研 究

電気亜鉛めっき鋼板の成形性について

大坪 博之*・芝野 徹阿*・加藤健三**

Press Formability of Zinc Electroplated Steel

Hiroyuki OTSUBO*, Tetsuo SHIBANO*, and Kenzo KATO**

Formability of zinc plated steel has been investigated by tensile, Erichsen, deep drawing and conical cup tests. Zinc was deposited onto the steel surface from a conventional zinc sulphate solution with the thickness ranging from 2 to 100 μ m, and the roughnesses from 5 to 25 μ m. From these examinations, it was found that the tensile and proof stresses of the zinc electroplated steel decreased with increasing thickness of zinc deposits. The strain hardening coefficient increased slightly, whereas the plastic strain ratio remained practically unchanged. The Erichsen value and the limiting drawing ratio decreased with an increase in coating thickness of zinc, while the conical cup value increased. All of these properties degraded the formability of the zinc plated sheet steel. When the thickness of zinc was smaller than 10 μ m, no degradation of stretch formability of the steel was observed, and when the thickness was smaller than 20 μ m, the degradation was slightly detectable in deep drawability. By and large, the formability of the zinc plated steel tended to be favorable for smoothly deposited surface. It is concluded that formability of the steel with a small thickness of zinc is preferable than with a large thickness of zinc on the basis of the following reasons: (1) the tensile strength decreases with increasing thickness of zinc, and (2) the surface roughness increases, causes an increase in the frictional force on the subsequent plastic deformation.

1. 緒 言

2. 実 験 方 法

電気亜鉛めっき鋼板の特徴は耐食性、塗装性、加工性にあり、耐食性を増すためには厚めっき、化成処理や塗装が行なわれる。更に、耐食性を高めるために Sn と Zn の多層めっきや合金めっき、少量の Mo と Co を含有する合金めっきが、また、塗装、溶接などの観点から片面めっきが開発されている。これらのめっき材は何らかの形で成形加工される。そして、電気亜鉛めっき鋼板は溶融亜鉛めっき鋼板よりも加工性にすぐれているといわれているが、成形加工性に関する報告^{1),2)}は比較的少ない。

筆者らは、電気亜鉛めっき鋼板の成形性の基礎的データをを得ることを目的として、市販板材の亜鉛めっき厚さ10 μ m以下の薄いものから極度に厚くしためっき材について張出し性、深絞り性、絞り張出し複合成形性などとめっき厚さ、表面粗さの関係を検討した。

2-1 めっき試料の作製

めっき試料は厚さ0.8mmの深絞り用鋼板 (SPCE) を用いて、120mm 角の陰極板とし常法による前処理後、片面のめっき厚さが2-100 μ m (15-750g/m²) の範囲になるよう時間を調整し鋼板の両面に等厚めっきを行なった。浴組成は表1に示した酸性浴で、主として陰極電流密度 Dk を2, 6A/dm² の条件でめっきを行なった。なお、陽極は電気亜鉛 (99.998%) を鋳造、圧延したものでナイロン製の陽極袋をかぶせて使用した。

Table 1 Plating condition and bath composition for zinc plating on sheet steels.

Bath composition		Plating condition
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	360g/l	Current dens. 2.6A/dm ²
NH ₄ Cl	30g/l	Temp. 30±2°C
CH ₃ COONa	15g/l	Time 1'10" - 3'05"
		pH 3.5-4.5
		Electrode dist. 80mm

* 愛媛大学工学部 (〒790 愛媛県松山市文京町3)
Faculty of Engineering, Ehime Univ. (3, Bunkyo-cho, Matsuyama-shi, Ehime Pref. 790)

**大阪大学工学部 (〒565 大阪府吹田市山田上)
Faculty of Engineering, Osaka Univ. (Yamadae, Suita-shi, Osaka-fu 565)

2-2 引張試験

板材特性を求めるために JIS 13号 B 試験片に準じた引張試験片を作成し、クロスヘッド速度 10mm/min で引張り荷重—伸び線図を得た。鋼板には板面異方性があるため、圧延方向と 0° , 45° , 90° の3方向について各方向3個の測定平均値から 0.2% 耐力 $\sigma_{0.2}$, 引張強さ σ_B , 塑性ひずみ比 r , 加工硬化指数 n X 値などを $(X_{0^\circ} + 2X_{45^\circ} + X_{90^\circ})/4$, ($X = \sigma_{0.2}$, σ_B , r , n) により求めた。

2-3 成形性試験

張出し性を評価するために JIS B 法に従ってエリクセン試験を行なった。一辺 70mm の正方形試験片とし、

Fig. 1 Shapes and dimensions of specimens used in tension and formability tests.

直径 20mm の球頭ポンチを板面に押しつけ破断時の張出し高さを3個の測定の平均値として求めた。なお、潤滑剤には白色ワセリンを使用した。

コニカルカップ試験では直径 50mm の試験片両面にマシン油を塗布し JIS 17型工具を用いて、球頭壁部が破断したときのカップ径を測定し複合成形性を評価した。また、深絞り試験はポンチの径 40mm, 肩半径 8mm で、ダイスには穴径 42mm, 肩半径 6mm の工具を用いて平頭円筒深絞りを行なった。2mm 間隔で円板直径を変えためっき材で絞り抜ける限界の素板直径から限界絞り比 L. D. R. を求めた。潤滑にはメカニック油 #52 (出光興産 K. K) をダイス側およびしわ押え面に塗布しポンチ頭部は無潤滑とし、絞り速度は 50mm/min と一定にした。各種試験の試験片形状とその試験片から得られる特性値を図 1 にまとめて示した。

3. 実験結果と考察

3-1 表面粗さ

一般に板材を成形するとき材料と工具間の摩擦面では、板材の表面粗さの大小が摩擦力を左右し加工力に影響する。図 2 はめっき厚さが異なるときの表面粗さ R_{max} に及ぼす陰極電流密度 D_K の影響を示し、 $D_K = 2 \sim 10 \text{ A/dm}^2$ の範囲では D_K の増加とともに R_{max} は減少し、めっき厚さが 20, 50 μm のように厚いときには低 D_K の側から 6 A/dm^2 までは R_{max} は急激に低下するが、さらに D_K が大きくなると減少傾向は小さくなる。これは高 D_K でめっきした場合、結晶核の発生速度は大きいが粒成長速度は小さいため結晶粒は微細になり表面粗さが相対的に

Fig. 2 Effect of current density on the surface roughness of electroplated zinc.

Fig. 3 Effect of coating thickness on the surface roughness.

小さくなると考えられる。厚さ $20\mu\text{m}$ のめっき層の表面を顕微鏡で観察すると400倍の視野中で $D_K=2\text{A}/\text{dm}^2$ のものは局部的に焦点がずれ、凹凸が大きく結晶形状も不規則である。これに比べて $10\text{A}/\text{dm}^2$ のものでは大きな凹凸はなく亜鉛結晶のステップが認められ、吉田らの報告³⁾にある典型的な金属亜鉛六方晶の観察結果と類似している。 $6\text{A}/\text{dm}^2$ ではこれらの中間的なものか、 $10\text{A}/\text{dm}^2$ のときの表面に近い様子を示している。本実験条件下では D_K が大きいと試料すみ部に樹枝状析出物ができやすく、長時間めっきで樹枝状晶が 5mm 程度に成長する。それで、厚さの不均一を避けるために $D_K=6\text{A}/\text{dm}^2$ で各厚さのめっき材を得るようにし、比較のために $2\text{A}/\text{dm}^2$ でめっきした試料と併せて以下の実験に備えた。

図3は R_{max} に及ぼすめっき厚さの影響を示したもので $6\text{A}/\text{dm}^2$ ではめっき厚さの増加とともに R_{max} は直線的に増加する。また、厚さ $20\mu\text{m}$ 以下では R_{max} は $8\mu\text{m}$ 以下で鋼板の $R_{\text{max}}=5\mu\text{m}$ と比べて大差ないが、厚さ $50\mu\text{m}$ 以上では $12\sim 19\mu\text{m}$ と相当粗くなる。 $2\text{A}/\text{dm}^2$ の試料ではめっきの薄いときには $6\text{A}/\text{dm}^2$ のものと同程度が高々 $2\mu\text{m}$ ほど粗いが、 $20\mu\text{m}$ 以上の厚めっきでは $3\sim 4\mu\text{m}$ 相対的に粗になっている。したがって、めっき厚さの増加に伴ない結晶成長による表面粗さの増大が認められる。

Fig. 4 Relation between mechanical properties (σ_B , $\sigma_{0.2}$, e) and coating thickness of electroplated zinc.

3-2 材料特性

鋼板の引張強さ σ_B 、耐力 $\sigma_{0.2}$ 、破断伸び e 、塑性ひずみ比 r 、加工硬化指数 n などと曲げ性、深絞り性、張出し性と一般的な関係⁴⁾が認められている。そこで、めっき材の材料特性値がめっき厚さによってどのような挙動をとるかを示したのが図4、図5である。 σ_B 、 $\sigma_{0.2}$ はめっき厚さの増加とともに直線的に減少し、強度の低下は試片断面の鋼板と亜鉛層の面積比からめっき材にも強度の複合則⁵⁾、 $\sigma = \sigma_1 V + \sigma_2 (1 - V)$ (σ : 複合材の強度、 σ_1 、 σ_2 : 素材1、2の強度、 V : 体積分率)が適用できる。純亜鉛の $\sigma_B=11.0\text{kg}/\text{mm}^2$ 、 $\sigma_{0.2}=5.6\text{kg}/\text{mm}^2$ と鋼板の $\sigma_B=30.6\text{kg}/\text{mm}^2$ 、 $\sigma_{0.2}=17.8\text{kg}/\text{mm}^2$ として計算により求めた値は実験結果とよく一致する。鋼板より亜鉛の σ_B 、 $\sigma_{0.2}$ は相対的に小さく亜鉛層が厚くなるほど強度が低下することが明らかである。なお、亜鉛板の強度の異方性は鋼板に比べてずっと大きい、めっき材ではめっき厚さの増加とともに強度の低下する割合は 0° 、 45° 、 90° 方向ともほぼ同様で強度に及ぼすめっき材の板面異方性への影響は認められなかった。また、引張試験後の試片はくびれ部で 45° 方向に近いせん断方向で破断し、その形状は鋼板と変わらず厚さ $20\mu\text{m}$ 以下ではめっき層も鋼板の伸びに追従し破断部までよく密着していた。破断伸び e はめっき厚さの全域で鋼板に対して $\pm 1\%$ 以内の変化でしかなかった。

純亜鉛板の r 値は1以下で鋼板の r 値より小さい。それゆえにめっき材ではめっき厚さの影響があるものと考えたが、 $6\text{A}/\text{dm}^2$ の試料の結果では 0° 、 45° 、 90° 方向いずれも顕著な変化は認められなかった。最大厚さの100

Fig. 5 r and n -value vs coating thickness of electroplated zinc.

μm では鋼と亜鉛の容積比が 4:1 となるが鋼板の r 値とほぼ変わらないことは、純亜鉛板とは異なり亜鉛層のひずみは鋼板のひずみ状態に支配されるためにめっき厚さが変化しても r 値はほとんど低下しないものと思われる。ただ、めっきの薄い 2~5 μm のところに小さな山が見られること、 σ_B , $\sigma_{0.2}$ でも 2 μm に鋼板よりわずかに高い値を表わす特異な挙動を示す。この原因は明らかでないが、図 6 に示した X 線回折の結果めっき厚さ 10 μm 以下で亜鉛のすべり面となる (0001) と等価の (0002) は板面に平行で、その強度が他の面に比べて大であること。および、鋼板裏面にひずみゲージをはり表面に亜鉛を電着させ鋼板のたわみ量を求める方法⁶⁾ によって亜鉛層の応

力を測定した結果、図 7 に示したようにめっき厚さ 5 μm 以下で圧縮応力の急激な増加が認められ、変形に及ぼす結晶方位とめっき面内部応力などの影響が考えられる。2A/dm² の場合にはめっき厚さの増加とともに r 値の低下が認められ 6A/dm² のときとは異なるが、その原因は明らかでない。

n 値は図 5 から分るように、めっき厚さの増加によりわずかの増加がみられる。したがって、それだけ加工硬化性は大きくなるので塑性不安定が起りにくく変形の一様性が保たれ、若干大きな変形を得ることが期待できる。以上のめっき材の材料特性値から成形性を予測してみると 6A/dm² の場合にはめっきの薄いところで n 値、 r 値が微増し、 σ_B , $\sigma_{0.2}$ も鋼板と同程度であるから張出し、深絞り性は鋼板と同程度のものが期待できる。しかし、めっきが厚いと σ_B , $\sigma_{0.2}$ は低下し、また、2A/dm²

Fig. 6 Change in the orientation intensity in electrodeposited zinc with increasing coating thickness. (6A/dm²)

Fig. 7 Influence of coating thickness on the internal stress of zinc layer. (6A/dm²)

Fig. 8 Effect of coating thickness on Erichsen cup value.

Fig. 9 Effect of coating thickness on limiting drawing ratio.

では n 値を除いて他の材料特性値は鋼板よりも低くめっき材の成形性は低下するものと思われる。

3-3 張出し性

図8はエリクセン値 I_E に及ぼすめっき厚さの影響を示したもので、測定値には ± 0.1 程度のばらつきが認められたが平均値をプロットすると相対的な評価ができる。すなわち、鋼板は $I_E=11.1$ であったが $6A/dm^2$ のめっき試料では $20\mu m$ までに 0.3、それ以上の厚さで更に 0.1 低下し、めっき材は鋼板より張出し性が劣りめっき厚さの増加により助長される。 $2A/dm^2$ のめっき材ではその傾向がより大きく表われる。単一材では n 値が大きいと変形の一様性が保たれ張出し性が良いと言われ、図5の n 値の結果だけで判断すると張出し性は向上すると考えられる。しかし、めっき厚さの増加とともに σ_B は減少し張出し限界までの強度が低下することや、表面粗さは同一めっき厚さでは $6A/dm^2$ のものより $2A/dm^2$ のめっき材の方が、また、めっき厚さの増加に伴ない大きくなるのでポンチ頭部での摩擦抵抗が大きくなり、ポンチ頭部と接触する変形域のひずみの分散を妨ぎひずみの局部集中によって一様な張出し変形を阻害する。また、表面亜鉛の延性が鋼板より劣ることなどが考えられめっき材の張出し性は劣化したものと思われる。めっき厚さ 50, $100\mu m$ の張出し球頭部で破断部直近の円周方向に微細割れが分布し、亜鉛表面から割れが発生して鋼表面部に達し破断したと考えられる。これ以外の試料ははだあれ、はく離などの兆候もなく、断面の顕微鏡観察でも破断部まで亜鉛は鋼板に付着し、密着性は良好であった。

3-4 深絞り性

深絞り限界を左右する因子は型、材料、潤滑などであるが、ここでは潤滑方法、金型形状を一定にして亜鉛めっき材の厚さとその表面粗さの変化を材料因子と考えた。図9に深絞り性に及ぼすめっき厚さの影響を限界絞り比 L.D.R. で示した。 $6A/dm^2$ の場合、しわ押え力 H_F が $500kg$ のとき、鋼板は L.D.R.=2.2 でめっき材では 2.0 程度となり $100\mu m$ では 1.9 まで低下する。 $H_F=1000kg$ ではフランジ面の拘束力が大きいだけダイス穴への流入抵抗が大きく変形が難しくなり L.D.R. は H_F の小さいときより更に 0.1 ほど低い。 $2A/dm^2$ の場合には σ_B や r 値が $6A/dm^2$ のものより低く、それだけ L.D.R. は低下したものと思われる。ところで、 $6A/dm^2$ のめっき材の n 値の微増や 0.1 程度の r 値の減少から見ると深絞り性の劣化は少ないと考えられる。しかし、図9の結果は薄めっき材の n , r , σ_B などの変化に比べて深絞り性の低下が過大であると思われる。これは変形時のフランジ面の摩擦を考慮すると、マシン油潤滑では工具材料間の境界潤滑性能が乏しく膜ぎれを生じて工具面に亜鉛が凝着し摩擦力が異常に増大するものと考えられる。事実、深絞

り後のダイス肩部に微細な亜鉛粒子が存在し、他方、ラノリンなど他の高粘度潤滑剤を用いたときには亜鉛の凝着は全くなく L.D.R. は 0.2 ほど高くなる。したがって、ここでは亜鉛凝着による摩擦抵抗増大のため表面粗さによる摩擦抵抗の違いは捕え得なかったが、高粘度潤滑剤を使用した場合には薄めっき材で表面粗さの比較的小さい $6A/dm^2$ のめっき材が $2A/dm^2$ のものより L.D.R. は 0.1 高くなる事実を確認している。L.D.R. を超える寸法の試料はポンチ肩部で破断し、その位置形状は鋼板とめっき材の相異はなく、エリクセン試験の試料と同様に亜鉛と鋼板の密着性に問題はなかった。ただ、 $2A/dm^2$ の試料を $H_F=1000kg$ の条件で絞り抜いたとき円筒容器の壁部で破断する、いわゆる壁われ現象が認められた。本実験条件では鋼板で $84mm$ 径のものが深絞りできるのに対して、めっき材は $80mm$ 径が最大であり、深絞り性はめっき材が鋼板より劣ることが明らかである。

3-5 複合成形性

めっき材のコンカルカップ値 C.C.V. とめっき厚さの関係から絞り張出し複合成形性をみたのが図10である。鋼板の 37.4 に比べてめっき材の C.C.V. は大きく、めっき厚さが増すとともに C.C.V. は増大し複合成形性は大きく劣化する。表面粗さの大きい $2A/dm^2$ のものの方がその傾向は顕著である。この試験ではポンチ頭部の張出し性とカップ壁部の深絞り性が総合されたものとして表われるから図8、図9から判断しても明らかに複合成形性は低下し、特に、ダイス壁への亜鉛の凝着が激しく変形時の摩擦力増大が張出しより深絞り性を大きく阻害するものと考えられる。

Fig. 10 Effect of coating thickness on conical cup value.

4. 結 論

本研究における結果を要約すると次のようである。

- 1) めっき材の板材特性はめっき厚さの増加により引張

強さ、耐力ともに低下しそれは強度の複合則が当てはまる。また、 n 値は微増が認められるが、 r 値は若干低下し伸びはほとんど変化しない。

2) めっき厚さが増加するほど張出し性、深絞り性、複合成形性は劣化する。ただし、厚さ $10\mu\text{m}$ 以下では $I_E > 10.9$ で鋼板に近い張出し性を、 $20\mu\text{m}$ 以下ではL.D.R.が鋼板より0.2小さくなるだけで深絞り性の劣化も比較的少ない。

3) 張出し性、深絞り性、複合成形性ともに表面粗さは小さい方が良好である。粗さが大きく、めっき厚さが厚いときほど成形性を損うのは厚さの増加に伴う強度の低下、粗さの増大による変形時の摩擦力の増加にあり、薄めっき材ではこれらの影響が少なく鋼板に近い成形性を示すものと結論できる。

板材特性や成形性で $10\sim 20\mu\text{m}$ を境にして異なった挙動を示し、これは薄めっき層の結晶構造、内部応力、成形時の摩擦抵抗などの影響が考えられ、摩擦、潤滑、表面形状などの関係を今後検討する必要がある。(昭和52年5月、本協会第55回学術講演大会にて一部発表) (1979—7—4 受理)

本論文中の非 S I 単位の S I 単位に対する換算表

量	単位記号	S I 単位による値
電流密度	A/dm ²	1A/dm ² =100A/m ²
応力	kg/mm ²	1kg/mm ² =9.80665MPa
付着量	g/m ²	1g/m ² =10 ⁻³ kg/m ²

文 献

- 1) 西村 健; 電気亜鉛鍍金鋼板の経時変化について, 鉄と鋼, **51**, 2197 (1965)
- 2) 松藤和雄, 下松隆良, 由田征史; 電気亜鉛メッキ鋼板のプレス成形性, 鉄と鋼, **61**, 4, s 173 (1975)
- 3) 吉田 実, 西村 健, 近藤正義; 電気亜鉛鍍金鋼板の製造条件と結晶形状の関係について, 鉄と鋼, **54**, 3, s 247 (1968)
- 4) 日本塑性加工学会編; プレス加工便覧, p. 310 (1975, 丸善)
- 5) 大山致知; 複合材料, 日本金属学会会報, **10**, 4, 249 (1971)
- 6) 伊勢秀夫; 電着層の内部応力の測定法, 金属表面技術, **12**, 6, 236 (1961)

内 藤 武 志 著

浸炭焼入れの実際

248ページ, 3, 100円 日刊工業新聞社発行 (1979年)
〒102 千代田区九段北1-8-10 ☎ 03 (263) 2311

鋼の浸炭処理は歴史も古く、またもっとも広く利用されている表面硬化法であるが、由来本方法は経験的な要素が多い現場技術とされ、ために各専門家はそれぞれ特自の方法を工夫して行っているようである。したがって浸炭処理法について理論と実際の両面から解説した専門書が少なかった。

本書は浸炭理論を土台として実際の処理法を詳細に述べている。内容は4つの項目に分けられる。

第1項では浸炭法の歴史および種類について述べているが、特に現在工業的にもっとも大規模に行われているガス浸炭法の理論および実際の処理法を詳細に述べている。また省エネルギー、省資源などの立場から最近注目されつつある滴注式浸炭、真空浸炭および高炭素浸炭などの各方法についても触れている。第2項では実用の浸炭用鋼の種類、浸炭後の熱処理など、浸炭鋼の熱処理全

般について丁寧にまたわかり易くまとめている。第3項では実際の部品に浸炭処理する場合の設計者に必要な基本的な考え方を述べ、特に応用範囲の広いといわれる歯車の浸炭処理法および熱処理設計を詳細に述べている。

第4項では浸炭鋼の検査についての著者の見解を述べ、浸炭部品の強度を支配すると考えられる炭素量、硬さ、組織などの検査方法が書かれている。

以上本書の内容の概要を述べたが、著者が序文で書かれているように、「自分ならばこのようなことが知りたい」という気持になって、理論に裏打ちされた物の作り方に重点をおき、わかり易くまとめられており、また関連した文献も多数あげてあるので、これらの業種に直接タッチしておられる技術者や、これからこの方面に従事されようと考えておられる方には格好の参考書である。

(東海大学教授 河上 謙)