

論 文

UDC 669.14.018.583 : 621.3.048.2 : 678.742.2 : 621.785.3

絶縁皮膜を有する電磁鋼板の打ち抜き性と溶接性*

中 村 元 治** ・ 岡 田 弘***
 松 井 清**** ・ 北 山 実**

A Study on Punchability and Weldability of Electrical Steel Sheets with the Insulating Coating

Motoharu NAKAMURA Hiroshi OKADA,
 Kiyoshi MATSUI, and Minoru KITAYAMA

Synopsis:

A study on the punchability and weldability of electrical steel sheets with the insulating coating has brought to the following conclusions:

- 1) A new inorganic-organic insulating coating improves the punchability of electrical steel sheets by more than 30 times compared with the conventional inorganic insulating coating.
- 2) The reason for this marked improvement in punchability cannot be explained by the shearing energy involved.

Probably, the addition of organic matter decreases the side wear of the punch.

- 3) The weldability of electrical steel sheets with the new insulating coating is impaired by the gas evolved through the thermal decomposition of organic matter contained.

Release of this gas from around weld beads can enhance weldability.

An industrially advantageous method is to roughen the electrical steel sheet or the insulating coating itself.

In this way, a process has been established under which an inorganic-organic insulating coating is used as the surface coating of electrical steel sheets to satisfy their punchability and weldability requirements at the same time.

1. 緒 言

モーターやトランスに使用される電磁鋼板は、その渦電流損を減少させる目的で絶縁皮膜が施されている。この絶縁皮膜は層間抵抗のほか、作業面から、耐食性、耐熱性、打ち抜き性、溶接性などの多数の特性が要求される。これらの要求を満たすために、従来 AISI “C-4”¹⁾ 相当の無機系皮膜が用いられており、この皮膜は耐熱性、溶接性はすぐれているが、打ち抜き性が劣る欠点を有している。一方、AISI “C-3”¹⁾ 相当の有機系皮膜も用いられており、この皮膜は打ち抜き性はすぐれているが、溶接性、耐熱性が劣っている。

近年、家庭電化用電磁鋼板として、打ち抜き性と溶接性を同時に満足させる皮膜の要望が増大してきた。そこで、AISI “C-4” と “C-3” の長所を兼ね備えた無機—

有機混合皮膜が開発された。

今回は無機系皮膜、無機-有機混合皮膜の打ち抜き性を調査すると同時に、無機-有機混合皮膜の打ち抜き性が向上する機構を考察した。

また、溶接時のブローホールの発生機構を考察することにより、無機-有機混合皮膜の溶接性を改善する方法を考案し、打ち抜き性と溶接性を同時に満足させる方法を確立した^{2)~4)}。その結果を報告する。

2. 実 験 方 法

2.1 供試材

供試材は焼なまし後の無方向性電磁鋼板で、その化学成分、機械的性質を Table 1 に示す。この鋼板の表面に無機系処理液 (略称R) [重クロム酸マグネシウム-磷酸マグネシウム-硼酸混合液]、及び、無機-有機混合処理

* 昭和 54 年 10 月 18 日受付 (Received Oct. 18, 1979)

** 新日本製鉄(株)広畑製鉄所 (Hirohata Works, Nippon Steel Corp., 1 Fuji-cho Hirohata-ku Himeji 671-11)

*** 新日本製鉄(株)君津製鉄所 (Kimitsu Works, Nippon Steel Corp.)

**** 兼松エンジニアリング(株) (Kanematsu Engineering Co., Ltd.)

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of work material.

Work material	Chemical compositions						Mechanical properties			
	C	Si	Mn	P	S	sol. Al	YP	TS	El	Hv
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(kg/mm ²)	(kg/mm ²)	(%)	(5kg)
A-1	0.040	0.06	0.24	0.020	0.015	0.002	31.8	38.8	34.3	116
A-2	0.006	0.30	0.25	0.070	0.015	0.002	28.9	39.6	41.3	115

液 (略称 L₂) [重クロム酸マグネシウム-硼酸-ポリアクリルタイプエマルジョン樹脂] をパイロットラインで塗布, 焼付けて, 打ち抜き性, 溶接性の試験に用いた. また, 単発打ち抜き試験用としては 50×300 mm の小試験片に小型ロールで塗布し, 焼付けて用いた.

2.2 実験方法

2.2.1 連続打ち抜き試験

AIDA 30 ton プレスで連続打ち抜き試験を実施した. 打ち抜き条件は①打ち抜き型材質: SKD-1, ②打ち抜き速度: 197 回/min, ③打ち抜き形状: 10 mm 角, ④クリアランス: 6% (板厚: 0.5 mm に対して), ⑤打ち抜き油: 軽油, または SY-7D (油研工業製), であつた. 材料は Table 1 の A-1 を用いた. 打ち抜かれたブランクは所定枚数ごとに採取し, 次の項目の調査に用いた.

(1) かえり高さの測定

かえり高さは傾射投影法を応用した装置により, 各ブランクの L, C 方向を 3 点ずつ測定し, 各 5 枚の測定値の平均値として求めた.

(2) ブランクの外径寸法の変化

ブランクの L, C 方向の外径をマイクロメータで測定し, ダイス径との差からブランクの寸法変化を求めた.

(3) ブランクの切り口断面の変化

ブランクの切り口断面の変化を調査するために, 各ブランクの L, C 方向を樹脂に埋め込み, 研磨後, 顕微鏡で 100 倍にして, 切り口断面からだれ面, せん断面, 破断面の割合, 及びだれ長さを求めた. L, C 方向を各 3 枚ずつ測定し, その平均値を求めた.

(4) ブランクの切口断面の表面あらさの変化

だれ面, せん断面, 破断面の表面あらさを試料微量移動装置を用いて, 触針式表面あらさ計で H_{max}. 表面プロフィールを求めた. また走査型電子顕微鏡でブランクの断面を観察した. 特にせん断面では 2 次電子線強度によるラインプロフィールも測定した.

(5) 工具の摩耗状況

打ち抜き終了後のポンチの摩耗量は樹脂で型取りし, この樹脂を切断した後, 投影器で拡大し, 摩耗状況をスケッチして求めた. 摩耗面積はスケッチの摩耗部をナイフで切り取り, 精密天秤で 0.1 mg まで精秤して, 既知面積の重量との比較から求めた.

2.2.2 単発打ち抜き試験

無機-有機混合皮膜の打ち抜き性が向上する機構を考察するために, 単発打ち抜き試験を実施した. 打ち抜き条件は①打ち抜き型材質: SKD-1, ②打ち抜き速度: 60 回/min, ③打ち抜き形状: 20 mmφ, ④クリアランス: 7% (板厚: 0.5 mm に対して), ⑤打ち抜き油: なし, 及び SY-7D であつた. 材料は Table 1 の A-1 を用いた. また打ち抜き曲線を求めるためにポンチに 8 枚のストレンゲージを貼付し, これより動ひずみ計を通じて, シンクロスコープの Y 軸に接続してせん断荷重を求めた. ストロークは左右に取付けた片持梁型変位計により, 左右の変位の平均値を取り出して, シンクロスコープの X 軸に接続した. 打ち抜く瞬間にシンクロスコープのスクリーン上に画かれた打ち抜き曲線を写真撮影した. 打ち抜き曲線の面積を重量法で求めて, これよりせん断エネルギーを計算した. 1 条件につき 5 枚ずつ打ち抜き, その平均値を求めた. 打ち抜かれたブランクを用いて, かえり高さ, せん断面の割合, X線マイクロアナライザによるだれ面の皮膜剝離状況, せん断面への剝離皮膜粉の付着状況を観察した.

2.2.3 TIG 溶接試験

表面処理を施した試験片を積層し, その断面を TIG 溶接した. 溶接機はダイヘン製アルゴンアーク溶接機を用い, 溶接条件は①電流: 120 A, ②締付圧力: 100 kg/cm², ③Ar ガス量: 6 l/min, ④開先: なし, ⑤電極ギャップ: 1.3 mm, ⑥溶接姿勢: 下向き水平, ⑦電極材質: 2% Th-W, ⑧電極径: 2.4 mmφ であつた. 材料は Table 2 の A-2 を用いた. 溶接速度を 5~120 cm/min

まで変化させて、ブローホールの発生しない最高速度を求めた。

2.2.4 示差熱天秤による熱分析

無機-有機混合処理液をガラス板上に塗布、焼付けし、この皮膜をナイフで削り取つて、示差熱天秤の試料とした。測定には理学電機製示差熱分析装置を用いて、測定条件は①試料採取量；12 mg，②標準試料； α - Al_2O_3 ，③加熱速度； $20^\circ\text{C}/\text{min}$ ，④感度；TGA，10 mg，DTA， $\pm 100 \mu\text{V}$ ，⑤チャートスピード；5 mm/min とした。

3. 実験結果

3.1 打ち抜き性に及ぼす表面皮膜の影響

3.1.1 連続打ち抜き試験による打ち抜き性の調査

無機系皮膜（略称R），無機-有機混合皮膜（略称L₂）の連続打ち抜き試験結果を Fig. 1 に示す。この結果、従来使用されている無機系皮膜では2万回の打ち抜きを超えるとかえりが大きくなりはじめ、8万回で50 μm に達し、10万回で70 μm に達したので、実験を中止した。これは従来報告されている電磁鋼板の無機系皮膜の打ち抜き試験結果とほぼ同じ試験結果⁵⁾⁶⁾となつている。これに対して、無機-有機混合皮膜では50万回までほとんどかえりの増加はなく、その後漸増するが、300万回後でもかえり高さは35 μm であつた。

次にブランクの寸法変化を Fig. 2 に示す。無機系皮膜では2, 3, 5万回と打ち抜き回数の増加とともに16, 18, 20 μm と徐々に増加し、10万回後では23 μm とな

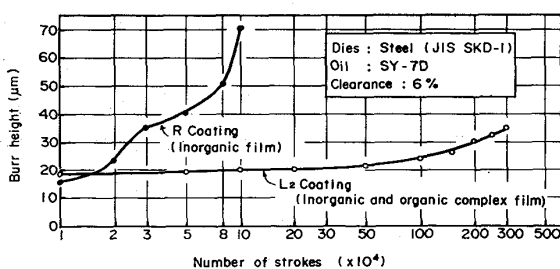


Fig. 1. Relationship between burr height and number of strokes.

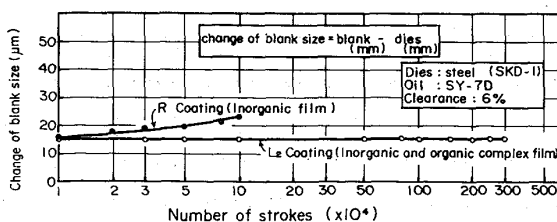


Fig. 2. Relationship between change of blank size and number of strokes.

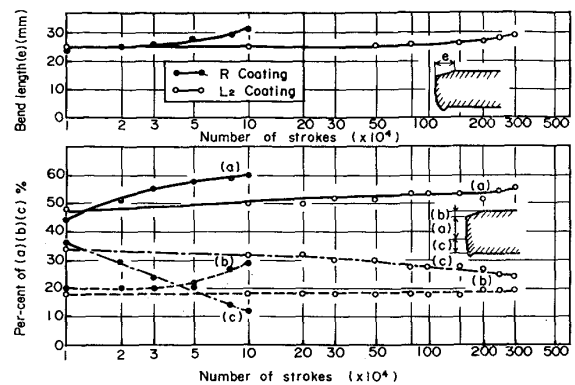


Fig. 3. Relationship between cross section of blank and number of strokes.

つた。また5万回以上ではブランクに曲がり認められた。これに対して、無機-有機混合皮膜では打ち抜き開始直後から300万回打ち抜き終了時点まで15 μm でほとんど変化がなく安定していた。またブランクの曲がりも認められなかった。

次に打ち抜きブランクの切り口断面の形状変化を Fig. 3 に示す。無機系皮膜では10万回まで増加するにつれて、(a)のせん断面は44%から60%へ、(b)のだれ面は3万回まではほとんど20%で変化がなく、その後は徐々に増加し、10万回後では29%となつた。(c)の破断面はせん断面とは逆に36%から漸減し、10万回後では12%まで減少した。次に打ち抜きブランク表面のだれの長さ(e)は(b)のだれ面と同様に3万回まではほとんど変化がなく、10万回後では31 mm まで長くなつた。これに対して無機-有機混合皮膜では(a)のせん断面は48%から300万回後でも56%に増加しただけであつた。また(b)のだれ面もほとんど変化がなく、300万回後でも18%から20%に増加しただけであつた。(c)の破断面は34%から25%に減少し、(e)のだれの長さは25 mm から300万回後には29 mm まで長くなつた。

以上の結果、無機-有機混合皮膜は10 mm 角の単純な形状で打ち抜いた場合、300万回打ち抜き後のかえり高さが35 μm とスチール金型でも超硬金型での打ち抜きに匹敵する打ち抜き性が得られた。また従来の無機系皮膜に比べ、30倍以上のすぐれた打ち抜き性を示し、ブランクの寸法変化、切口の断面形状の変化も非常に小さかつた。ブランクの寸法、切口断面形状の変化はかえり高さとはよく対応し、かえり高さの測定により現場の製品管理が可能であると考えられた。

次にブランクの断面の走査型電子顕微鏡、触針式表面あらさ計による測定結果を Fig. 4, 5 に示す。表面あら

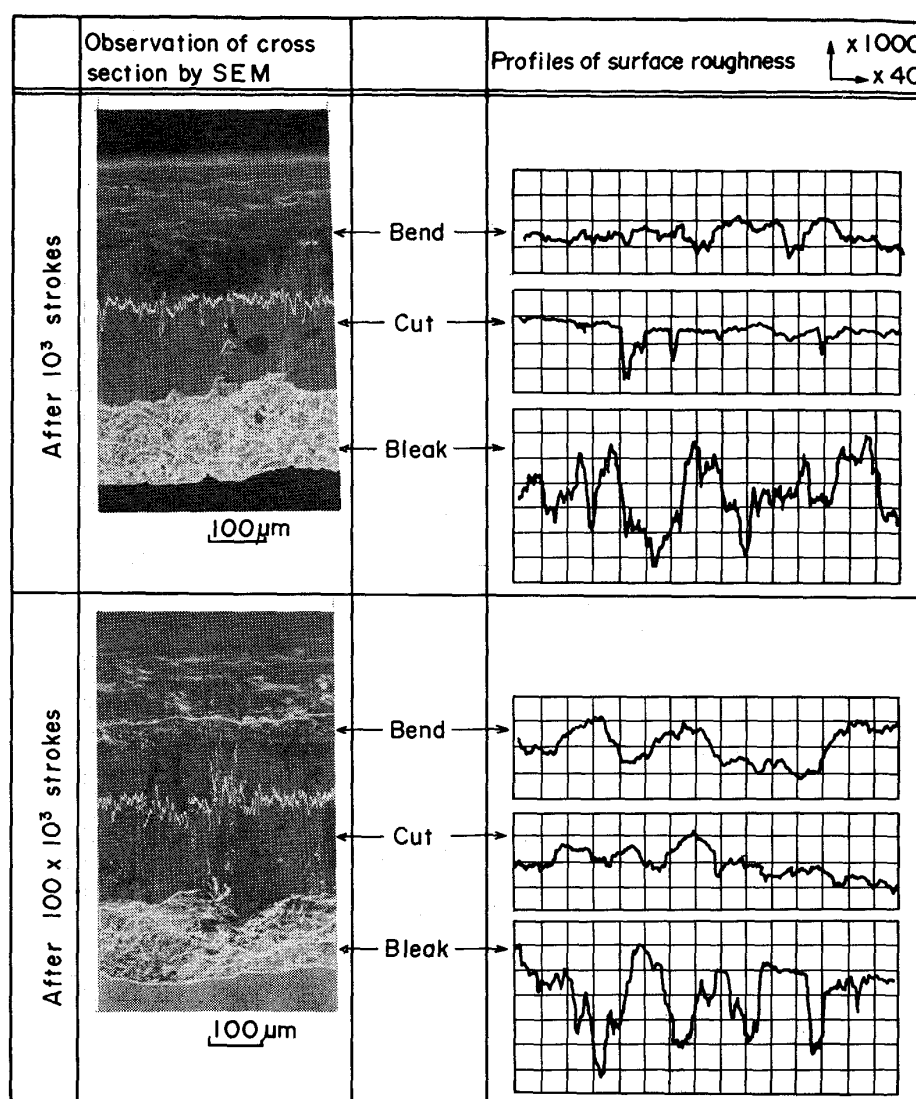


Fig. 4. Cross section of blank by SEM and profiles of surface roughness (R coating).

さのプロファイルで特にせん断面に注目すると、千回後でも非常に深く削られた所が認められ、10万回後では凹凸がはげしく工具の側面も相当荒れていることが推定できた。千回後の H_{max} はだれ面、せん断面、破断面でそれぞれ8, 8, 25 μm であり、10万回後ではそれぞれ10, 10, 25 μm と若干増加していた。次に無機-有機混合皮膜のせん断面の表面プロファイルでは千回後、300万回後とも凹凸は非常に少なく、工具の表面も摩耗が少なく、きれいなことが推定できた。千回後の H_{max} はだれ面、せん断面、破断面でそれぞれ9, 4, 23 μm であり、300万回後でもそれぞれ6, 4, 20 μm でほとんど変化がなかった。

走査型電子顕微鏡による観察結果では千回打ち抜き後のブランクのだれ面には異常は認められないが、10万回後はだれ面、せん断面が非常に荒れていた。またせん断面の2次電子線強度によるラインプロファイルでも凹凸が

はげしかつた。これに対して、無機-有機混合皮膜のだれ面、せん断面は千回、300万回後とも荒れは認められず、せん断面のラインプロファイルでは小さな凹凸は認められるが、きれいなせん断面を有しており、この結果からも工具の摩耗が少ないことが推定できた。

次に無機系皮膜、無機-有機混合皮膜の打ち抜き終了後のポンチの摩耗状況を Fig. 6 に示す。無機系皮膜を10万回打ち抜き後のポンチの摩耗状況では端面摩耗長さが250 μm 、側面摩耗長さが420 μm である。特に側面摩耗はその長さよりも深さが重要であり、50 μm 以上の深さで摩耗した所の長さが250 μm もあり、側面が著しく摩耗していることがわかった。その摩耗面積は1.89 cm^2 であつた。これに対して、無機-有機混合皮膜を300万回打ち抜き後の摩耗状況は端面摩耗長さ200 μm 、側面摩耗長さ340 μm であるが、その深さは無機系皮膜に比べて非常に小さく、その摩耗面積も0.76 cm^2 で無機系

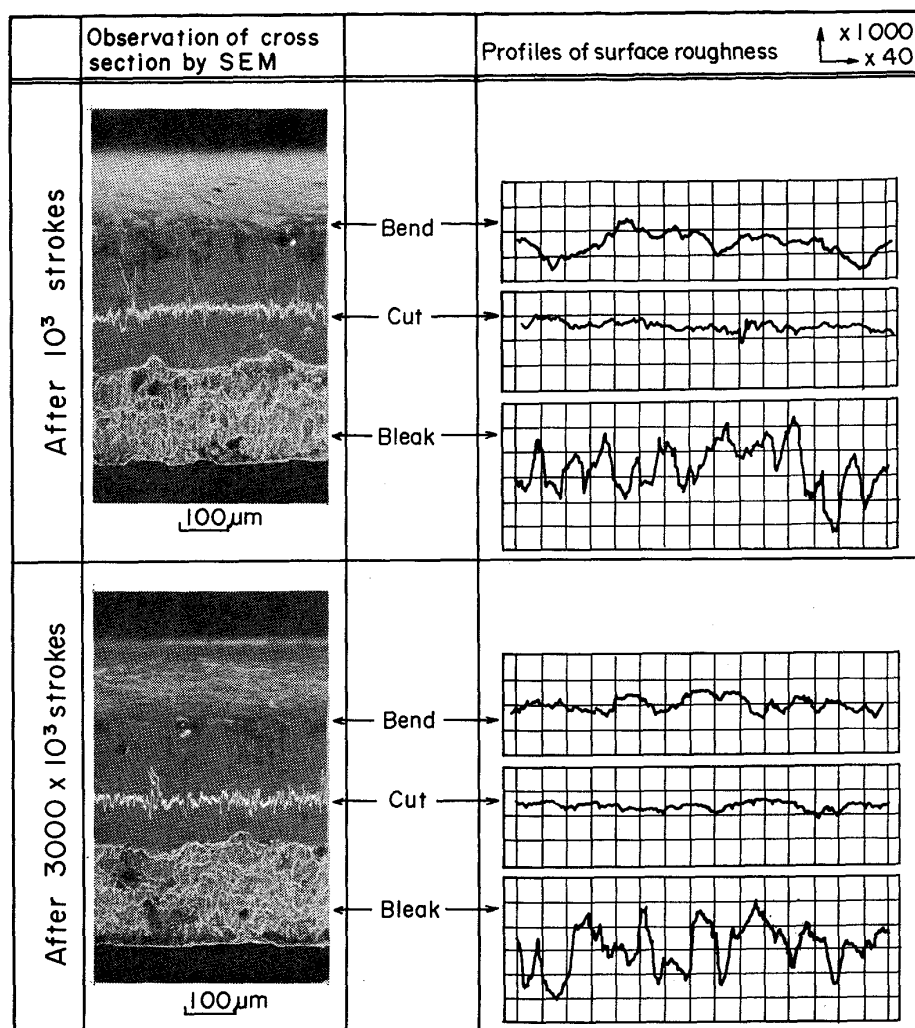
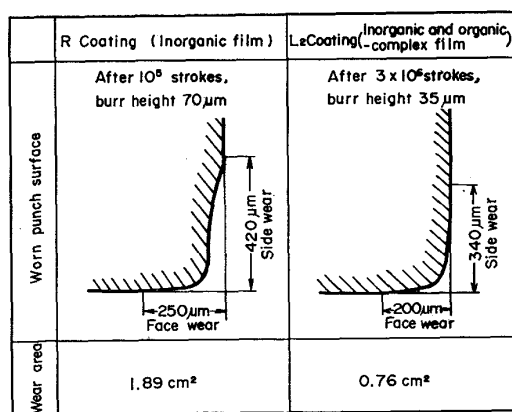
Fig. 5. Cross section of blank by SEM and profiles of surface roughness (L_2 coating).

Fig. 6. Comparison of worn punch surface. (punch : SKD-1, oil : SY-70, clearance : 6%)

皮膜の半分以下であった。工具の摩耗とかえりの関係については今までに多くの人々^{7)~11)} によって検討されている。本実験結果からはかえりの発生には側面摩耗の影響が最も大きいことがわかった。側面摩耗は鋼板のせん

断面との摩擦、ダイス側面の摩耗部に介在したかえりととの摩擦、刃先摩耗にともなう側圧力の増加によつて起こるといわれている¹¹⁾。無機-有機混合皮膜のせん断面は Fig. 5 のように非常にきれいな、凹凸の小さな面を有しているため摩擦は小さかつたと考えられる。また側圧力は潤滑剤の潤滑効果で 13~58% 減少することが報告されている¹²⁾。無機-有機混合皮膜中の有機物は潤滑剤として働くことから、側圧力を減少して、側面摩耗をおさえていると考えられる。

3.1.2 単発打ち抜き試験による打ち抜き性の調査

無機系皮膜と無機-有機混合皮膜の打ち抜き性の差を更に詳細に検討するために単発打ち抜き試験を実施した。単発打ち抜き試験によるせん断エネルギーの測定結果を Fig. 7 に示す。これより、打ち抜き油を使用しない場合は、原板で 365 kg-mm、無機系皮膜で塗布量が 1, 2, 3 g/m² の場合はそれぞれ 390, 402, 404 kg-mm で原板に比べて大きく、塗布量の増加とともに大きくなった。これに対して、無機-有機混合皮膜で塗布量が 1, 2,

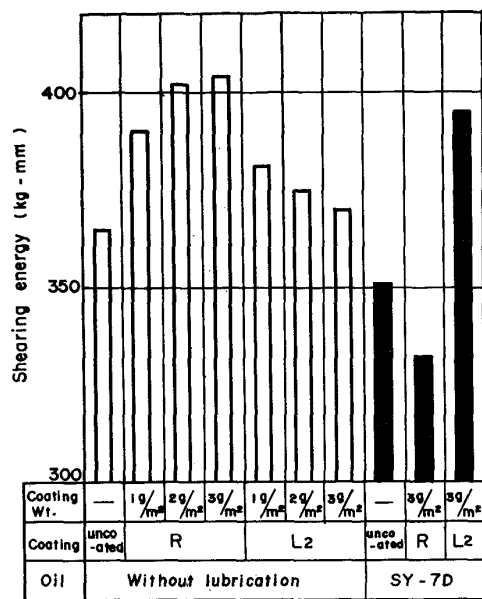
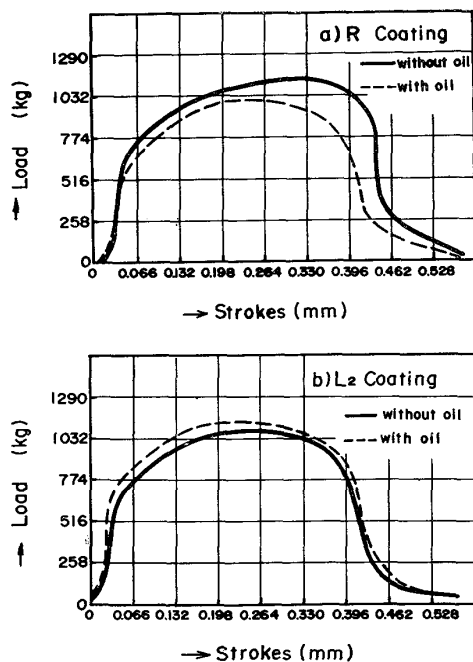


Fig. 7. Relationship between shearing energy and coating.

Fig. 8. Typical curve of punching.
(specimen : 0.5 mm thick)

3 g/m² の場合はそれぞれ 381, 375, 370 kg-mm と塗布量の増加とともに小さくなっており、無機系皮膜に比べて小さかった。しかし両者共原板に比べると大きかった。次に打ち抜き油を使用した場合は、原板で 351 kg-mm、無機系皮膜で 3 g/m² の場合には 332 kg-mm と打ち抜き油の使用により減少した。これに対して、無機-有機混合皮膜の 3 g/m² の場合は逆に 395 kg-mm と増加した。打ち抜き油を使用することによりせん断エネルギー

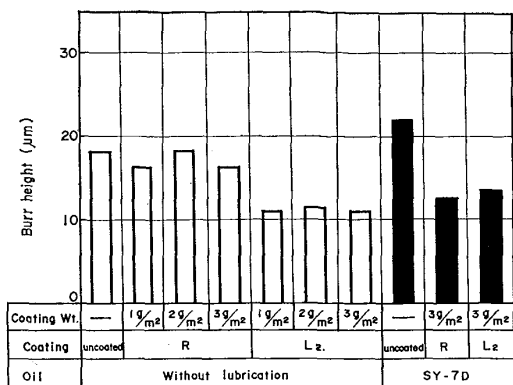


Fig. 9. Relationship between burr height and coating.

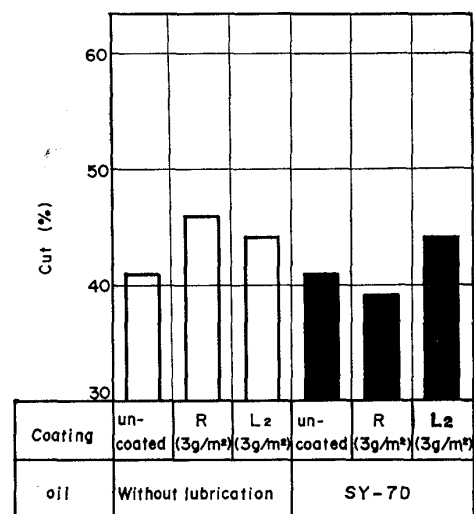


Fig. 10. Relationship between cut of blank and coating.

が減少することは水野⁵⁾、齊藤¹²⁾ らにより報告されているが、無機-有機混合皮膜の場合のようにせん断エネルギーが打ち抜き油を使用しても減少しない理由、また原板に比べてかなり大きくなっている理由はわからない。無機系皮膜、無機-有機混合皮膜の打ち抜き油有無の打ち抜き曲線を Fig. 8 に示す。

助川¹¹⁾、前田¹³⁾ らによるとせん断エネルギーとかえり高さはよく対応し、せん断エネルギーが増加するとかえり高さも増加し、ポンチの摩耗も大きくなると述べている。また水野⁵⁾ らはせん断エネルギーと皮膜の摩擦係数の測定、クリアランスの大きいやや摩耗した打ち抜き型による単発打ち抜き時のかえり高さなどを総合することにより、打ち抜き性の簡易判定法として用いられると述べている。これに対して、前田、青木¹⁴⁾ はペーナイト鋼薄板の打ち抜き工具の摩耗について調査し、ペーナイト鋼 A (Hv 290) はペーナイト鋼 B (Hv 440) よりもポンチの摩耗量は大きい、せん断エネルギーは逆に B の方が大き

く、工具の摩耗はせん断エネルギーでは説明できず、表面の酸化皮膜の密着性が重要で、この剥離した粉が工具の摩耗の重要な因子の一つであろうと述べている。本実験でも無機-有機混合皮膜の打ち抜き性はせん断エネルギーから推定することは困難で他の因子を考える必要がある。

次に打ち抜かれたブランクのかえり高さの測定結果を Fig. 9 に示す。これらは同一材料でほとんど同時に打ち抜かれているので、工具の摩耗は関係なく、表面皮膜の影響を示していると考えられる。これより、打ち抜き油を使用しない場合は、原板で $18\ \mu\text{m}$ 、無機系皮膜の塗布

が $1, 2, 3\ \text{g/m}^2$ の場合はそれぞれ $16, 18, 16\ \mu\text{m}$ であり、無機-有機混合皮膜の塗布量が $1, 2, 3\ \text{g/m}^2$ の場合は $11, 12, 11\ \mu\text{m}$ で原板や無機系皮膜に比べてかえり高さが明らかに低くなった。打ち抜き油を使用した場合は原板で $22\ \mu\text{m}$ 、無機系皮膜の $3\ \text{g/m}^2$ の場合は $12.5\ \mu\text{m}$ 、無機-有機混合皮膜の $3\ \text{g/m}^2$ の場合には $13.5\ \mu\text{m}$ であった。せん断エネルギーの場合と同様に無機系皮膜では打ち抜き油使用によりかえり高さも減少したが、無機-有機混合皮膜の場合には打ち抜き油の効果は認められなかった。

次にブランクのせん断面率を Fig. 10 に示す。打ち抜

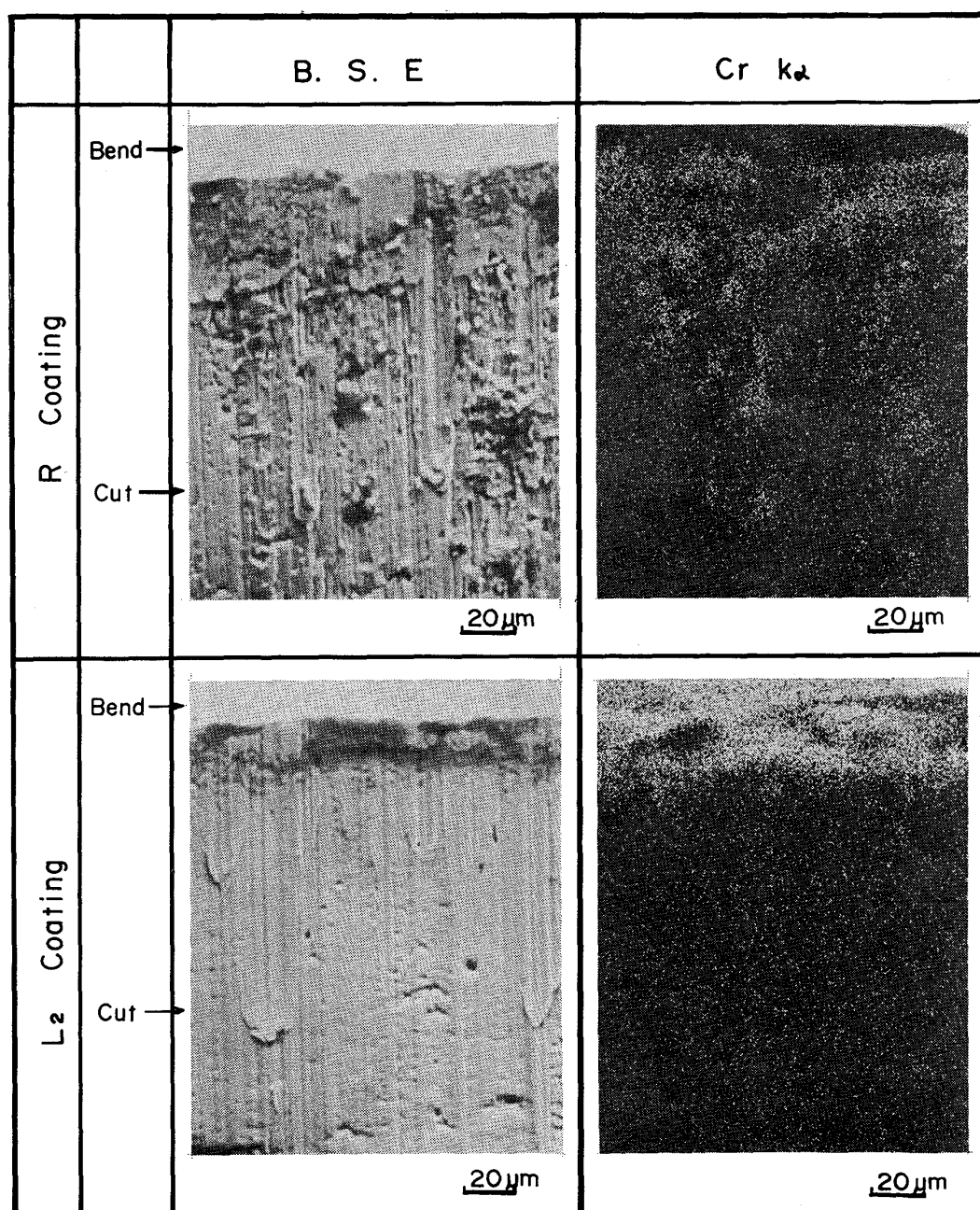


Photo. 1. Observation of bend and cut of punched blank by X-ray micro analysis. (EPMA)

きを使用しない場合、原板で 41%，無機系皮膜の 3 g/m^2 の場合は 46%，無機-有機混合皮膜の 3 g/m^2 の場合は 43.5% であつた。打ち抜き油を使用した場合は原板で 41% と変わらず、無機系皮膜の 3 g/m^2 の場合は 39% と大幅に減少し、無機-有機混合皮膜では 43.5% と変化がなかつた。

ブランクのだれ面、せん断面の X 線マイクロアナライザによる測定結果を Photo. 1 に示す。無機系皮膜ではせん断面が著しく荒れており、深い傷が認められると同時に皮膜の剝離物と思われるものが付着していることがわかつた。切断面の Cr の面強度分析を行つたところ、だれ面にはほとんど Cr が検出されず、打ち抜き時にポンチの先端が皮膜に接触した時点で皮膜が剝離してしまつたと考えられる。このためポンチの刃先が鋼板の金属面と直接接するようになり、刃先摩耗が進行すると考えられる。また、せん断面に Cr の高濃度部が存在していることから、剝離した皮膜粉が付着していることが確認できた。これらせん断面に付着した無機皮膜成分によつてポンチの側面が摩擦されて、側面摩耗を促進すると考えられる。これに対して、無機-有機混合皮膜ではせん断面は鋭利なナイフで切断したようにきれいにせん断されており、この面の Cr の面強度を分析したところ、だれ面にはつきりと Cr の高濃度部が観察され、だれ面の皮膜が剝離していないことがわかつた。せん断面の Cr はほとんど検出されないことから、せん断面への皮膜粉の付着は少ないと考えられる。そこで無機-有機混合皮膜の工具の摩耗の少ない理由は次のように説明できる。まず打ち抜きの初期の段階でポンチが鋼板表面と接触すると、鋼板は少し曲げられポンチ端面上を滑る。この時、鋼板表面の皮膜の潤滑効果により端面摩耗がおさえられる。次にポンチが少し鋼板に食い込む時、皮膜の密着性がすぐれているのでポンチの刃先の摩耗を防止する。刃先の摩耗が少ないこと、せん断面に付着した少量の皮膜粉が潤滑剤として作用することによつてきれいなせん断面が得られ、このために側面摩耗がおさえられると考えられる。このようにして無機系皮膜に比べて著しく工具の摩耗が少なく、このためにすぐれた打ち抜き性が得られたと考えられる。

3.2 溶接性に及ぼす表面皮膜の影響

3.2.1 溶接性に及ぼす表面皮膜中の有機物の影響

Table 1 の 0.3%Si 材 (表面あらさ; $0.2 \mu\text{m Hr. m. s}$) を用いて無機-有機混合皮膜中の有機樹脂量を変えた場合の打ち抜き性と溶接性の関係を Fig. 11 に示す。打ち抜き性は $50 \mu\text{m}$ のかえりが発生するまでの打ち抜き回数であり、溶接性はブローホールが発生しない最高

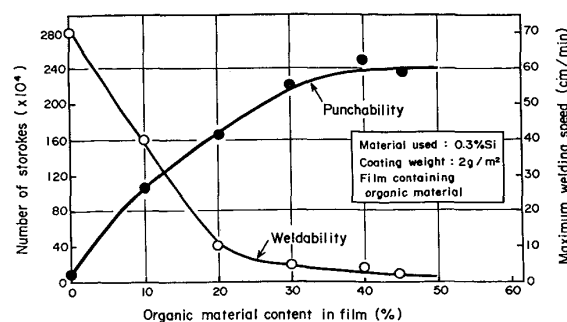


Fig. 11. Number of strokes when burr height of respective coating is $50 \mu\text{m}$ and maximum welding speed.

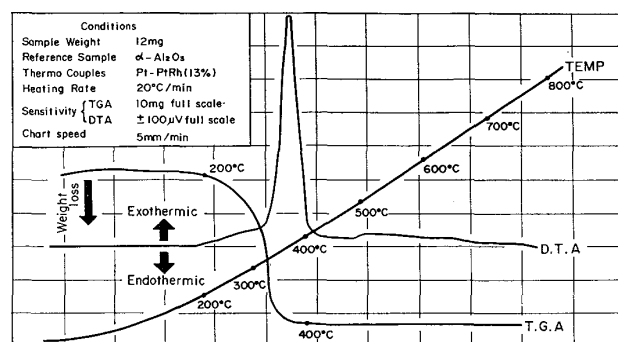


Fig. 12. TGA and DTA curves of L_2 coating containing organic material (40%). (poly acryl type emulsion)

溶接速度であつた。これより、皮膜中の有機樹脂量が 0, 10, 20, 30% と増加するとともに打ち抜き性は 5, 100, 170, 220 万回と向上して行き、40, 45% と有機樹脂量を増加しても 250, 230 万回とほぼ一定の値になつた。これに対して、溶接性は 0, 10, 20, 30% と有機樹脂量が增加するにつれてそれぞれ 70, 40, 10, 5 cm/min と溶接速度が遅くなり、打ち抜き性と溶接性を同時に満足させることは困難であることがわかつた。次に皮膜中の有機物の挙動を調査するために、ポリアクリルタイプエマルジョン樹脂を含有する無機-有機混合皮膜の示差熱天秤による熱分析結果を Fig. 12 に示す。まず熱天秤の結果では、 200°C まで重量変化がなく、その後急激に重量減少が起り、 400°C 以上ではほぼ一定となり、それ以後は変化がなかつた。同時に測定した示差熱分析の結果でも熱天秤の測定結果と同じ傾向で、 200°C 以後に徐々に発熱し、 $340\sim 350^\circ\text{C}$ で急激な発熱反応を起こした。これはポリアクリルタイプエマルジョン樹脂の熱分解によると考えられる。この結果より、無機-有機混合皮膜の溶接性の不良の原因は皮膜中の有機樹脂が溶接熱によつて分解し、この時に発生したガスによると考えられる。そこで溶接時のブローホールの発生機構は

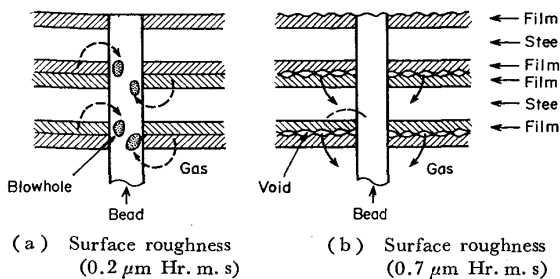


Fig. 13. Mechanism of blowhole at welding position.

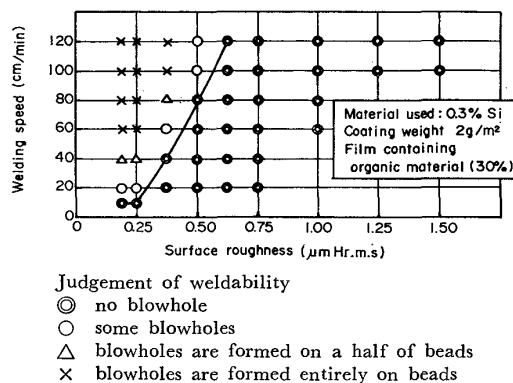


Fig. 14. Relationship between welding speed and surface roughness.

次のように考えられる。すなわち、Fig. 13(a) のように表面あらしの小さい無機-有機混合皮膜を有する鋼板を積層し、50~100 kg/cm² の圧力で締め付けて溶接すると、皮膜中の有機樹脂が熱分解してガスを発生する。このガスはビード部の熔融金属中をつき破つて放出されてビード部にブローホールが発生する。そこで Fig. 13(b) のように鋼板または皮膜そのものにあらしを与えて、発生したガスをビード周辺部から容易に放出できるようにすればブローホールのない良好な溶接性が得られると考えられる。このような考え方にもとづいて、鋼板表面にあらしを与えた場合の表面あらしと溶接性の関係を Fig. 14 に示す。これより、30% の有機樹脂を含有する無機-有機混合皮膜を 2 g/m² 塗布した場合の鋼板の表面あらしを Hr. m. s で 0.2 μm から 1.5 μm まで変化させると、ブローホールの発生がなく溶接できる速度は 0.3 μm 以下では 10 cm/min と劣るが、0.4 μm で 40 cm/min となり、0.5 μm では 80 cm/min と従来の無機系皮膜と同等となり、更に 0.6 μm 以上のあらしでは 120 cm/min 以上と良好な溶接な溶接性が得られることがわかった。また皮膜そのものにあらしを与える方法として、従来の無機-有機混合皮膜に 2 μm 以上の粒子径を有する有機樹脂を分散させる方法が考えられる。ポリエチレン粉末樹脂を分散させた場合の結果を Fig. 15 に示す。これより、表面あらしは H_{max} で 4.0 μm とな

	Film containing PE powder (20 μm)
Photograph of surface (x50)	
Surface roughness x2000 x50	
Punchability strokes	280x10 ⁴ strokes, burr height 50 μm
Weldability	100 cm/min

Fig. 15. Characteristics of film containing PE powder.

り、50 μm のかえりが発生するまでに 280 万回の打ち抜き性が得られた。また溶接性もブローホールの発生することなく 100 cm/min の溶接速度で溶接できた。

以上のように、鋼板または皮膜そのものにあらしを与えることにより、打ち抜き性と溶接性を同時に満足させる方法が確立された。

4. 結 言

電磁鋼板の表面皮膜の打ち抜き性と溶接性について調査し、次の結論を得た。

1) 新しい無機-有機混合皮膜を用いることにより、従来の無機系皮膜に比べて、打ち抜き性が 30 倍以上に向上した。

2) 無機-有機混合皮膜の打ち抜き性が向上する理由は単発打ち抜き試験でのせん断エネルギー、ブランクのかえり高さ、せん断面率からは説明できず、有機物を混合することにより、皮膜の潤滑性、密着性が向上して、ポンチの摩耗が減少することによると考えられる。

3) 無機-有機混合皮膜の溶接性の不良の原因は皮膜中の有機物の熱分解により発生したガスであり、この発生したガスをビード周辺部から放出することにより、溶接性を向上させることができる。これには鋼板または皮膜そのものにあらしを与える方法が工業的に有利である。

これにより、電磁鋼板の表面皮膜として無機-有機混合皮膜を用いて、打ち抜き性と溶接性を同時に満足させる方法が確立された。

最後に本研究を発表することを許可された研究開発本部取締役、細木技術開発部長に感謝致します。また本研究を遂行するにあたり、単発打ち抜き試験についていろいろと助言下さった山田輝昭、西本裕三氏をはじめ、強力に実験を推進して下さいた電磁鋼管理課、技術研究室表面処理グループ、金相グループのみな様に感謝致します。

文 献

- 1) Amer. Iron Steel Inst. Steel Prod. Man. Flat Rolled Electrical Steel, March (1978)
- 2) 北山 実, 中村元治, 松井 清, 岡田 弘: 特公昭 49-6744
- 3) 北山 実, 中村元治, 松井 清, 岡田 弘: 特公昭 49-19078
- 4) 北山 実, 中村元治, 松井 清, 岡田 弘: 鉄と鋼, 61 (1975), 12, S 557
- 5) 水野広国, 小川正治: 日本鋼管技報, (1973) 61, p. 23
- 6) 鈴木 匠: 日本応用磁気学会誌, 2 (1978), 2, p. 36
- 7) K. BUCHMANN: Werkstattstechnik, 53 (1963), 3, p. 128
- 8) 前田禎三, 青木 勇: 塑性と加工, 18 (1977), 194, p. 120
- 9) 前田禎三, 松野健一: 第7回塑加連講 (1966), p. 25
- 10) K. G. BROWNLEE and T. W. SMYTHE: JISI, 208 (1970), 9, p. 806
- 11) 助川政之, 樋口新三, 高松勝明: 機械試験所所報, 15 (1961), 4, p. 279
- 12) 斎藤 博: 精密機械, XXVI (1960), 1, p. 19
- 13) 前田禎三, 松野健一: 日本機械学会誌, 69 (1966), 568, p. 89
- 14) 前田禎三, 青木 勇: 塑性と加工, 17 (1976), 189, p. 812