

変態誘起塑性型高強度複合組織鋼板の 温間穴抜き成形性*

長坂 明彦**・杉本 公一***・小林 光征***
(平成6年10月31日 受理)

Warm Stretch-Flangeability of High-Strength TRIP-Aided Dual-Phase Steel Sheets

Akihiko NAGASAKA, Koh'ichi SUGIMOTO and Mitsuyuki KOBAYASHI

The effects of warm hole-punching and warm hole-expanding on stretch-flangeability of a TRIP-aided dual-phase (TDP) steel sheet were investigated. Excellent stretch-flangeability, whose value nearly corresponded to that of drilling hole, was performed by warm hole-punching and hole-expanding at about 150 °C. The warm punching decreased strain-induced martensite content and/or void initiation at the martensite/matrix interface in a layer region of the hole surface. The minimum depth of the damage layer reduced up to a clearance between punch and die.

1. 緒 言

自動車の足回り部品の薄肉軽量化を目的として、残留オーステナイト（以後 γ と略す）の変態誘起塑性（Transformation Induced Plasticity: TRIP⁽¹⁾）効果を利用した高成形性高強度複合組織鋼⁽²⁾⁻⁽⁷⁾（以後TDP鋼と略す）の適用研究が積極的に進められている。この鋼は他の高強度鋼に比較して良好な深絞り性⁽⁶⁾および張り出し性⁽⁷⁾を有するが、穴抜き性は比較的⁽⁸⁾、大幅な改善が求められている。

一般に、TDP鋼の残留 γ のMs点は室温以下にあるため、室温以上の温間加工温度域ではそのひずみ誘起変態は抑制される。Sugimoto⁽³⁾⁻⁽⁵⁾、⁽⁷⁾らはこれを利用してTDP鋼の伸び⁽³⁾⁻⁽⁵⁾および張り出し性⁽⁷⁾を飛躍的に改善させた。本研究では、同様に温間加工によりTDP鋼の穴抜き性（穴抜き率、最大張出し高さ、穴抜き最大荷重）の改善することを目的として、打ち抜き穴の温間穴抜き性を実験的に検討した。また、穴抜き性の温度依存性を説明するために、ポンチ打ち抜き穴特性（加工変質層深さ、残留 γ の変態量、ポイドの有無など）に対する加工条件（温度、速度、クリアランス）について詳細に調査した。

*平成6年10月5日日本機械学会第2回機械材料・材料加工技術講演会にて発表

** 機械工学科 助手

*** 信州大学工学部

2. 実験方法

供試鋼には真空溶製された0.20C-1.50Si-1.50Mn(mass%)800MPa級冷延TDP鋼板(板厚1.2mm)を用いた。5%硝酸アルコールでフェライト粒界を腐食した組織の顕微鏡写真を図1に示す。図中の α はフェライト母相を示す。残留 γ の体積率 f_γ 、炭素濃度 C_γ はそれぞれ10.8vol%, 1.36mass%である。この他、比較鋼として、市販の800MPa級のフェライト・マルテンサイト複合組織鋼(以後DP鋼と略す、0.20C-0.25Si-1.70Mn(mass%))も用いた。

引張り、打ち抜きおよび穴抜き試験にはインストロン型引張試験機を用いた。引張試験片はJIS-13B号、打ち抜きおよび穴抜き試験片は50mm×47mmの短冊状試験片とした。

引張試験は、20~250℃の温度範囲、クロスヘッド速度1mm/min一定で行った。試験片の加熱には、一対のプレート状スリップヒーターを使用し、温度制御した。

ポンチ打ち抜き穴加工にはダイセットを用い、打ち抜き温度 $T_p=20\sim 250^\circ\text{C}$ の範囲、打ち抜き速度 $V_p=1, 10, 100\text{mm/min}$ の3条件で行った。試験片の加熱には、ストリッパプレートとダイプレートにカートリッジヒーターを差し入れ、温度制御した。ポンチには直径5mmの円形断面(穴抜き試験用)および幅5mm、長さ20mmの小判型断面(表面加工層調査用)の2種類のポンチを用いた(図2)。ポンチとダイのクリアランス c は板厚の5, 10, 20, 30%とした。比較のため、切削による穴加工も行った。

穴抜き試験には張出し試験機⁽⁷⁾(図3; 直径 $D_p=17.4\text{mm}$ 、肩曲率半径 $R_p=3\text{mm}$ の平底円筒ポンチ)を用い、試験治具全体を環状炉に入れ、穴抜き速度 $V_F=1\text{mm/min}$ 、穴抜き温度 $T_F=20, 150^\circ\text{C}$ の2温度で行った。潤滑剤にはグラファ

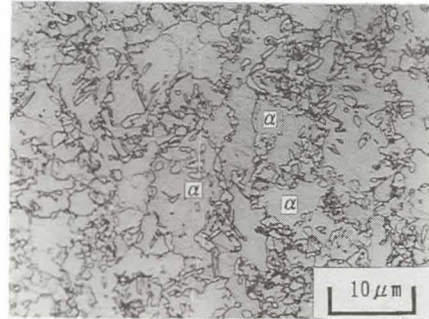


図1 TDP鋼の顕微鏡写真

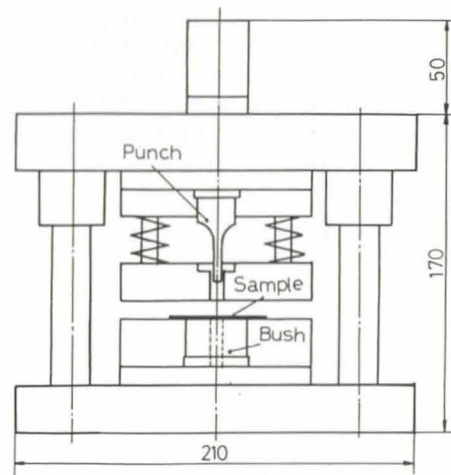


図2 打ち抜き用ダイセット

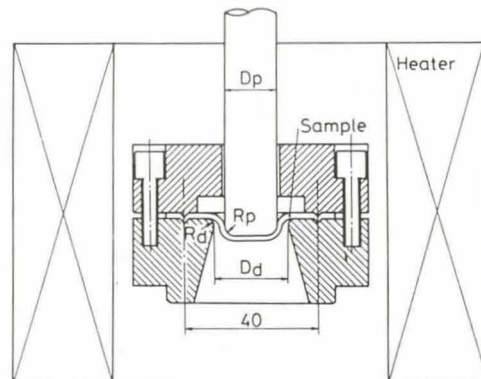


図3 穴抜き金型と加熱炉

ト系を使用し、穴抜き率 λ は次式により初期穴径 d_0 とき裂発生時の穴径 d_f より算出した。

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

ポンチ打ち抜き穴の表面加工層特性は、小判型打ち抜き穴の直線部において、表面層を電解研磨により、順次除去し、表面および表面層のボイドの発生状況の観察および表面層から内部方向への残留 γ 量の変化を調査した。残留 γ 量はX線回折法(5ピーク法⁽⁹⁾)を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 引張特性と残留 γ の安定性

図4に、TDP鋼の降伏応力(YS)、引張強さ(TS)、全伸び(TEI)、一様伸び(UEI)の試験温度依存性を示す。

TDP鋼では30%以上の高い全伸びを示す。全伸びの温度依存性は顕著に現われ、全伸びは100~150℃でほぼ最大となる。変形強度はこれと逆の温度依存性を示す。比較材のDP鋼の全伸びは10%程度で、その温度依存性は小さい。引張強さは約800MPaである。なお、TDP鋼はDP鋼に比べ、局部伸び(TEI-UEI)が大きい特徴を有する。

一般に、TDP鋼の残留 γ 量 f_γ は引張ひずみ ϵ の増加に伴い減少し、両者は次式で関係づけられることが見出されている⁽³⁾。

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

ここで、 $f_{\gamma 0}$ は初期残留 γ 量で、 k 値はひずみ誘起変態因子で、その値が小さいほど残留 γ のひずみ誘起変態が抑制され、安定であることを意味する。図5に引張変形下で測定した k 値の引張温度依存性を示す。ここで、 k 値は破断材の一様変形部の残留 γ 量とそのひずみを用いて求めた。残留 γ の安定性は約150℃で高く、それ以下でも、それ以上でも不安定となる。これは杉本ら⁽³⁾の報告と同様な結果である。

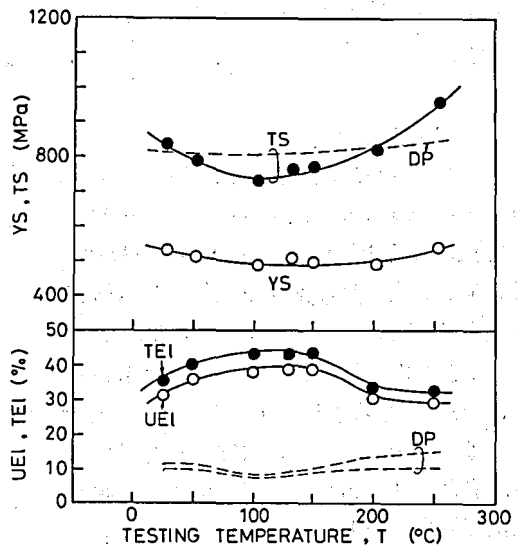


図4 引張特性の引張温度依存性

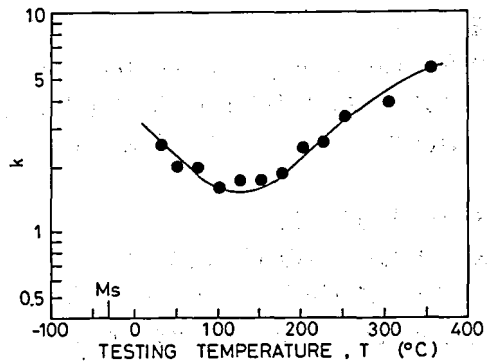


図5 k値の引張温度依存性

3.2 穴抜き成形性

3.2.1 穴抜きの荷重-変位曲線

図6に穴抜き試験の荷重-変位曲線を示す。打ち抜き加工温度 T_p が高く、穴抜き温度 T_f が高いほど傾きは小さくなる。これに対して、張り出し高さは大きくなる傾向が認められる。切削穴では、曲線の傾きは小さくなる。これは後述するように、切削穴の加工変質層が極めて小さいことに起因する。DP鋼ではこのような加工温度の影響はほとんど認められない。図7に、穴抜き加工品の一例を示す($c=10\%$, $T_p=T_f=150^\circ\text{C}$)。

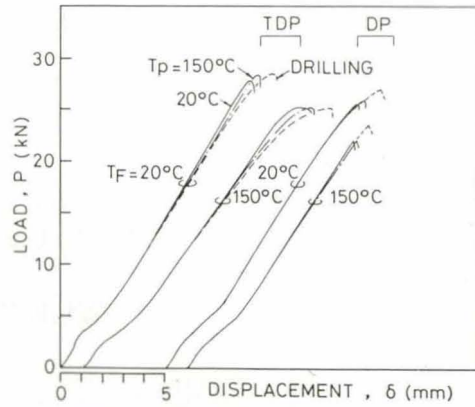


図6 穴抜き試験の荷重-変位曲線

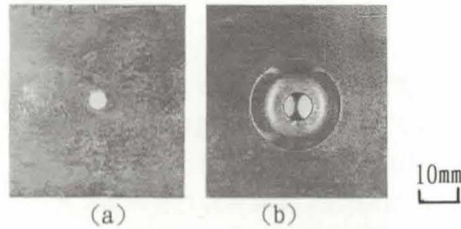


図7 TDP鋼の穴抜き加工品の概観

(a) 穴抜き成形前($d_0=4.76\text{mm}$)

(b) 穴抜き成形後($d_f=7.05\text{mm}$, $\lambda=48.1\%$)

3.2.2 穴抜き特性

$T_p=20\sim 250^\circ\text{C}$ の温度範囲で打ち抜き加工後($V_p=10\text{mm/min}$, $c=10\%$), $T_f=20$ または 150°C で穴抜き加工したときの穴抜き率 λ , 最大張り出し高さ H_{max} および穴抜き最大荷重 P_F を図8に示す。 150°C 付近の温間打ち抜きおよび温間穴抜きにより、穴抜き率が約50%と著しく改善され、切削穴(20°C 穴抜き)の場合と同等レベルの穴抜き性が得られる。また、加工荷重はかなり低下し、最大張り出し高さも最も高い。切削穴に対する打ち抜き穴の穴抜き率の低下は、従来のDP鋼より小さく、残留 γ は打ち抜き穴加工時に発生するボイドを抑制することが示唆される。

図9に $T_p=T_f=20, 150^\circ\text{C}$ での穴抜き率へのクリアランスの影響を示す。 $T_p=T_f=150^\circ\text{C}$ において、 $c=10$ または 20% で最大となる。

3.3 打ち抜き穴特性

3.3.1 打ち抜き穴のSEM写真

$T_p=20$ および 150°C でポンチ打ち抜きした穴の表面において、ボイド発生頻度の大きな相違は特に認められない。 $T_p=20$ と 150°C ,

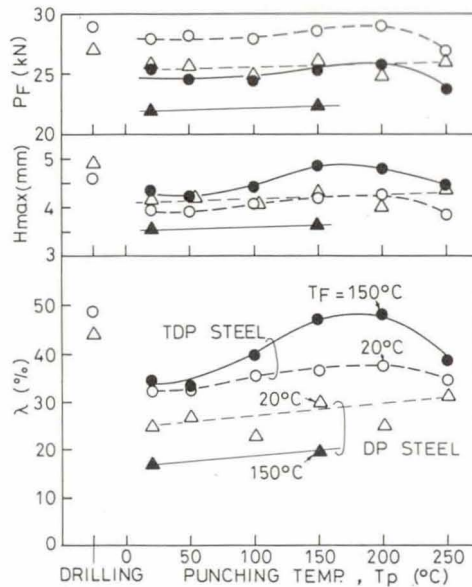


図8 穴抜き成形性

$c=10\%$ で打ち抜いた場合の打ち抜き表面から内部の観察を行ったところ、両者ともボイドが観察されたが、その数は 20°C の方がかなり多い。図10に $T_p=20^\circ\text{C}$ で打ち抜いたときのせん断面近傍のSEM写真を示す。(a)は打ち抜きせん断面部全体を、(b)はその中央部の拡大写真である。せん断面近傍の第2相界面に数 μm のマイクロボイドの発生が多数認められる。

3.3.2 打ち抜き穴表面層の残留 γ の変態挙動

打ち抜き穴の表面から内部方向への残留 γ 量の変化に対する打ち抜き温度、およびクリアランスの影響をそれぞれ図11、12に示す。表面において残留 γ の変態が著しく生じ、内部に

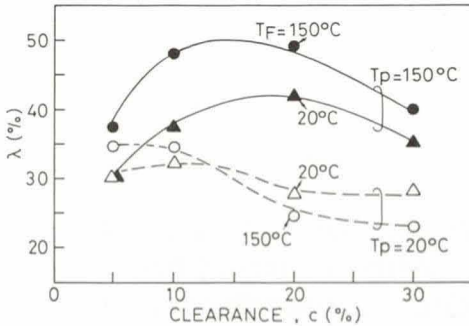


図9 穴抜き率へのクリアランスの影響

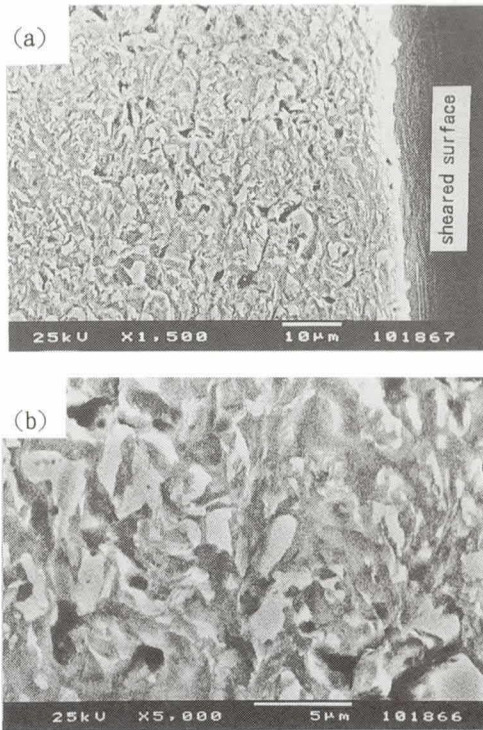


図10 打ち抜き穴のSEM写真

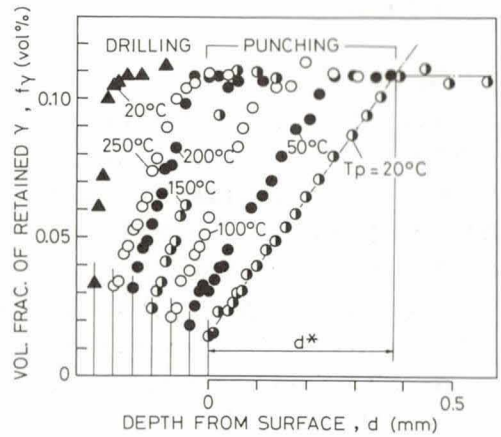


図11 打ち抜き穴表面層の残留 γ 量分布におよぼす打ち抜き温度 T_p の影響 ($c=10\%$, $V_p=10\text{mm/min}$)

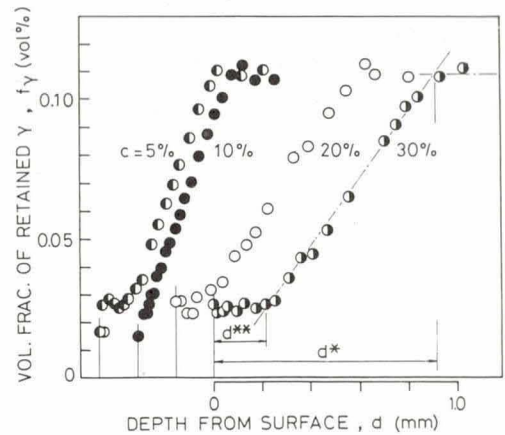


図12 打ち抜き穴表面層の残留 γ 量分布におよぼすクリアランス c の影響 ($T_p=20^\circ\text{C}$, $V_p=10\text{mm/min}$)

向かうにつれて変態量は低下する。いま、残留 γ の変態がまったく起こらないところまでの深さを加工変質層深さ d^* と定義すると、 d^* は打ち抜き温度が高くなるにつれて小さくなる。ただし、250℃以上では逆に増加する。また、図12より d^* はクリアランスが大になるにつれて増加する。変態が特に多い領域が現われ、この領域の幅 d^{**} はクリアランスの増加に伴い増加する。しかし、クリアランスが小さ過ぎる場合($c=5\%$)にはかえって増加し、結果的に $c=10\%$ において d^* は最小となる。なお、切削穴の d^* は打ち抜き穴に比べて極めて小さいことがわかる。

図13に d^* におよぼす加工速度 V_p の影響を示す($c=10\%$)。 d^* は V_p が増加するほど小さくなり、150℃付近での加工により最小となる。この温度での d^* はクリアランス幅 $C=0.12$ mmに相当する。

3.4 考察

3.2において、温間打ち抜きと温間穴抜き加工により、TDP鋼の穴抜き性を飛躍的に改善できることが示された。本節では、この理由について考察する。

一般に、穴抜き性は局部伸び(局部変形)と良好な相関が認められる。複合組織鋼では、母相と第2相の界面でポイドが発生しやすく、このため母相と第2相の強度差が大きい複合組織鋼ほど界面でポイドが発生しやすく、これに起因して穴抜き性の低下が顕著に現われる。本鋼においても、20℃打ち抜き材の打ち抜き表面近傍に多数のポイドが観察されたが(図10)、これは20℃打ち抜き時の初期に残留 γ のマルテンサイト(α')変態が生じ、それ以後のせん断変形時に、硬い α' と母相界面においてポイドが発生したと考えられる。一方150℃打ち抜きでは、残留 γ のひずみ誘起変態が抑制されるため(第2相の強度が低いため)、ポイドがほとんど発生しなかったと考えられる。

温間穴抜きは全伸びおよび張り出し加工の場合と同様に、残留 γ の変態を抑制すると予想される。温間打ち抜き・温間穴抜きにより高い穴抜き率が得られたのは、打ち抜き時の変態量が少なく、穴抜き加工時に適度なひずみ誘起変態による応力緩和がポイド発生を抑制したためと考えられる。

TDP鋼の穴抜き性の改善は、組織の微細・均一化および初期残留 γ の安定化によっても可能である(10)。これについては別稿で述べたい。

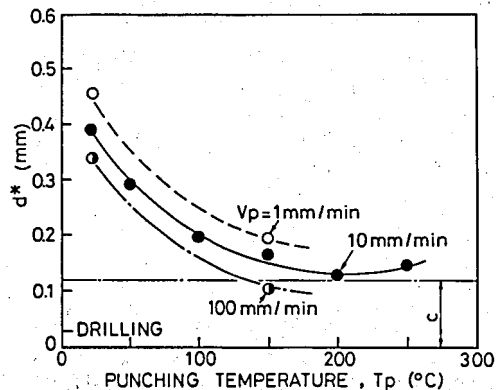


図13 d^* への打ち抜き速度 V_p の影響 ($c=10\%$)

4. 結 言

本研究で、本TRIP鋼の欠点であった低い穴抜き性の改善を目的として、TDP鋼のポンチ打ち抜き加工面の残留 γ のひずみ変態挙動に対する加工条件（温度、速度、クリアランス）および残留 γ 特性（安定性、体積率）、ならびにそれら打ち抜き穴の温間穴抜き性を実験的に検討し、得られた結論を以下にまとめる。

(1) 本TDP鋼のポンチ穴の穴抜き性は、残留 γ のひずみ誘起変態が抑制される温度域への加熱により著しく改善された。これは全伸びと同様TRIP効果が有効に生じたことに起因する。なお、この穴抜き性に対する温度依存性は、約150℃の穴抜き加工の場合において顕著にみられ、切削穴の室温での穴抜き率と同等レベルまで改善された。

(2) 本TDP鋼は従来のDP鋼と比較して穴抜き性が十分に高く、残留 γ のひずみ誘起変態が穴抜き性を改善していることがわかった。

(3) ポンチ打ち抜き穴加工による加工変質層深さは、温間加工により改善されること、加工速度が速いほど小さくなること、最適クリアランスは板厚の10%付近であることがわかった。なお、加工変質層深さは、残留 γ のひずみ誘起変態が適度に抑制される温度である150℃付近での加工によりクリアランス幅まで小さくすることが可能となった。

(4) 本TDP鋼は約150℃の温間打ち抜き温度により、打ち抜き加工時のボイドの発生を抑え、温間穴抜き加工において良好な穴抜き成形性を示した。つまり、穴抜き性の改善には、温間打ち抜きと温間穴抜きの併用が効果的である。

最後に、本研究に際し供試鋼を提供頂いた神戸製鋼所（株）加古川製鉄所の白沢秀則氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- (1) V. F. Zacky, E. R. Parker, D. Fahr and R. Bush : Trans. ASM, 60(1967), 252.
- (2) O. Matsumora et al., Trans. ISIJ, 27(1987), 570.
- (3) K. Sugimoto et al., Met. Trans., 23A(1992), 3085.
- (4) K. Sugimoto et al., ISIJ Int., 32(1992), 1311.
- (5) K. Sugimoto et al., ISIJ Int., 33(1993), 775.
- (6) 樋渡俊二 他：塑性と加工, 35(1994), 1109.
- (7) K. Sugimoto et al., Proc. Int. Sympo. of High-Strength Sheet Steels for Automobile, Baltimore, Mary Land, USA(1994), 255.
- (8) 広瀬洋三 他：塑性と加工, 35(1994), 1071.

- (9) 丸山 弘：熱処理, 17(1977), 198.
- (10) 長坂明彦 他：CAMP-ISIJ, 7(1994), 1669.