

合金化溶融亜鉛めっき鋼板を原板とした プレコート鋼板の打抜き加工における エナメルヘアの発生挙動

塩田明俊*・三木賢二*・堺 裕彦*・野村伸吾*²

Behavior of Paint Loss at the Punched Edge of Pre-painted Galvannealed Steel Sheet

Akitoshi SHIOTA, Kenzi MIKI, Hirohiko SAKAI and Shingo NOMURA

Synopsis:

Paint loss at the sheared and punched edge of pre-painted galvannealed steel sheet, so called enamel-hair, deteriorates corrosion resistance at the edge and mars appearance of paint film.

Effect of paint film and punching condition on the paint loss was investigated and this behavior was discussed by applying strain-induced grain growth. The results are summarized as follows;

(1) Polyester powder paint produced more paint loss than acryl solvent paint.

(2) Paint loss increased with an increase in punching clearance, an increase in punching speed and a decrease in punching temperature.

(3) Putting protect film on paint film increased paint loss in case of polyester powder paint and decreased paint loss in case of acryl paint.

(4) Microstructure of deformed base steel at the punched edge was studied by the strain-induced grain growth method. Behavior of paint loss can be explained by strain distribution at the edge and properties of paint film.

Key words: paint loss (enamel-hair); punching condition; pre-painted galvannealed steel sheet; strain-induced grain growth; polyester powder; acryl.

1. 緒 言

合金化溶融亜鉛めっき鋼板は、塗膜密着性、塗装後の耐食性に優れているため、プレコート鋼板の原板として使用されることが多い。しかし、このプレコート鋼板にせん断、打抜きなどの加工を加えると、せん断面にそって細長い塗膜剥離を発生することがある。これをエナメルヘアと称しており、端面の耐食性を劣化させ、外観品質をそこなうため問題となる。

エナメルヘアに関しては、剥離が発生した部分の元素分析などの結果から、めっき層と母材の界面近傍から剥離することが、現在までに判明しており、無塗装の合金化溶融亜鉛めっき鋼板では発生せず、塗膜の存在下で起こる特異な剥離現象である。

この現象については、今までにいくつかの報告が行われているが^{1)~5)}、めっき層の組成あるいは塗膜の性質を

主体に検討された例がほとんどであり、鋼板自体の変形に注目して調査を行った例は少ない。

本報では、エナメルヘアにおよぼす塗膜の種類と打抜き条件の影響について調査し、その発生挙動について鋼板のひずみ誘起粒成長現象を利用して考察した結果を報告する。

2. 実 験 方 法

2.1 供試材

塗装原板は、低炭素アルミキルド鋼を母材としてゼンジマー型溶融亜鉛めっきラインで製造された合金化溶融

Table 1. Material tested.

Material	Size (mm)	Nominal coating weight (g/m ²)	Fe content (%)
Galvannealed steel sheet	0.8×220×350	60/60	11.3

平成元年4月本会講演大会にて発表 平成2年11月9日受付 (Received Nov. 9, 1990)

* (株)神戸製鋼所加古川製鉄所 (Kakogawa Works, Kobe Steel Ltd., 1 Kanazawa-cho Kakogawa 675-01)

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

Table 2. Paint coating condition.

Pre-treatment		Paint coating		
Kind	Coating weight (g/m ²)	Primer	Top coat	Thickness (μm)
Phosphate	0.5	Epoxy	Acryl	Total 20
		Polyester powder (1 coat)		45 and 55

Table 3. Mechanical properties of paint film.

Paint	Pencil hardness	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Modulus of elasticity (dyn/cm ²)	T _g (°C)
Polyester (PE) Acryl (AC)	HB 5H	5.4 —	8 —	2.42×10 ⁹ —	103 95

亜鉛めっき鋼板から採取した。

供試材の寸法、めっき付着量およびめっき層の平均鉄濃度を Table 1 に示す。

2.2 塗装試験片の作成

供試材に、塗装前処理として日本パーカライジング社製りん酸塩処理 (PB3300) を施した後、粉体ポリエステル系と溶剤型アクリル系の塗装を行った。その明細を Table 2 に示す。

粉体ポリエステル系塗料については静電吹きつけ塗装を行い、塗膜厚さが 45 μm の塗装板を作成した。なお、クリアランスの影響調査には、その影響がより顕著な 55 μm の塗膜厚さの塗装板を作成し使用した。溶剤型アクリル系塗料は 2 コート 2 ベーク塗装であり、エポキシ系下塗り塗料を 3 μm 塗装後アクリル系上塗り塗料を 17 μm 塗装し、合計塗膜厚さを 20 μm とした。なお、膜厚調整はバーコーターによって行った。

2 種類の塗膜の物理的性質を Table 3 に示す。

粉体ポリエステル系塗膜は、引張強度が大きい強靱な塗膜である。一方アクリル系塗膜は、鉛筆硬度が 5 H と、延性が小さいと推定される塗膜であり、引張試験用の遊離塗膜作成時破壊したので、機械的性質は測定できなかった。

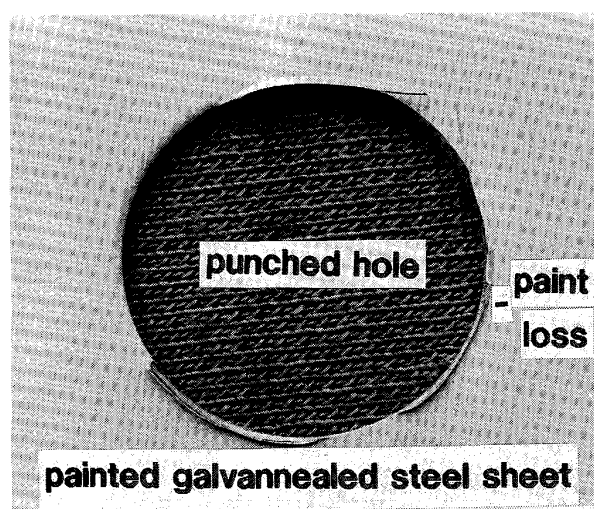
2.3 打抜き条件とエナメルヘアーの評価

塗装した鋼板に φ20 mm の円形打抜きを行った。

Photo. 1 は打抜き部を鋼板の上部から観察したものであり、打抜き穴の周囲にそって細長く塗膜が剥離している。この剥離片の重量を測定することにより、塗膜剥離すなわちエナメルヘアーを定量的に評価した。

打抜き条件は Table 4 に示すように、打抜きクリアランス、速度、温度を変化させた。

なお、クリアランスはポンチとダイス間の片側クリアランスで定義し、ポンチ径を一定にして、ダイス径を変えることによって変化させた。



Punched hole φ20 mm

Photo. 1. Appearance of paint loss.

Table 4. Punching condition.

Clearance (mm)	0.025	0.050	0.075	0.150
Speed (mm/s)	5	210	400	
Temperature (°C)	0	25	40	
Protect film*	With film		Without film	

* Polyethylene film (Thickness 60 μm)

さらに、プレコート鋼板の塗膜保護を目的として使用されている保護フィルムの効果を調査するため、ポリエチレンフィルムをはりつけた塗装板についても検討を行った。

3. 実験結果

3.1 塗膜の種類と打抜きクリアランスの影響

塗膜の種類と打抜きクリアランスの影響を Fig. 1 に示す。

粉体ポリエステル系塗膜は、アクリル系塗膜に比べ非

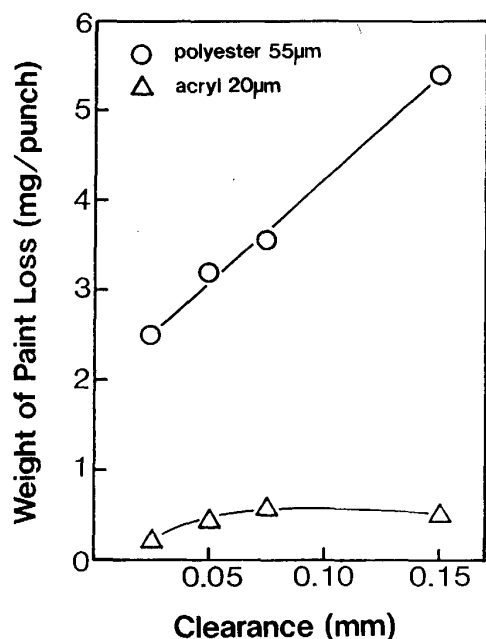
常に大きな剝離量を示し、打抜きクリアランスが大きくなるにしたがい急激に増加した。

一方、アクリル系塗膜においては、粉体ポリエステル系塗膜と同様クリアランスが大きくなるとともに剝離量は増加した。しかし、その増加量は小さく、クリアランスが 0.075 mm 以上になると、剝離量はほぼ一定の値を示すようになった。

3・2 打抜き速度の影響

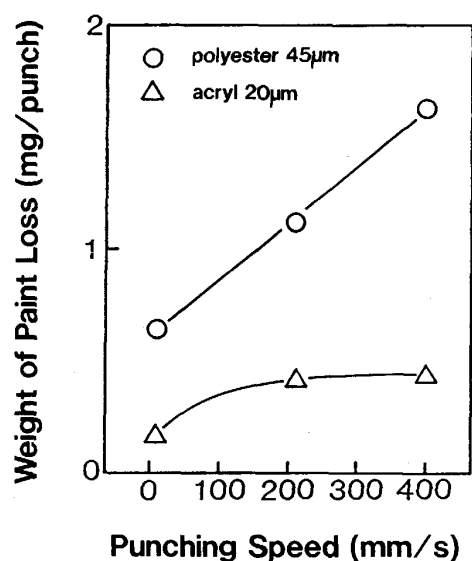
打抜き速度の影響を Fig. 2 に示す。

2 種類の塗膜とも、打抜き速度が速くなるにつれて剝



Punching speed 210 mm/s 25°C

Fig. 1. Effect of punching clearance on paint loss.



Punching clearance 0.050 mm 25°C

Fig. 2. Effect of punching speed on paint loss.

離量は増加した。アクリル系塗膜においては、クリアランスを変化させた場合と同様、その増加量は小さく、210 mm/s 以上の速度で一定の剝離量となった。

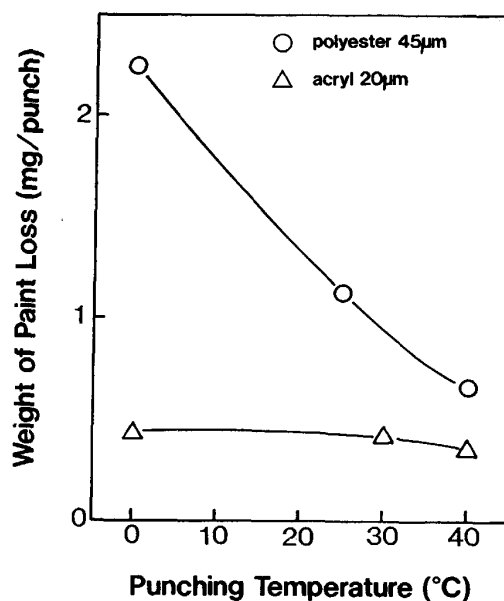
3・3 打抜き温度の影響

打抜き温度の影響を Fig. 3 に示す。

粉体ポリエステル系塗膜では、打抜き温度が上昇するにつれて剝離量は急激に減少した。それに対しアクリル系塗膜では、剝離量の減少はわずかしき認められなかった。

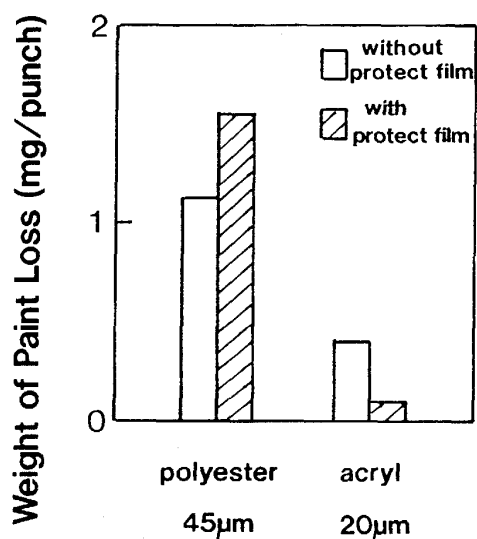
3・4 塗膜保護フィルムの影響

塗膜保護フィルムの影響を Fig. 4 に示す。



Punching speed 210 mm/s Clearance 0.050 mm

Fig. 3. Effect of punching temperature on paint loss.



Punching speed 210 mm/s Clearance 0.050 mm 25°C

Fig. 4. Effect of protect film on paint loss.

塗膜保護フィルムをはりつけて打ち抜いた場合、アクリル系塗膜では、剥離量が減少したが、粉体ポリエステル系塗膜においては、逆に増加した。

4. 考 察

4.1 塗膜の種類の影響

無塗装および塗装を施した合金化溶融亜鉛めっき鋼板の打抜き部断面を Photo. 2 に示す。

無塗装の合金化溶融亜鉛めっき鋼板においては (Photo. 2 の a), めっき層中にクラックが多数発生しており, めっき層の剥離は認められなかった。

めっき鋼板を加工した場合, めっき層内部とめっき層/母材界面に応力が発生する。合金化溶融亜鉛めっき鋼板では, めっき層の延性が小さいため, これらの応力はめっき層中にクラックが発生することにより, 緩和される。その結果, めっき層の剥離が生じなかったと考えられる。

一方, 塗装を施した合金化溶融亜鉛めっき鋼板においては, 無塗装材と同様めっき層中にクラックが発生しているにもかかわらず, めっき層の剥離が認められた。

このエナメルヘアーの発生メカニズムについては, 次のように考えられる。

すなわち, 塗装した合金化溶融亜鉛めっき鋼板の場合, 塗膜内部, 塗膜/めっき層界面, めっき層内部, めっき層/母材界面に応力が発生する。この結果, 延性が小さいめっき層にクラックが発生するが, めっき層が塗膜および母材と密着しているかぎり, 応力は緩和されない。合金めっき層は塗膜との密着性が良好であり, この界面での剥離が生じにくく, 応力は塗膜にクラックが発生することにより, もしくはめっき層の剥離によって緩和されると考えられる³⁾。この両者のいずれの状況を呈するかは, 塗膜の物性によって異なる。

上記の観点から物性の異なる 2 種の塗膜を比較すると粉体ポリエステル系塗膜においては (Photo. 2 の b) 塗膜の伸びが大きく, 厚くて強靱な塗膜であるため, 塗膜にクラックの発生は認められなかった。この結果, せん断応力は端面から離れた位置にまでおよび, 広い領域にわたって, めっき層の剥離が発生した。

一方, アクリル系塗膜の場合には (Photo. 2 の c), 塗膜に多数のクラックが発生しており, 端面近傍の狭い領域でのみ, めっき層の剥離が発生した。これはアクリル系塗膜の伸びが小さく, 塗膜にクラックが発生しやすいため, せん断応力が端面近傍で緩和されると考えられる。

4.2 打抜きクリアランスの影響

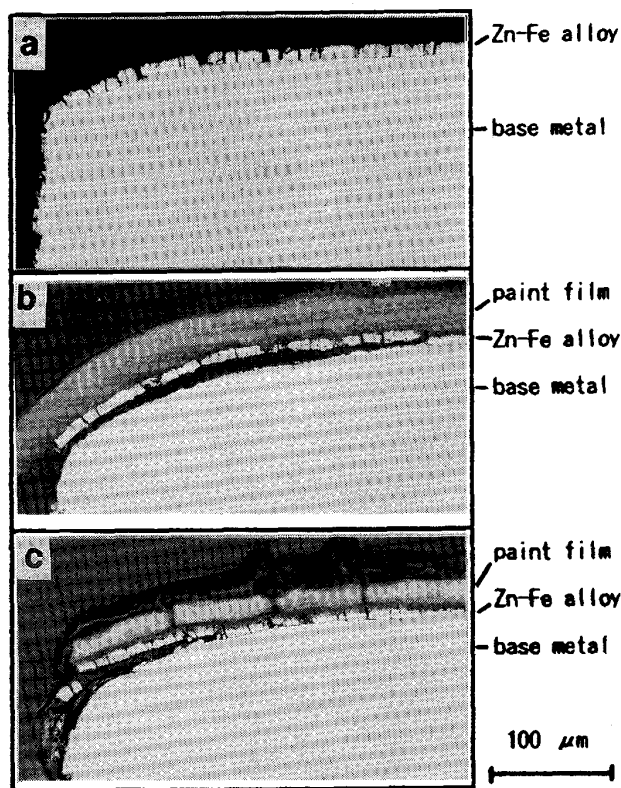
打抜き条件の影響を考察するには, エナメルヘアーが発生する打抜きだれ部の変形量を調査することが重要である。

しかし, こうした端面の微小領域での変形を定量的に調査することはきわめて困難であるので, ここでは鋼板のひずみ誘起粒成長現象を利用して, 変形量の打抜き条件による変化を定性的に調査することを試みた。

ここでひずみ誘起粒成長とは, 再結晶を完了した鋼板に微小変形を与えた後再結晶温度以上で焼鈍を施すと, 微小変形を受けた結晶粒が, 急速に異常成長する現象である⁶⁾。

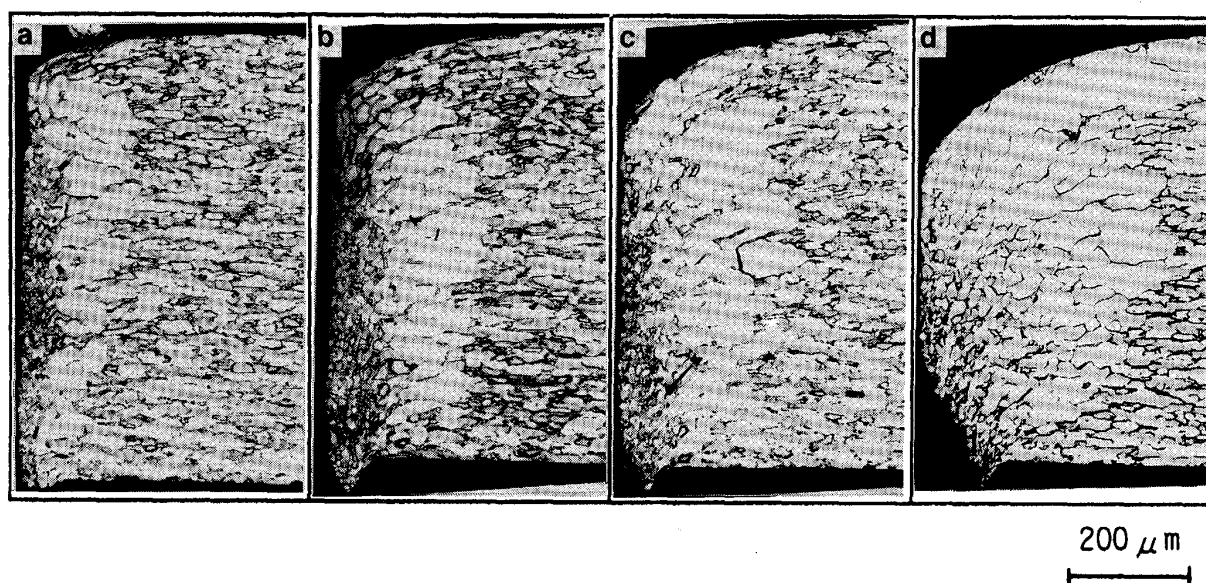
このひずみ誘起粒成長は変形量が微小な特定範囲内でのみ生じるため, 打抜き部断面の結晶粒を観察することによって, 微小変形を受けた領域と打抜き条件の関係を把握することが可能である。

厚さ 0.8 mm の焼鈍後調質圧延を行っていない低炭素アルミキルド冷延鋼板を各種の条件で打ち抜いた後, アルゴンガス雰囲気中で $730^{\circ}\text{C} \times 1\text{h}$ の焼鈍を施した。その後, 打抜き部断面のひずみ誘起粒成長の状況を光学顕微鏡により観察した。



a : Unpainted
b : Painted (polyester)
c : Painted (acryl)
Punching speed 210 mm/s
Clearance 0.050 mm 25°C

Photo. 2. Cross section of punched edge.



Clearance a: 0.025 mm b: 0.050 mm c: 0.075 mm d: 0.150 mm
Cold rolled steel sheet Punching speed 210 mm/s 25°C

Photo. 3. Effect of punching clearance on the deformation at the punched edge.

打抜き部断面のひずみ誘起粒成長におよぼすクリアランスの影響を Photo. 3 に示す。

いずれのクリアランスにおいても、端面では結晶は微細であり、この部分では変形量が非常に大きいことが認められた。

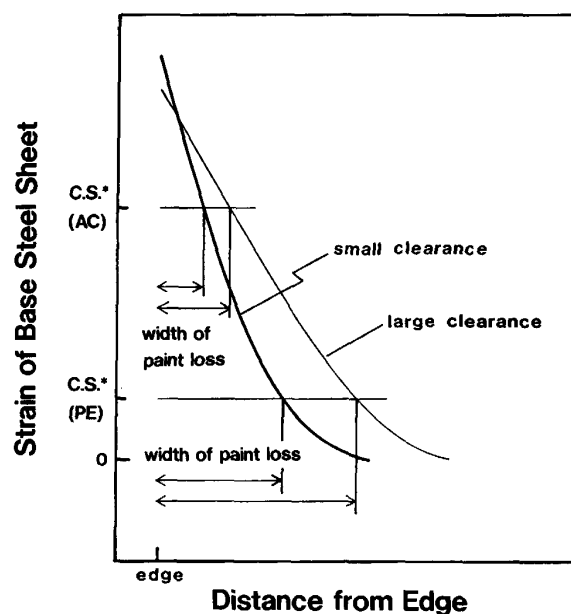
しかし、端面から離れて鋼板内部に入るにしたがって一定量の微小変形を受けるようになり、異常粒成長の生じている領域が現れた。さらに端面から離れるとほとんど変形を受けず、異常粒成長は認められなくなった。

以下、この異常粒成長を起こした領域の変化を調査し変形量におよぼすクリアランスの影響について、検討を行った。

めっき層の剝離が発生する、打抜きだれ部に注目すると、クリアランスが大きくなるにつれて、異常粒成長の領域が広くなり変形領域が広がった。

ここで、クリアランスの大きさが、端面から比較的に離れた位置における変形量に与える影響に注目すると、クリアランスが小さい場合、端面から離れた位置では異常粒成長を起こさないのに対して、クリアランスが大きくなると異常粒成長が認められることより、クリアランスの増加にしたがい、変形量は増加していることが分かる。

一方端面のごく近傍については、変形量の差が明確に認められなかった。しかし R. PEARCE⁷⁾ は、硬度測定の結果から端面のごく近傍においては、クリアランスが大きくなるほど変形量が減少すると報告しており、クリアランスが大きくなると、端面へのひずみの集中が緩和されると思われる。



* C.S. shows the critical strain at which paint loss occurs.
PE: Polyester AC: Acryl

Fig. 5. Schematic diagram showing behavior of paint loss.

以上のことから、打抜き端面からの距離と母材の変形量との関係が、打抜きクリアランスによってどう影響されるかを理解するため、Fig. 5 にその考え方を模式的に示した。

端面からの距離に対して変形量をプロットすると、クリアランスに関係なく、変形量は端面で最も大きく、端面から離れるにつれて減少する。しかし、クリアランス

が変わると、この変形量の曲線は同一の曲線では示すことができない。

Photo. 3 および R. PEARCE らの結果より、端面のごく近傍では、クリアランスが小さくなるほど変形量は大きくなり、端面から離れた位置では、反対にクリアランスが大きくなるほど変形量は大きくなり、クリアランスの異なる 2 本の曲線は交差する。

ここでめっき層が剝離を開始する変形量を剝離限界変形量と称することにする。

めっき層の剝離が、この剝離限界変形量をこえる領域で発生すると考えると、Fig. 5 において、変形量の曲線と剝離限界変形量との交点から端面までの領域においてめっき層の剝離が発生するものと考えられる。

ここで Fig. 1 の現象は、Fig. 5 の模式図に示すように、剝離限界変形量が塗膜によって異なり、粉体ポリエステル系塗膜においては小さく、アクリル系塗膜においては大きいと考えると説明が可能である。

4.3 打抜き速度と打抜き温度の影響

打抜き速度の増加と打抜き温度の低下は、ともに塗膜の変形を抑制すると言われている³⁾。したがって塗膜が母材の変形に追随しにくくなり、めっき層と母材の界面にかかるせん断応力が增大して、剝離量が増加したものと考えられる。

4.4 塗膜保護フィルムの影響

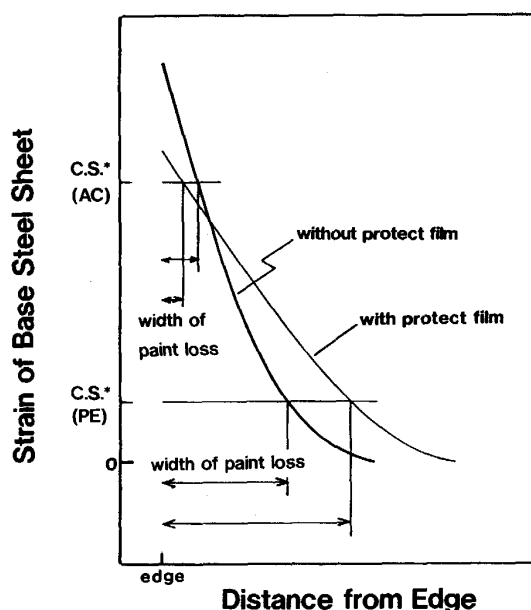
塗膜保護フィルムをはりつけて打抜きを施した場合の打抜き部断面におけるひずみ誘起粒成長の変化を Photo. 4 に示す。

保護フィルムがある場合、フィルムがない場合に比べ

て打抜きだれ部の異常粒成長を起こした領域が広がっており、変形領域が鋼板内部まで広がっている。

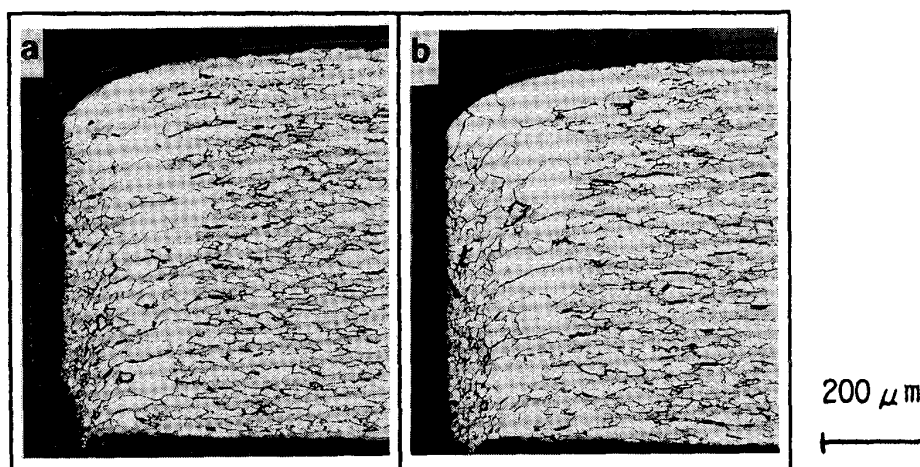
このことから、保護フィルムをはりつくと、クリアランスを大きくした場合と同様の影響があることが分かる。すなわち、端面のごく近傍では、フィルムをはりつけていない方が変形量は大きく、また端面から離れた位置では、反対にフィルムをはりつけた方が変形量は大きいと考えられる。

保護フィルムをはりつけることにより、打抜き端面か



* C.S. shows the critical strain at which paint loss occurs.
PE: Polyester AC: Acryl

Fig. 6. Schematic diagram showing behavior of paint loss.



a: Without protect film b: With film
Cold rolled steel sheet Punching speed 210 mm/s Clearance 0.050 mm 25°C

Photo. 4. Effect of protect film on the deformation at the punched edge.

らの距離と母材の変形量との関係がどう影響されるかを理解するために、Fig. 5 と同様の手法で作成した模式図を Fig. 6 に示す。

保護フィルムをはりつけた場合と、はりつけていない場合の2本の変形量の曲線は、Fig. 5 と同様に交差すると考えられる。

Fig. 4 の現象は、粉体ポリエステル系塗膜の剝離限界変形量が2本の曲線の交点の値より小さく、アクリル系塗膜の剝離限界変形量がこの交点の値より大きいと考えると説明できる。

5. 結 言

合金化溶融亜鉛めっき鋼板を原板とするプレコート鋼板の打抜き加工時に発生するエナメルヘアーについて塗膜の種類および打抜き条件の影響を調査し、以下の結果を得た。

(1) 打抜きクリアランスが大きくなるにつれて、めっき層の剝離量は増加した。剝離量は粉体ポリエステル系塗膜で非常に多く、アクリル系塗膜では少なかった。

(2) 打抜き速度の増加と温度の低下は、剝離量を増加

させた。この傾向は剝離量の多い粉体ポリエステル系塗膜で顕著であった。

(3) 塗膜保護フィルムをはりつけて打抜きを行った場合、粉体ポリエステル系塗膜では剝離量が増加し、アクリル系塗膜では逆に減少した。

(4) ひずみ粒成長を利用して、打抜き端面近傍の母材の変形状況を調査した。得られた結果と塗膜の性質を考慮することにより、エナメルヘアーの挙動を説明することが可能である。

文 献

- 1) 塩田明俊, 野村伸吾, 小久保一郎: 鉄と鋼, **70** (1984), S472
- 2) 中森俊夫, 渋谷敦義: 鉄と鋼, **70** (1984), S1125
- 3) 西原 實, 塩田俊明, 松尾左千夫, 荻岐島健司: 金属表面技術, 第70回学術講演大会要旨集 (1985), p. 114
- 4) 中森俊夫, 渋谷敦義: 鉄と鋼, **71** (1985), S1273
- 5) 塩田明俊, 野村伸吾, 小久保一郎: 神戸製鋼技報, **36** (1986), p. 102
- 6) G. RIONTINO, C. ANTONIONE, L. BATTEZZATI, F. MARINO and M. C. TABASSO: J. Mater. Sci., **14** (1979), p. 86
- 7) R. PEARCE and A. A. MAZHAR: Met. Technol. (1976) July, p. 338