

剤の焼付き防止効果が、リン酸鉄類またはピロリン酸鉄類の反応生成物の皮膜形成によることが解明された。温・熱間鍛造では、作業環境の面からBN、雲母、滑石などの層状固体潤滑剤や、加工時に粘性流体潤滑膜を形成するガラス系や金属石鹼などの黒鉛代替潤滑剤が評価された。また超高分子量ポリエチレン系潤滑剤は、親油処理したベントナイトとの併用により、加工条件が厳しくなる場合を除いて黒色系潤滑剤に近い金型の摩耗特性を示した。ホウ砂系や窒化ホウ素+ホウ酸も、押し出しモードの潤滑剤として有効であることがわかった。潤滑剤の評価方法では、高さ/直径比 1.2 の円筒試験片を用いたスパイクテストが提案され、ステンレス鋼の温間押し出しや被加工材と工具間の潤滑状態の良否判別に有効であることが示された。

自動潤滑は、潤滑剤の濃度管理、塗布量の安定確保、型材の軟化防止や寿命延長が課題である。温・熱間鍛造では、汚れ防止と潤滑条件の変動を抑えた非黒鉛系潤滑剤の循環回収システムが開発された。また噴射冷却により冷却能を大きくし、金型の変形や摩耗を減少させた。

現在、熱間鍛造の型寿命は1~1.8万個、冷間鍛造の型寿命は15~20万個といわれている。鍛造品の高精度化や高強度化が進むにつれて工具応力と熱負荷が増大したため、清浄度と耐摩耗性を向上させた高靱性高強度工具材が開発された。また、耐摩耗性改善のためにTiC、TiN、TiCNなどの表面硬化皮膜処理も普及した。今後、cBN膜などの新しい硬質皮膜、潤滑剤のいらぬセラミックス工具、潤滑しやすい組成からなる被加工材の開発などが望まれる。

## (6) 鍛造設備

縦型プレスではクロスタイロッドの取り付けなど構造上の高剛性化が図られ、ボルスタ、プレス、金型の横基準を材料移送方向に統一するようになった。自動化の面では、鍛造装置のNC制御と三次元トランスファ装置の導入が拡大し、高周波加熱器などの付帯装置を鍛造プレスに直結する形式のライン構成が定着した。フリクションスクリュープレスでも、フライホイールエネルギーの調整、ロックアウト制御などが行われ、制御方式の高度化と操作性の改善が図られた。

クランク式鍛造プレスは、鍛造品が大型化するほど、寸法精度、搬送確度、スライド動作などの面で高速化に制約があったが、トランスファフィーダの動きをスライドと機械的に同期させ、またスライドを下死点で停止させないことにより、最大40kgのクランクシャフトを12秒/個で自動鍛造することができるようになった。また、鍛造スケジューリング、材料トラッキング、デリバリングなどをコンピュータ制御し、オンラインの設備診断モニタリングシステムが構築された。

最も自動化が進んでいる多段フォーマでは、多品種少量生産にも対応できるように、金型脱着ロボット、NC調整セットアップ、オフセット機能などが付加され、また型寿命管理や成形品のインライン検査などが積極的に行われている。

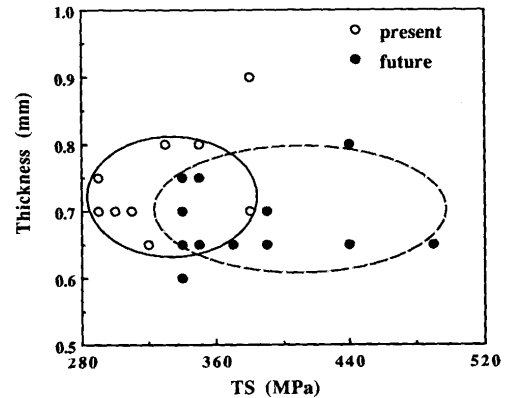


Fig. 4.58. Relationship between thickness and TS of steel sheets for outer panels. (JSFRG Rep., 91-46 (1992))

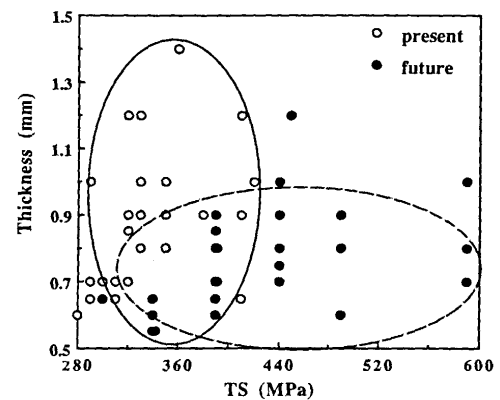


Fig. 4.59. Relationship between thickness and TS of steel sheets for inner panels. (JSFRG Rep., 91-46 (1992))

## 4.5.2 板成形

### (1) 自動車の軽量化と高張力鋼板

自動車の低燃費化実現のために車体の軽量化材料への転換が積極的に進められている。アルミニウム合金採用が進められているが、コスト、安全対策の面から従来よりさらに高強度の高張力鋼板の利用が車体軽量化のキーとなっている。成形性に優れた材料が開発され、一方成形技術も進歩し、外板部品を中心に高張力鋼板の適用が進んでいる。1992年に薄鋼板成形技術研究会(JSFRG)は外板、内板、メンバー、サスペンションなど78部品について使用実態を調査したが、50部品に高張力鋼板の採用実績が認められた。ホワイトボディにおける重量比率でも1980年の全社平均8.7%から1992年には23.3%になっている。将来的には42.8%まで達すると予測されている。

外板部品は高張力鋼板化が最も進んでおり、難成形部品のリヤクォータパネルを除いてほとんどの部品に $TS \leq 400$  MPaの鋼板が採用されている。Fig. 4.58は外板部品に使われている鋼板の引張強さ(TS)と板厚との関係の現状と将来予測を示す。張り剛性の点から大幅な薄肉化は困難であるが、強度は上昇すると予測される。内板部品では複雑な形状

の製品が多く、薄肉化による車体剛性の低下も問題となり、高張力鋼板の採用比率は低い。しかし Fig. 4.59 に示すように TS が 400 MPa 以上の鋼板を使って薄肉化を図ろうとする傾向にあり、高張力鋼板化が進められる。メンバー類、サスペンション類でも高張力鋼板は多く採用されており、将来的には TS $\geq$ 500 MPa の材料が多くなる。TS $\geq$ 800 MPa の超高張力鋼板もドアインパクトビーム、バンパーレインフォースに採用されている。

我が国では成形性の優れた高張力鋼板が次々開発されてきた。Table 4.3, 4.4 は自動車用高張力鋼板を 1993 年末に調査し、強化機構別にまとめたものである。主要な添加元素、強度レベル、特徴、製造可能なめっきの種類、適用部品例を示す。強度部材に使われる熱延高張力鋼板では高伸びフランジ性を有する材料、高耐食性鋼板、熱処理硬化型鋼板などが開発されている。

高張力鋼板の成形では、強度上昇に伴う延性の低下から派生する破断、強度上昇によるしわ・面ひずみの発生、形状凍結不良の多発など多くの問題が発生する。延性の低下は張出し性や伸びフランジ性の劣化、曲げ限界の低下につながる。軽量化のポイントとなる板厚減少はほとんどの成形不良を助長する。これらは高張力鋼板の成形可能域を狭め、作業成績

が不安定になり、またプレス成形では型かじりが発生しやすい。これらの問題を解決するために型設計、成形作業、新しい成形法の適用など種々の対策が講じられる。摩擦特性制御のためには固形潤滑剤や潤滑鋼板が使われる。

## (2) 防錆鋼板

自動車の長寿命化のために各種防錆鋼板が使われている。防錆鋼板の成形上の問題はめっき層の成形時の剥離（パウダリング・フレーキング）・クラック発生による皮膜損傷と耐食性の劣化、およびめっき層の存在による摩擦特性の変化による成形性への影響である。1990 年以降防錆鋼板の摩擦挙動に関する研究が展開され、成形性の指標としてすべり性 slidability の概念が導入された。これは実成形における絞りビードを介したフランジ流入のしやすさを表す値で絞りビード試験における見かけの摩擦係数として定義される。すべり性は現場的には有用な指標であるが、物理的な意味付けは未解決である。

## (3) 新しい成形法

サイドパネルのように大寸法の部品は通常いくつかの小さな部品を成形後、溶接により製品になる。一体成形が可能であれば外観見映えがよく、寸法精度の高い製品が、工程削減・型費節減により安く加工でき、軽量化効果も大きい。成

Table 4.3. Hot rolled high strength steels developed for autobody parts.

Strengthening mechanism	Main element	TS level (MPa)	Characteristics	Available coating	Practical uses
Solid solution	Si-Mn Nb Nb+V	490-590	Good bendability	EG, GI, GA Zn-Ni	Structural components frames, Members Underbody parts
Precipitation	Nb, Ti, Si, Nb+Ti Nb+Ti+Cr	490-780	Drawing type High stretch flangeability	GA, GI, EG Zn-Ni	Structural components Underbody parts Wheel rim Brackets
Multi-phase (Martensite)	Si-Mn Si, Cr	540-980	High elongation and low yield stress Low yield ratio	GA	Underbody parts Wheel disk
Multi-phase (Bainite)	Si-Mn Si-Mn-Nb Cr Ti+Cr	440-780	High stretch flangeability High elongation	GA, GI, EG Zn-Ni	Suspensions Engine-support
Multi-phase	Si, Ti	590-780	High hole expanding ratio		Underbody parts Door impact beam
Multi-phase (Retained austenite)	Si-Mn Si, (Cr, P)	590-980	TRIP type High elongation Good balance with strength and ductility	GA Zn-Ni	Bumper Underbody parts Wheel disk Door impact beam
Special steels	Main element	TS level (MPa)	Characteristics	Available coating	Practical uses
Anti-corrosion type	Cu-P (Ni, Si, Ti, Cr) (Ni, Mo)	370-780	Good corrosion resistance	GA, GI, EG Zn-Ni	Structural components Underbody parts Suspensions
Thermal hardening type	Cu (Ni)	440-590	Strength increase by suitable heat treatment		Frames, Members Suspensions Engine-support

Table 4.4. Cold rolled high strength steels developed for autobody parts.

Strengthening mechanism	Main element	TS level (MPa)	Characteristics	Available coating	Practical uses
Solid solution (Low carbon)	P-Mn Si-Mn P	340-440	Drawing type Good stretchability BH type	EG, GI, GA Zn-Ni Zn-Fe	Outer panels Inner panels Members Brackets Pillars
Solid solution (Ultra low carbon)	P-Mn P-Si Mn-P-Ti Ti, Nb	340-590	Deep drawability BH type	EG, GA, GI Zn-Ni Zn-Fe	Deep drawing type parts Outer panels Inner panels
Precipitation	Mn Nb Si-Mn-Nb	390-590	Good weldability	EG, GI, GA Zn-Ni Zn-Fe	Inner panels
Solid solution + Precipitation	Mn-Ti Si-Mn-P-Mb Cu-Ti	490-590	Good bendability High $r$ value type	GA Zn-Ni Zn-Fe	Reinforcement Brackets
Multi-phase (Martensite) (M+B)	Mn-Si Mn-Si-P Mn S-Mn-Nb	490-1470	Low yield ratio BH type	Zn-Ni Zn-Fe EG	Inner panels Structural components Reinforcement Bumper
Multi-phase (Bainite)	Mn-Cr	440-590	High stretch flangeability High elongation	GI, GA	Members Brackets Reinforcement
Multi-phase (Retained austenite)	Si-Mn	590-980	TRIP type High elongation	Zn-Ni Zn-Fe EG	Structural components
Precipitation + Multi-phase	Mn-Si-Ti Mn-Si-Ti-Mo	780-1470	Ultra-high strength		Bumper reinforcement Door impact beam

形はむずかしくなるが、極低炭素鋼の開発により高 $n$ 値、高 $r$ 値の成形性に優れた材料が利用可能になった。しかし一体成形では素板が重くなり、材料歩留りが低下する。これを解決する方法としてレーザー溶接素板の成形技術が開発された。この加工法は小さな素板をCO<sub>2</sub>レーザーで溶接・一体化したブランクを成形する。部位ごとに板厚や特性、表面処理の異なった材料を組合せることができ、分割成形と一体成形の利点を合わせ持った加工法である。

パンチ頭部を冷却し、板押え部を加熱する温度制御成形法により、難加工材の成形が可能になる。材料の成形性の改善、材料のグレードダウン、工程削減、成形品の品質向上などが期待できる。この成形法は高張力鋼板や樹脂複合鋼板の成形に効果があるが、生産性に劣るため、少量生産に向けた成形法といえる。

板成形では破断としわを避けるために板押え力 Blank Holding Force (BHF) を適当な値で一定に保持して成形品を得る。この BHF を成形行程中にリアルタイムで変化させて形状性の良い成形品を作る手法が開発されている。板押え部を分割して、部位ごとに BHF を変えて成形性を向上させる加工法も開発されている。BHF 制御は成形中に成形工程を最適化する閉回路 (closed-loop) システムの要素として注目される。

自動車部品のような大寸法の成形品に対向液圧成形が実用

化された。対向液圧は下型の代わりに液体を圧力媒体として用いるもので、成形性の向上、形状・表面性状の向上、経費削減が特徴である。生産性は劣るが、多品種少量生産に適している。

#### (4) 数値解析による板成形シミュレーション

成形行程における材料の変形、応力、ひずみを数値的に解析し、成形不良や成形性を事前に評価することにより板成形の最適化を図る手法は1990年代に入って急速に進歩した。特に弾塑性有限要素法 (FEM) は、ハードウェアの高機能化と板成形に適した3次元解析が可能なプログラムの開発により数値解析の主流となっている。我が国においても ROBUST や ITAS のように独自の有限要素法シミュレーション手法が開発されている。成形シミュレーションは実成形の工程短縮、コストダウンの有力な手法として期待が大きい。破断、スプリングバックなどを的確に予測するまでには至っていない。成形限界を正確に把握するために、材料および摩擦の厳密なモデル化とこれらのデータベースの構築が課題となっている。

### 4.5.3 鋳物

#### (1) 半溶融加工

この技術は1970年代前半に MIT の Flemings 教授がレオキャスト法として発表したものが始まりであり、こ