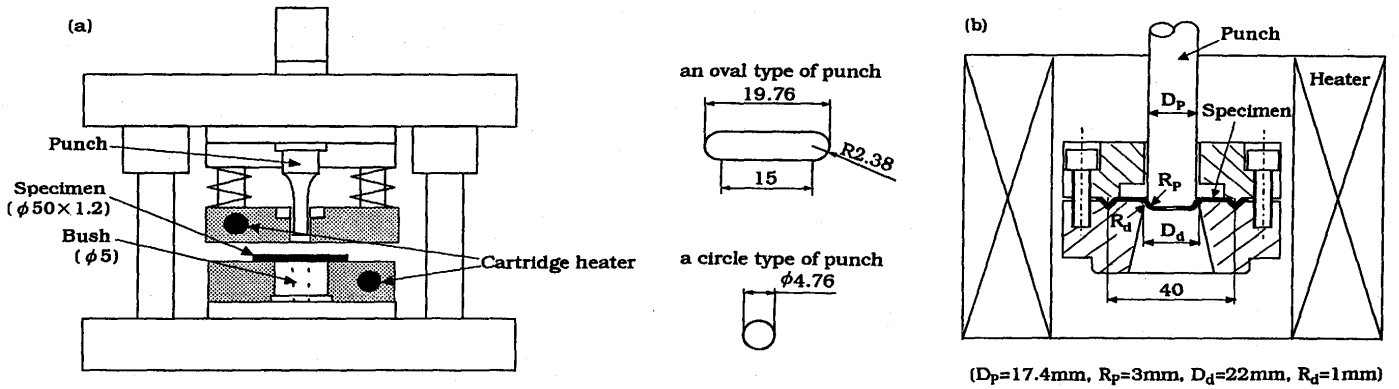


Fig. 1. Experimental apparatus for (a) warm hole-punching and (b) warm hole-expanding.

は30minとした。試験温度は20~250°Cの範囲、クロスヘッド速度は1 mm/minとした。

打抜きおよび穴広げ試験には、直径50mm、板厚1.2mmの円盤状小型試験片を用いた。試験装置には、Fig. 1の装置を用いた。いずれの試験にも、グラファイト系潤滑剤を使用した。打抜き加工において、打抜き温度は $T_p=20\sim 250^\circ\text{C}$ の範囲、打抜き速度は $V_p=1, 10, 100\text{mm/min}$ の3条件、クリアランスは $c=5\sim 30\%$ の範囲とした。試験片の加熱は、ストリッププレートとダイプレートに差込んだカートリッジヒーターにより行った。打抜き金型のブッシュ径は5.0mm一定のダイ基準とし、パンチ直径を4.88, 4.76, 4.52, 4.28 mmの4種類とした。

穴広げ試験では穴広げ加工温度のみを $T_e=20\sim 250^\circ\text{C}$ に変化させ、穴広げ速度は $V_e=1\text{mm/min}$ とした。試験片の加熱は環状炉によって行い、打抜き穴のダレ部をパンチ側とした。なお、両試験温度は試験片表面温度を意味する。

伸びフランジ性は次式の穴広げ率 λ で評価した。

$$\lambda = (d_t - d_0) / d_0 \times 100\% \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 d_0, d_t はそれぞれ初期穴径、き裂発生時の穴径である。

λ には打抜き時の表面損傷が重要な役割を演ずる。このため、打抜き穴表面層の γ_R 量変化、硬さ変化およびポイドの発生状況を詳細に調査した。 γ_R 量の測定精度を高くするため、Fig. 1 (a)の長円形パンチで打抜いた直線状の表面(せん断部、破断部)において、 γ_R の変態量を測定した。すなわち、電解研磨法により表面を順次除去し、X線回折法(5ピーク法¹²⁾)により γ_R 量を順次測定した。さらに、SEM観察およびマイクロビッカース硬さ測定も必要に応じ行った。

3. 実験結果および考察

3・1 微細組織と引張特性

Fig. 2にTDP鋼の微細組織を示す。本鋼では26.1vol%の第2相($\alpha_b + \gamma_R$)が α_f 粒界に沿って存在する。 γ_R は α_b と隣接または孤立して粒子状に存在し、その体積率 f_{γ_0} ¹²⁾は7.9vol%

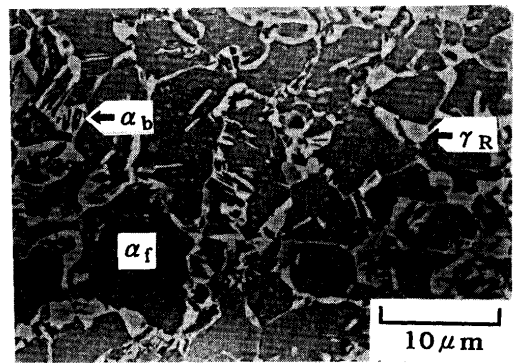


Fig. 2. Scanning electron micrograph of as-aus-tempered TDP steel, in which " α_f ", " α_b " and " γ_R " represent ferrite matrix, bainite island and retained austenite particle, respectively.

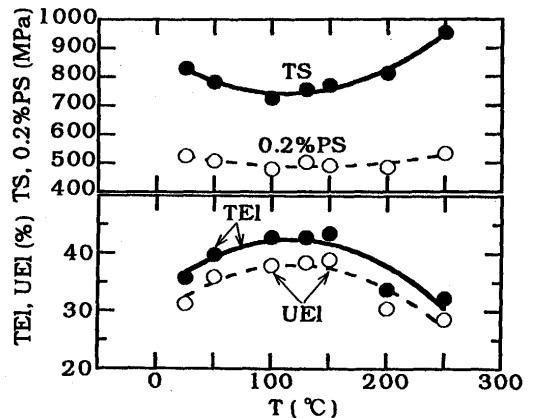


Fig. 3. Variations in 0.2% offset proof stress (0.2% PS), tensile strength (TS), total elongation (TEI) and uniform elongation (UEI) with testing temperature (T).

炭素濃度 C_{70} ⁴⁾は1.38mass%である。この C_{70} から γ_R の M_s 点は -37°C と計算される⁴⁾。

Fig. 3にTDP鋼の引張特性の変形温度依存性を示す。変形温度(T)が 20°C において、TDP鋼は831MPaの引張強さ(TS)と約36%の大きな全伸び(TEI)を有する。変形温度が高くなるにつれて全伸びは大きくなり、変形温度が $100\sim 150^\circ\text{C}$ の範囲で最大となる。引張強さはこれと逆の変形温度依存

性を示し、この温度範囲でほぼ最小となる。このような引張特性の変形温度依存性は安定な γ_R を含むTDP鋼に特有の現象であり、他の複合組織鋼には現れない⁸⁾。

一般に、 M_s 点以上の温度範囲では、TDP鋼の γ_R 量 f_γ はひずみ ϵ とともに(2)式にしたがって減少する³⁾。

$$\log f_\gamma = \log f_{\gamma 0} - k \cdot \epsilon \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで $f_{\gamma 0}$ は初期 γ_R 量である。 k はひずみ誘起変態定数で、その値は γ_R のひずみ誘起変態が抑制されるほど小さくなる。引張変形下において、 k 値の加工温度依存性を調査したところ、Fig. 4のように、 $T_s = 100 \sim 150^\circ\text{C}$ で k 値の最小値 k_{\min} が得られ、この温度は TEI が最大となる温度(Fig. 3)とほぼ一致した。したがって、 $100 \sim 150^\circ\text{C}$ においては、 γ_R のひずみ誘起変態がくびれが生ずる高ひずみ域で効果的に起こり、これによるひずみ硬化率の増加および母相/第2相界面でのポイドの発生・成長が抑制されることにより、 TEI が著しく改善されたと考えることができる³⁻⁵⁾。同時に生ずる低い TS は、硬い α_m 相が低ひずみ域でわずかしこ生じなかった(α_m 硬化が小さかった)ためと考えられる。なお、準安定オーステナイト鋼ではひずみ誘起変態は M_s 点と M_d 点の間の温度範囲で起こり、高温ほどひずみ誘起マルテンサイト変態(SIMT)は抑制される¹³⁾。TDP鋼では M_d 点以下の 200°C 以上でひずみ誘起ベイナイト変態(SIBT)を生ずるため³⁾、これと異なる現象が生じたものである。

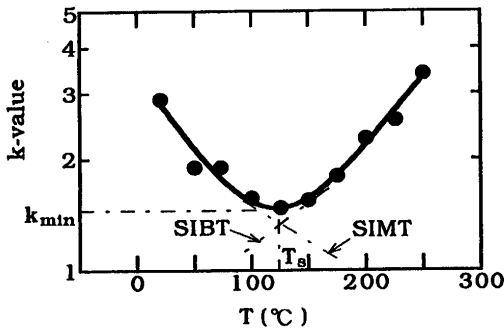


Fig. 4. Variation in k -value in tension with testing temperature (T), in which "SIMT" and "SIBT" represent strain-induced martensite and bainite transformations, respectively.

3・2 打抜き特性に及ぼす打抜き温度の影響

Fig. 5に、TDP鋼板を種々の加工温度 T_p で打抜き加工したときの(a)打抜きせん断応力 τ_p 、(b)加工変質層深さ l^* および(c)最大平均硬さ \overline{HV}_{\max} を示す。ここで、 \overline{HV}_{\max} は打抜き表面から $50\mu\text{m}$ 内部をマイクロビッカース硬さ試験機(荷重 0.245N)にて測定した。 l^* はFig. 6 (a)のように、 γ_R 量の変化が認められなくなる臨界深さである。参考のため、Fig. 6中には、ドリル切削穴の l^* も示す。これらの図から、以下のことがわかる。

(1) τ_p は加工温度が $100 \sim 150^\circ\text{C}$ まで低下し、一旦一定となるが、 TS (Fig. 3)と異なりそれ以上の温度でさらに低下する。

(2) l^* は $150 \sim 200^\circ\text{C}$ で最小となる。 l^* に及ぼす加工温度の影響は大きく、 20°C と $150 \sim 200^\circ\text{C}$ では l^* の値は3~4倍違う。 l^* の値は $150 \sim 200^\circ\text{C}$ 打抜きでは、クリアランス幅(0.12mm)の値まで低下する。しかし、切削加工のときの l^* (0.028mm)

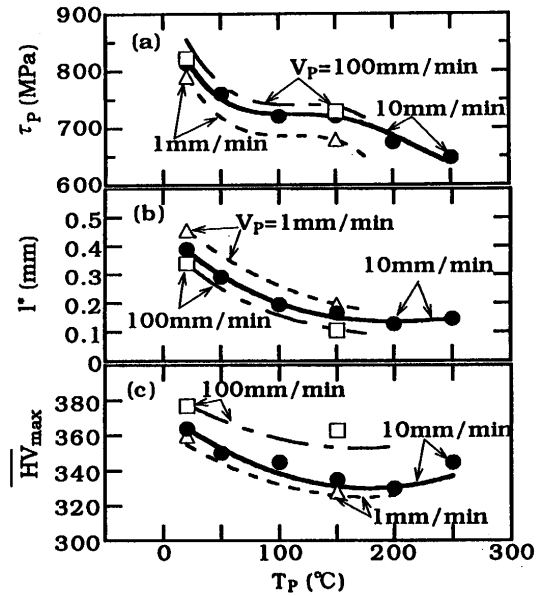


Fig. 5. Variations in (a) punching shear stress (τ_p), (b) critical damage depth (l^*) and (c) maximum mean hardness (\overline{HV}_{\max}) in hole-surface layer of TDP steel with punching temperature (T_p) and punching speed (V_p) under $c = 10\%$.

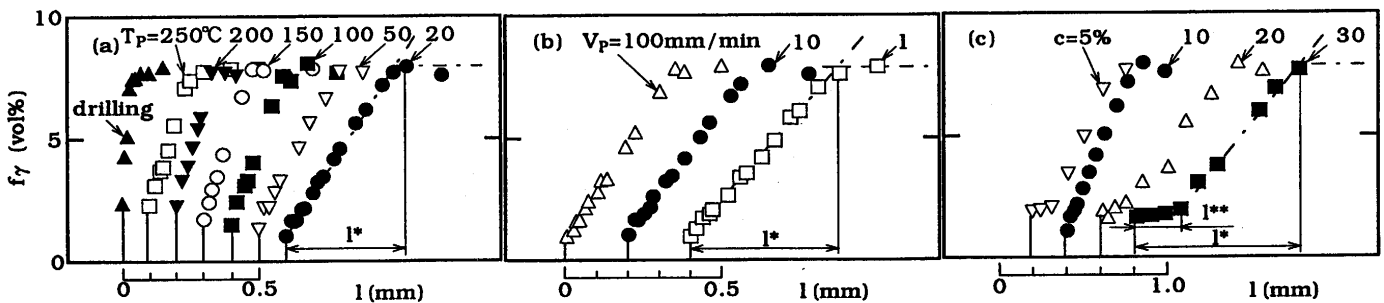


Fig. 6. Depth distribution of γ_R content in a hole surface layer punched (a) at various temperatures between 20 and 250°C ($c = 10\%$, $V_p = 10\text{mm/min}$), (b) at various punching speed ($T_p = 20^\circ\text{C}$, $c = 10\%$) or (c) at various clearance ($T_p = 20^\circ\text{C}$, $V_p = 10\text{mm/min}$), in which l^* represents critical depth of damage layer. Drilling is conducted at 20°C .

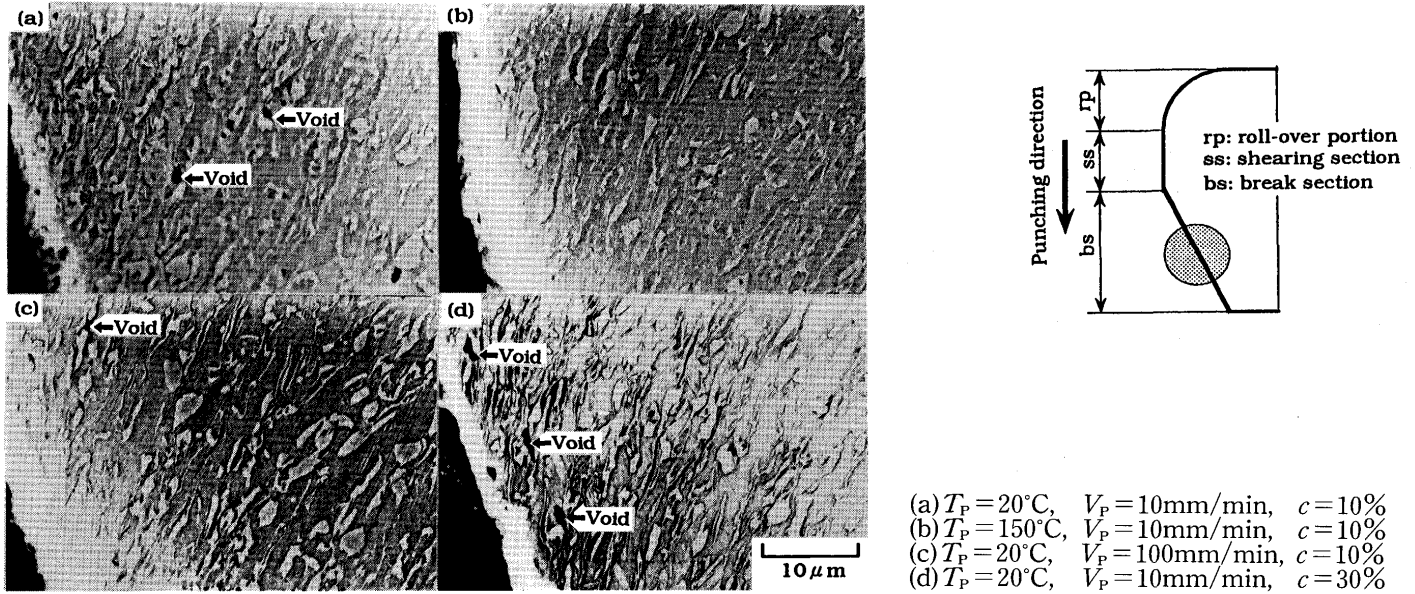


Fig. 7. Scanning electron micrographs showing cross section of hole surface in TDP steels punched under various conditions.

よりはかなり大きい。

(3) \overline{HV}_{\max} は $150\sim 200^\circ\text{C}$ で最小となる。打抜き温度にともなう \overline{HV}_{\max} の変化量は小さいが、これは打抜き時のせん断ひずみが大きいこと、表面の未変態 γ_R 量の差が小さくなった (Fig. 6 (a)) ことによると予想される。

このような l^* と \overline{HV}_{\max} の打抜き温度依存性は後述の穴広げ率の打抜き温度依存性とほぼ一致するので、次に述べるボイドの発生頻度とともに、表面損傷を小さくすることが穴広げ率の改善につながると考えてよいであろう。

Fig. 7 に、TDP鋼を 20°C または 150°C で打抜き加工したときの打抜き穴表面加工層断面のSEM写真を示す ($c = 10\%$, $V_P = 10\text{mm/min}$)。いずれの加工温度でも、致命的な大きなボイドは観察されず、 $1\mu\text{m}$ 以下のごく小さいボイドのみしか発生していない。ただし、打抜き温度が 150°C ではボイドの数および大きさが減少していることが認められる。この事実は、TDP鋼では打抜き時にボイドが発生しやすいという一般的な予想と大きく異なる。 150°C 打抜きでボイドの数、大きさが減少した理由として、単軸引張りの場合⁴⁾と同様に、ボイドの発生源つまり応力集中源となる硬質の α_m が生じにくいこと、および高ひずみ域でのSITが局所的応力集中を緩和するためであると考えられる。また、これらの鋼では、明瞭な塑性流動も起きていることが観察される。この塑性流動は穴広げ時に主き裂の進展を妨害し、穴広げ率を高める効果が期待できるが、穴広げ率に対しどの程度貢献するかを評価することは難しい。

本鋼では打抜き温度が $150\sim 200^\circ\text{C}$ の範囲で、 l^* と \overline{HV}_{\max} が小さく、未変態 γ_R 量が多くなった。このような表面損傷は γ_R のひずみ誘起変態が最も抑制される温度 (k 値が最小となる温度 T_S) と一致すると予想されたが、実際にはその T_S より 50°C 程度高い温度で得られた。Fig. 5 から、 τ_P は T_S に相当

する $100\sim 150^\circ\text{C}$ まで一旦低下するが、それ以上の温度でさらに低下している。 τ_P の低下はひずみ誘起変態の抑制 (未変態 γ_R 量を増加) と、これに関する加工硬化の抑制を意味する。これが、打抜き損傷の最適加工温度を高温側にずらせた主な原因と考えられる。 τ_P が 200°C 以上の打抜き温度で低下した原因については現在検討中である。なお、せん断変形では平均垂直応力 σ_m は 0 となり、単軸引張変形時より小さくなるため、これは逆に T_S を低下させる (約 15°C)⁸⁾。また、加工速度が大きくなること (加工発熱が大きくなること) は k 値を低めるが k_{\min} が現れる温度 T_S を変化させない³⁾。

3.3 穴広げ特性に及ぼす打抜き時のクリアランスと打抜き速度の影響

Fig. 8 に、TDP鋼板をクリアランス c を種々変えて 20°C で打抜き加工したときの (a) 打抜きせん断応力 τ_P および (b) 加工変質層深さ l^* と最大平均硬さ \overline{HV}_{\max} を示す。 l^* はクリアランスの増加に伴い増加するが、 $c = 5\%$ ではかえって l^* が増加するため、 $c = 10\%$ で最小となる。 $c = 5\%$ の大きい l^* 値は 2 次せん断面の発生などにより、Fig. 6 (c) にみるように、 γ_R のSITが異常に生ずる領域 l^{**} が現れたことによると考えられる。 \overline{HV}_{\max} も $c = 10\%$ で最小となるが、 150°C 打抜きでは $c = 20\%$ においても $c = 10\%$ の場合と同様の低い \overline{HV}_{\max} を示す。

クリアランスを変化させた場合の打抜き穴表面の断面を観察したところ、クリアランスが大きくなるにしたがって、塑性流動が不明瞭となる傾向が認められた。しかし、ボイドの大きさ、数などの差ははっきりしなかった。

Fig. 9 に、穴広げ率に及ぼすクリアランスの影響を示す。 20°C での打抜き加工とそれに続く穴広げ加工では l に及ぼすクリアランスの影響は小さいが、 150°C での打抜き-穴広げ加工では顕著に現れる。このときの最適クリアランスは 20°C

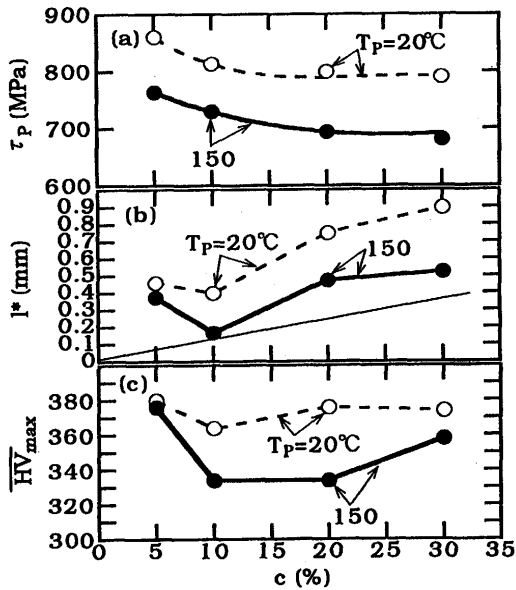


Fig. 8. Effect of clearance on (a) punching shear stress (τ_p), (b) critical damage depth (l^*) and (c) maximum mean hardness (HV_{max}) in hole-surface layer of TDP steels punched at $T_p = 20^\circ\text{C}$ or at 150°C . A straight line in (b) represents a product of clearance and thickness of TDP steel.

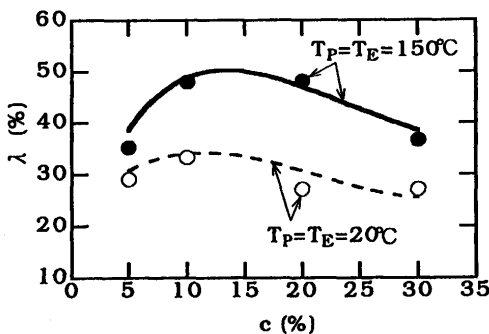


Fig. 9. Effect of clearance (c) on hole-expanding ratio (λ) of TDP steel. ($V_p = 10\text{mm/min}$, $V_e = 1\text{mm/min}$)

および 150°C 加工でそれぞれ $c = 10\%$, $10 \sim 20\%$ となり, 打抜き損傷が最小となるクリアランスと一致する。

打抜き特性に及ぼす加工速度の影響をFig. 5, 6 (b)に示す。これらの図から, 高速打抜き加工は打抜き穴表面層の l^* を小さくするが, HV_{max} を高めることが認められる。 l^* の低下は多分, 断熱発熱により γ_R のSITが抑制され, 未変態 γ_R 量が増加し, かつポイドの発生が抑制された金属学的要因と, 高速せん断により塑性変形域が狭くなる力学的要因¹⁴⁾から生じたものと考えられる。

加工速度が大きい場合についても表面加工層断面を観察したが, 加工速度が 10mm/min 以上では, 塑性流動がより明瞭に現れるとともに, ポイドの大きさ, 数も減少することが認められた(Fig. 7 (c))。

穴広げ率に及ぼす打抜き速度 V_p の影響も調査したが, 明

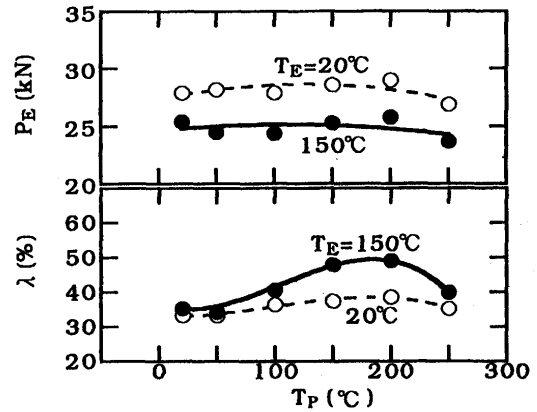


Fig. 10. Effect of punching temperature (T_p) on maximum hole-expanding load (P_E) and hole-expanding ratio (λ) of TDP steel, in which T_E represents hole-expanding temperature. ($V_p = 10\text{mm/min}$, $V_e = 1\text{mm/min}$)

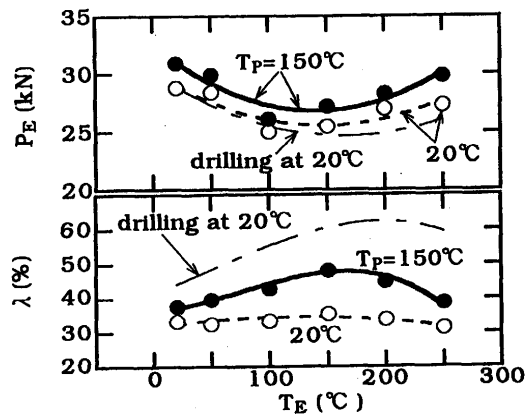


Fig. 11. Effects of punching temperature (T_p) and expanding temperature (T_E) on maximum hole-expanding load (P_E) and hole-expanding ratio (λ) of TDP steel. ($V_p = 10\text{mm/min}$, $V_e = 1\text{mm/min}$)

瞭な V_p 依存性は認められなかった。高速打抜きは λ の増加に貢献しなかったが, これは高速打抜きでは HV_{max} の増加が大きく, これが l^* を低下させた効果を打ち消したものと考えている。

3・4 穴広げ特性に及ぼす打抜き温度と穴広げ温度の影響

穴広げ率 λ および最大穴広げ荷重 P_E に及ぼす打抜き温度および穴広げ温度の影響をそれぞれFig. 10, 11に示す($c = 10\%$, $V_p = 10\text{mm/min}$)。これらの図から以下のことがわかる。

(1) $150 \sim 200^\circ\text{C}$ の温間打抜きと約 150°C の温間穴広げの併用により λ 値は著しく改善される。片方のみの温間加工は効果が小さい。

(2) λ の打抜き温度依存性(Fig. 10)はFig. 5の l^* , HV_{max} の打抜き温度依存性とほぼ一致する。これは, λ の最適打抜き温度は打抜き表面損傷を最小とする温度であることを意味する。

(3) 温間併用加工時の λ 値は切削穴の室温穴広げ加工時

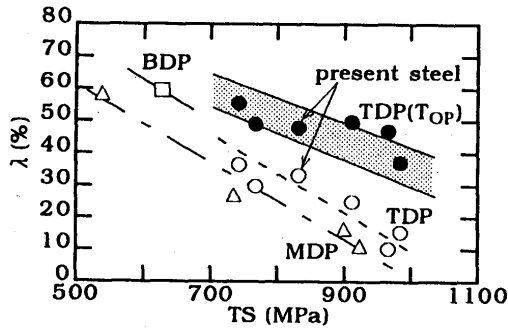


Fig. 12. Comparison of hole-expanding ratio (λ) of TDP, BDP ($\alpha_f + \alpha_b$) and MDP ($\alpha_f + \alpha_m$) steels formed at 20°C (open marks) or at optimum forming temperature (T_{OP} , solid marks) as a function of TS.

の λ 値とほぼ同等レベルまで改善される。

λ に対する最適穴広げ加工温度は TEI と同様に、 k 値が最小となる温度 T_s とほぼ一致する (Fig. 4)。したがって、応力状態の相違を別にすれば、穴広げ率 λ の温間加工による改善も TEI と同様な考え方が適用できるであろう。すなわち、 γ_R のひずみ誘起変態が高ひずみ域で効果的に起こり、これによる延性の増加と応力集中の緩和¹⁴⁾が母相/第2相界面でのポイドの成長を抑制する。ただし、打抜き穴表面層においてすでかなりの加工硬化とポイドの発生が生じている場合 (20°C打抜きの場合)は γ_R のひずみ誘起変態の効果は小さく、また穴広げ温度依存性も小さくなる。

一般に、 λ は局部伸び (LEI) と相関があり、局部伸びが大きいほど増加する¹⁵⁾。しかし、本TDP鋼は局部伸びが極めて小さい特異な材料であり、 λ に対しては一様伸び (UEI) または全伸びとの相関が大きいと考えられる。

著者らが本TDP鋼と同一の条件で別に行った $\alpha_f + \alpha_b$ 複合組織鋼 (BDP鋼) および $\alpha_f + \alpha_m$ 複合組織鋼 (MDP鋼) の λ 値との比較をFig.12¹⁶⁾に示す。図中には、Si, Mn添加量の異なる0.2C-Si-MnTDP鋼の結果も示す。図より、TDP鋼の20°C加工の穴広げ率は従来の報告^{10,11)}のように、MDP鋼より少し優れている程度であるが、温間打抜き加工と温間穴広げ加工の併用により、最適加工温度 T_{OP} での値はBDP鋼に匹敵するまでに改善されることがわかる。つまり、本TDP鋼は本質的には伸びフランジ性に優れた鋼であることがわかる。

4. 結言

TDP鋼の伸びフランジ性に及ぼす打抜き時および穴広げ時の加工温度、加工速度、クリアランスの影響を詳細に調査した。主な結果は以下の通りである。

(1) TDP鋼の穴広げ率は150~200°Cの温間打抜きと約150°Cの温間穴広げの併用により著しく改善された。このときの打抜き加工時の最適クリアランスは約10~20%であり、打抜き加工速度の影響は小さかった。

(2) 温間加工により得られるTDP鋼の穴広げ率は、BDP鋼に匹敵、もしくはこれを上回った。この事実には、本質的にはTDP鋼は張出し性、深絞り性ととも伸びフランジ性にも優れた高強度鋼板であることを示唆している。

(3) 温間打抜きは γ_R のSITを抑制し、打抜き穴表面層の加工硬化およびポイドの発生頻度を小さくする。また、TRIPによる変形能の増加により、明瞭な塑性流動を生じさせる。

(4) 温間穴広げは効果的なTRIPにより高ひずみ域でのひずみ硬化の低下を抑制するとともに、ポイドの成長を抑制する。

文 献

- 1) V.F.Zackay, E.R.Parker, D.Fahr and R.Busch: Trans.ASM, 60 (1967), 252.
- 2) O.Matsumura, Y.Sakuma and H.Takechi: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 27 (1987), 570.
- 3) K.Sugimoto, M.Kobayashi and S.Hashimoto: Metall.Trans., 23A (1992), 3085.
- 4) K.Sugimoto, N.Usui, M.Kobayashi and S.Hashimoto: ISIJ Int., 32 (1992), 1311.
- 5) K.Sugimoto, M.Misu, M.Kobayashi and H.Shirasawa: ISIJ Int., 33 (1993), 775.
- 6) O.Matsumura, Y.Sakuma, Y.Ishii and J.Zhao: ISIJ Int., 32 (1992), 1110.
- 7) 樋渡俊二, 高橋 学, 片山知久, 白田松男: 塑性と加工, 35 (1994), 1109.
- 8) K.Sugimoto, M.Kobayashi A.Nagasaka and S.Hashimoto: ISIJ Int., 35 (1995), 1407.
- 9) 松村 理, 大上哲朗, 雨池龍男: 鉄と鋼, 79 (1993), 209.
- 10) 三村和弘, 宮原征行, 白沢秀則, 横井利雄, 柴田善一, 井上尚和: 材料とプロセス, 5 (1992), 1859.
- 11) 広瀬洋三, 中居修二, 福山東成, 須藤誠一, 上野行一: 塑性と加工, 35 (1994), 1071.
- 12) 円山 弘: 熱処理, 17 (1977), 198.
- 13) I.Tamura, T.Maki and H.Hato: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 10 (1970), 163.
- 14) 中川威雄, 阿部邦雄, 林 豊: 薄板のプレス加工, 実教出版, (1985), 47.
- 15) 浅野裕秀, 潮田浩作, 石井良男: 材料とプロセス, 7 (1994), 1688.
- 16) A.Nagasaka, K.Sugimoto and M.Kobayashi: Proc. of Int. Conf. on HSLA Steels '95, ed. by L.Guoxun et al., Beijing, China, (1995), 520.