

絶縁被膜による電気鋼帯の打ち抜き性向上について

Improvement of Punchability by a New Insulating
Coating Applied on Electrical Steel Sheet

入 江 敏 夫*

Toshio Irie

丹 田 俊 邦**

Toshikuni Tanda

中 野 昭三郎***

Syosaburo Nakano

Synopsis :

The punchability of electrical steel sheet depends not only on the mechanical properties of the steel but on surface insulating coating. A new coating "C coating" has been developed which improves the die life of tool steel 15 to 40 times. Experimental works have shown that without external lubricant an electrical steel sheet coated with "C coating" has a punchability over 1.5 million punchings per die grinding both with testing dies and with notching dies of motor core laminations. Further, 0.8~1.2 million laminations were obtained in punching practical core laminations using progressive tool steel dies, but without lubricating oil galling arose locally. As an insulating coating, the "C coating" also has superior characteristics. An improved TIG welding method has been developed for welding of core laminations coated with "C coating" which contains organic resin. This method made possible the high speed welding with electrode traveling at 120 cm/min.

1. まえがき

電気鋼帯は電動機、発電機、変圧器および継電器などの鉄心に用いられるもので、家庭電化製品をはじめとする電気機器のめざましい発展に伴ない電気鋼帯の需要も増大の一途をたどっている。鉄心を作るにはまず電気鋼帯を打ち抜き金型により所定の形状に打ち抜き、その数十～数百枚を積み重ねてリベットや溶接で成形する。鉄板の打ち抜きをくり返すと打ち抜き金型の刃先が摩耗し鉄

心板（打ち抜いた板）の寸法が変化するとともにカエリ高さが大きくなる。これは鉄心の組立に支障をきたし電磁特性に影響するので、打ち抜き作業を中止してダイスを研磨補修しなければならない。電気鋼帯の打ち抜きダイスは精密加工が要求されるため高価であり、その摩耗および着脱研磨に要する労力とプレス設備の稼働率の低下は多数の打ち抜き板を積層して組み立てる鉄心のコストにとって大きな問題であるため、打ち抜き加工性は電磁特性とともに電気鋼帯の品質として重要視

* 技術研究所神戸研究室主任研究員

*** 技術研究所溶接研究室

** 技術研究所神戸研究室

されている。

筆者らは表面被膜により電気鋼帯の打ち抜き性を向上する方法について研究を行なった結果、工具鋼ダイスで1回研磨当り、80~200万回と飛躍的に打ち抜き性を向上させる絶縁被膜「Cコーティング」を開発したのでその概要を紹介する。

2. 電気鋼帯の打ち抜き性

鋼板の打ち抜き性はダイスの材質、クリアラン

ス、プレス精度などの加工側の条件に支配されることはいうまでもないが、引張強さ、伸び、硬度などの鋼板の機械的性質に支配されることが知られており、たとえば Brownlee¹⁾によればフルプロセス製品の場合、降伏点が38kg/mm²の材料に比べれば25kg/mm²のものは約3倍の打ち抜き性がある。市販されている冷間圧延電気鋼帯の種類と機械的性質の一例を示した表1からわかるように機械的性質の規格はS18~S23の3鋼種についてしか規定されていないが、カタログの一例

表1 冷間圧延電気鋼帯の種類と機械的特性の一例

種類 (JIS)	グレード	製造会社と商品名				機 械 的 性 質										硬 度 Hv (1 kg)
		鉄損	川崎 製鉄	新日本製鉄		引張強さ kg/mm ²			降 伏 点 kg/mm ²			伸 び %			JIS	一例
						JIS	L 方 向	C 方 向	JIS	L 方 向	C 方 向	JIS	L 方 向	C 方 向		
方向性 電気鋼帯	C 2553 方向性けい 素鋼帯	G 90.90 G 151.50	R G 9 R G 13	Z 9 Z 13	V C 9 V C 13	≥34*	36	39	—	33	36	≥15*	17	43	—	210
無方向性 電気鋼帯	C 2552 冷間圧延 けい素鋼帯	— 0.95	R M 9	H 9	—	—	45	47	—	41	42	—	15	18	—	202
		— 1.05	R M 10	H 10	M C 10	—	51	53	—	40	42	—	16	20	—	215
		S 121.25	R M 12	H 12	M C 12	—	50	53	—	41	44	—	22	26	170~230*	207
		S 141.45	R M 14	H 14	M C 14	—	48	51	—	39	42	—	20	26	170~220*	205
		S 181.80	R M 18	H 18	M C 18	≥39	45	47	—	33	35	≥20	31	33	140~200*	165
		S 202.05	R M 20	H 20	M C 20	≥37	44	46	—	31	33	≥22	34	36	130~180*	159
		S 232.30	R M 23	H 23	M C 23	≥35	42	44	—	30	31	≥26	36	38	125~175*	156
	C 2554 小形回転機 用磁性鋼帯	S 303.00	R M 30	H 30	H C 30	≥35*	44	45	≥22*	33	34	≥26*	37	39	115~170*	151
		S 404.00	R M 40	H 40	H C 40	≥35*	43	44	≥22*	33	34	≥26*	36	38	115~170*	147
		— 5.00	R K S	E C	H C F	—	38	39	—	32	33	—	40	42	—	130
		— 6.00	R K L	E C L	H C L	—	36	37	—	32	33	—	41	43	—	130
	(セミプロ セス製品)	— 2.30	R S	—	—	—	45	47	—	40	42	—	23	21	—	167
		— 3.00	H P S	U 30	H C S	—	42	46	—	—	—	—	11	6	—	150

注 1. 鉄損は方向性の場合、板厚 0.30mmの $W_{15/50}$ の値、無方向性は板厚 0.35mmの $W_{10/50}$ の値、S30以下は実際にはほとんど0.50mmのものが使われている。

2. 製造会社と商品名には他に日本鋼管 S60, S50 相当品として PMC, PM, セミプロセス製品として PC30, PC23 がある。住友金属セミプロセス製品として SXL, SXAがある。

3. 機械的性質の一例はすべて川崎製鉄のカタログなどのデータを使用した。

4. * 印は解説に示されている値。

値を目安にすれば高級品になるほど、すなわち鉄損値が低い材料ほど引張強さ、降伏点および硬度が高く、伸びが低くなっている。このような機械的性質の違いは鋼帯の磁気特性を所期の値に調整するためにけい素含有量などの成分、冷間圧延の圧下率、熱処理温度などの製造条件が選ばれるためであって、中でもけい素は鉄損を低下させる効果があるので、高級品は多く含まれている傾向がある。しかし、S9およびS10クラスはきわめて高度の技術を要するものであり、高級品を作る場合には打ち抜き性のために機械的特性を調整する余地はほとんどない。

電気鋼帯の打ち抜き性は打ち抜き数に対するダイスの摩耗量によって評価されているが、ダイスエッジ（ダイスの切刃部）の摩耗量を定量的に測定するのは困難であり、また手数もかかるので鉄心板のカエリ高さを測定しその値がある限界値に達するまでの打ち抜き数で間接的に評価されている。

試験用丸ポンチダイス(20mmφ)による打ち抜き試験結果によれば、絶縁被膜のない場合カエリ高さ50μに達するまでにS60相当のRKLは約9万回に対しRM14は6万回しか抜けない。この原因は機械的性質の差異によるほかにS9～S23クラスのけい素含有量の高い鋼板の表面には摩耗性の強いシリカ(SiO₂)の被膜が存在するからである。電気鋼帯の熱処理はAXガスやDXガスなどの鉄が酸化しない雰囲気中で実施されるが、けい素は非常に酸化しやすい金属であるため選択的に酸化されて表面にシリカ被膜を形成する。このシリカ層の厚さは処理条件にもよるがおもにけい素含有量に依存する。また、方向性けい素鋼帯の打ち抜き性が非常に悪いのも同様に摩耗性がさらに強いけい酸マグネシウム(2MgO・SiO₂)被膜が高温箱焼鈍の際に形成されているからである。

電気鋼帯のもうひとつの特徴は絶縁被膜と呼ばれる被膜処理がされていることである。これは鉄心板を積み重ねた時に発生する「層間損失」を低下させるために電気鋼帯の製造工程の最後に表面に処理する電気絶縁性の被膜であり、その材質は有機質と無機質に大別される。欧米では無機質の磷酸塩系のほかにワニスなどの有機質被膜が打ち

抜き性を向上する効果があるので相当量使われておりAISI規格²⁾にも「C1被膜」および「C3被膜」の2種が規定されている。一方わが国では磷酸塩系が主として用いられていたが、昭和41年に打ち抜き性を向上させる絶縁被膜として当時の八幡製鉄からVPコーティング(有機質系被膜)が、42年に川崎製鉄からPコーティング(無機質クロム酸塩系被膜)がそれぞれ開発され発売された。これらの被膜はわずか1～3μの厚さに処理されただけで2～5倍に打ち抜き性を向上させる能力があるが、今回開発したCコーティングはさらにこれらを大幅に上回る打ち抜き性を備えたものである。

3. 試験用ダイスによる打ち抜き性

Cコーティングを含む各種の絶縁被膜を処理した同一鋼種の電気鋼帯から試験用工具鋼ダイスで円板を打ち抜いた時の打ち抜き数とカエリ高さの一例を図1に示す。

試験条件

素材：無方向性電気鋼帯RKL (S60相当品)
0.5×29×コイル、硬度(Hv) = 123～145

抜き型：工具鋼SKD1製、20mmφ円板抜き
落し、クリアランス片側10～30μ、

プレス：30t ダイニングマシン、200～220
s.p.m.

打ち抜き油：軽質打ち抜き油

カエリ高さは5万回ごとに採取した3枚の試験片の各4カ所をダイヤルゲージ付マイクロインジケータで測定した。データは4カ所の最大値を3枚について平均したものである。

Cコーティングを処理した電気鋼帯RKLはクリアランス30μの場合には85万回打ち抜き後でカエリ高さはまだ34μとすぐれた打ち抜き性を示し、10μ程度のせまいクリアランスの場合でも前者よりは若干劣るが100万回の打ち抜きが可能である。以上のデータはいずれも潤滑剤として打ち抜き油を表面に塗布して得られたものであるが、打ち抜き油を全く使用せずに試験したところ、予期に反して200万回という驚異的な打ち抜き性を有していることがわかった。抜きカスのカエリ高さは打ち抜き製品のカエリ高さより小さいというデ

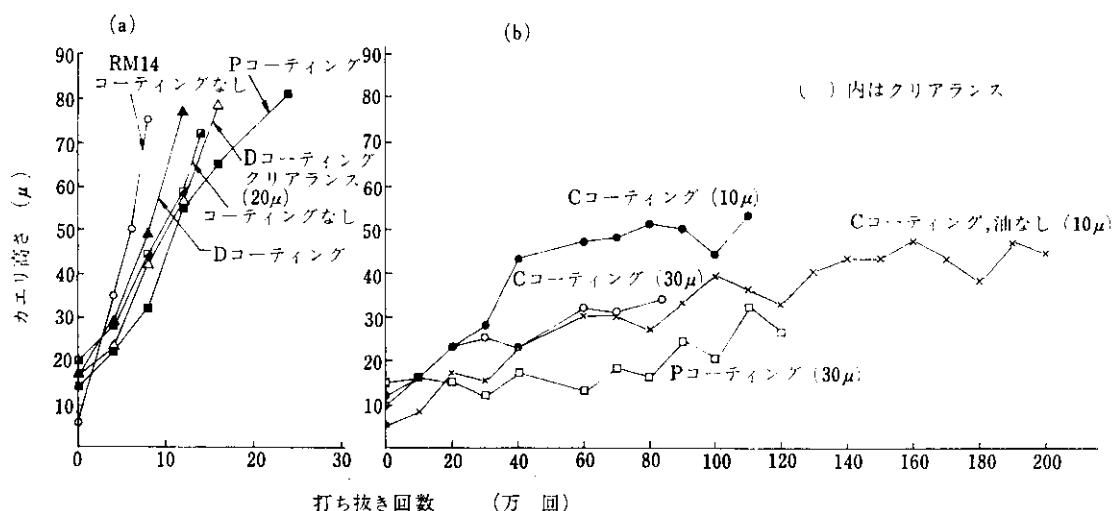


図1 試験用ダイスによるRKL (S60相当)の打ち抜き試験における打ち抜き数とカエリ高さの関係

ータ³⁾もあるので測定したが、すべて抜きカスすなわち円板のカエリ高さの方が高い値を示した。

電機メーカーにおける工業的打ち抜き実績は無機質リン酸塩系のDコーティング処理材が3~7万回、無機質クロム酸塩系のPコーティング(特許出願中)処理材は10~20万回といわれている。カエリ高さの限界を約50 μ とすればDコーティングはこの実績とかなりよく一致するが、Pコーティング処理材の打ち抜き性はダイスのクリアランスの影響が大きく、クリアランス30 μ の場合は100万回以上と実績より数倍すぐれた値を示している。電気鋼帯の打ち抜きに用いるダイスのクリアランスは板厚の4~6%, すなわち0.5mmの板なら20~30 μ が最適であるといわれており、前述の工業的打ち抜き実績もこのようなダイスを用いて得られたものであるにもかかわらずPコーティング材のデータはクリアランス10 μ の試験用ダイスでの値に近い。この理由はモーターコアのスロット部など複雑な形状をした実用の鉄心板の抜き型においては打ち抜きの際にダイスがわずかではあるが偏心を起こすこともあって局部的にクリアランスが小さくなるからではないかと考えられる。クリアランスが小さくなった部分ではカエリの発達が速く、

全体としての打ち抜き数の限界はこのようなクリアランスの小さな部分の打ち抜き性によって支配されることになる。したがって工業的に使用してすぐれた打ち抜き性を発揮するにはクリアランスの大きさに関係なく打ち抜き性のよいことが必要であると思われる。

4. 実用鉄心板の打ち抜き試験

単純な形状の試験用ダイスによる打抜試験ではすぐれた打ち抜き性があることがわかったが、実用鉄心板の打ち抜きにおいてどのような特性を示すかは非常に興味深い。そこで工業的に用いられている順送り金型により打ち抜き試験を実施した。

4.1 順送り抜き型によるモーターコアの打ち抜き試験

試験条件

電気鋼帯: RKL※C (S60相当のRKLにCコーティングを処理したもの、以下同じ)
0.5×107×コイル 硬度(Hv)=125~140

プレス: 80t 自動プレス 400s.p.m.

抜き型: 工具鋼 SKD 11製 順送り4段抜き

クリアランス 20μ (図2参照)

打抜油 : 軽質打ち抜き油

測定 : 5万回ごとに採取したステーター、ローターのスロット部各4カ所のカエリ高さを測定、各2枚の最大値を平均した。製品寸法はステーターの内径とローターのシャフト穴径をそれぞれLC方向について測定し平均した。

打ち抜き製品の形状を図2に、打ち抜き数によるカエリ高さ、寸法変化量の推移を図3に示す。カエリ高さは30~50万回で約 40μ に達するがその後はほとんど発達せず、80~90万回から再び徐々に大きくなり120万回打ち抜き後ローターのスロット部が 50μ に達している。製品の寸法精度も良好でカエリの変化と同じく40~50万回までに約 25μ 内径が小さくなり、その後の変化は非常に小さい。

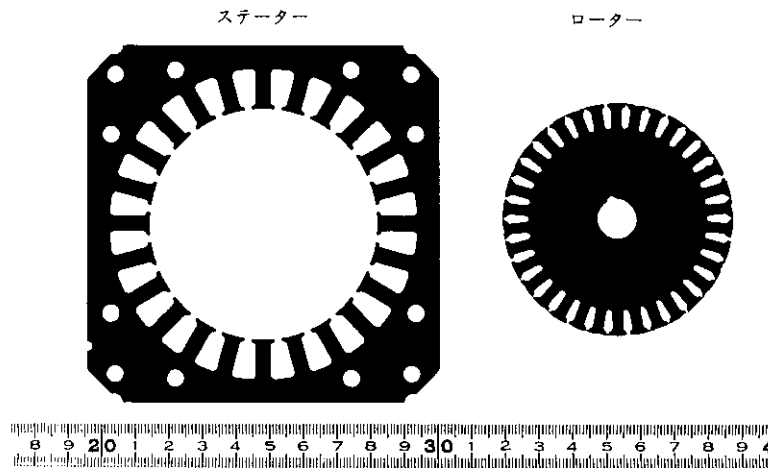


図2 モーターコアの形状

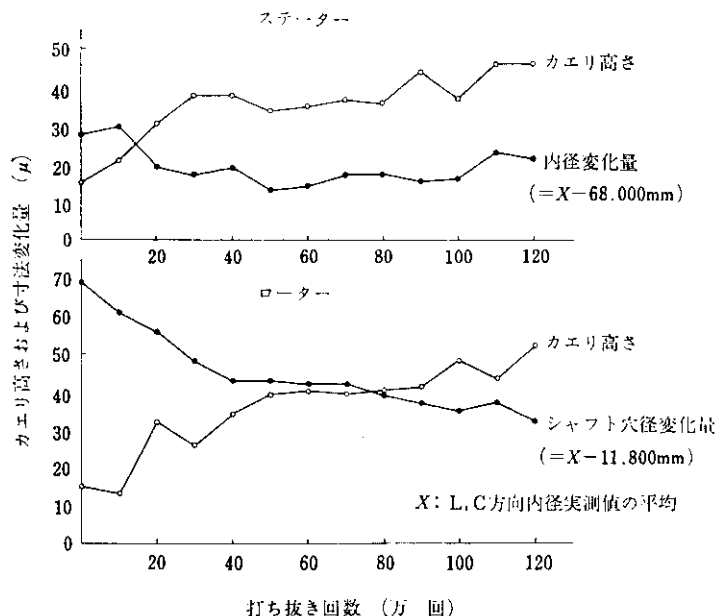


図3 順送り金型によるモーターコアの打ち抜き試験における打ち抜き数とカエリ高さおよび寸法変化との関係 (RKL Cコーティング材)

4.2 順送り金型による継電器鉄心板の打ち抜き試験

試験条件

電気鋼帯 : RM14 ※ C (S14相当品) 0.5×60×
 コイル 硬度 (Hv)=177~192
 プレス : 40 t 自動プレス 170s.p.m.
 抜き型 : 工具鋼ダイス 4段順送り型 クリ
 アランス : 20~30μ (図4参照)
 打ち抜き油 : 軽質打ち抜き油
 測定 : 5万回ごとに採取した固定鉄心板,

可動鉄心板それぞれ3枚のコーナー部
 3カ所のカエリ高さを測定しその最大
 値を平均した。寸法変化は外径のLC
 方向を測定し平均した。

打ち抜き製品の形状を図4に、試験結果を図5
 に示す。前例の素材がSi1%未満の低級電気鋼帯
 であったのに対し今回のRM14はSi約3%を含む
 高級電気鋼帯であり、絶縁被膜を処理しない場合
 には図1(a)に示すごとく打ち抜き性はRKLの
 約半分に近い。今回の試験は可動鉄心のピン穴の
 ポンチが最初から不調だったため42万回で中止し

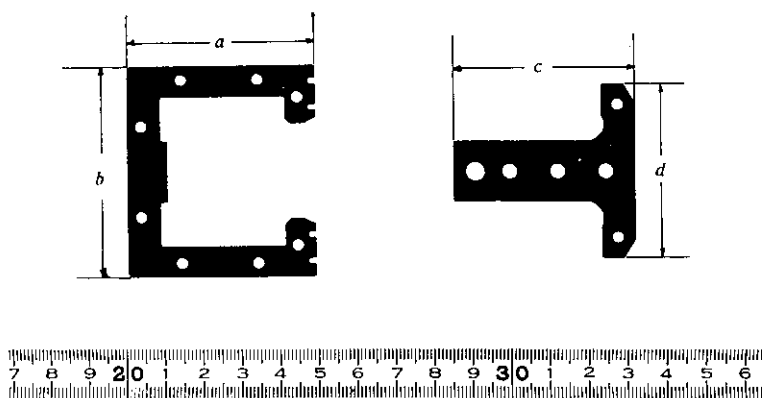


図4 マグネットスイッチコアの形状

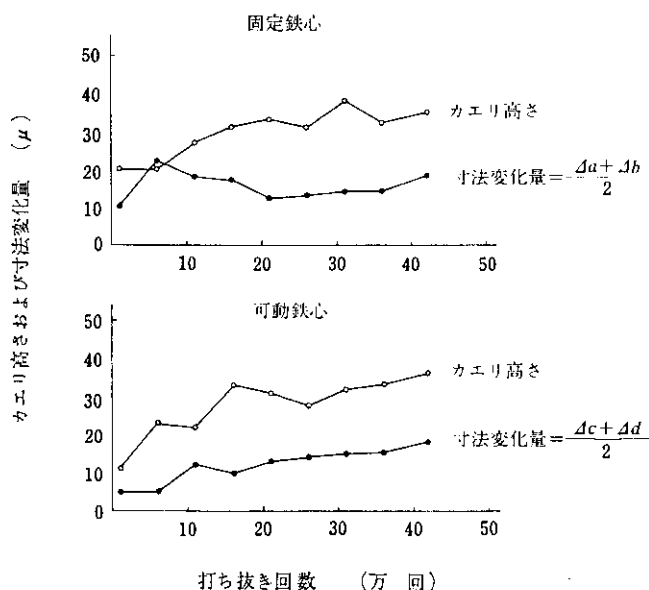


図5 順送り金型によるマグネットスイッチコアの打ち抜き試験における打ち抜き数とカエリ高さおよび寸法変化との関係 (RM14 C コーティング材)

たが、カエリ高さは 40μ 以下でこのデータからは80万回までの打ち抜きが可能であろうと推測される。したがってCコーティング処理による打ち抜き性の向上率はRKLとほぼ同程度といえる。

4.3 打ち抜き油を使用しない ノッチング打ち抜き試験

試験条件

電気鋼帯：RKL※C $0.5 \times 265 \times$ コイル

硬度 (Hv) = 135

プレス：4 t 自動ノッチングプレス 1050s.p.m.

抜き型：工具鋼 SKD1 製 クリアランス 25μ
(図6参照)

打ち抜き油：使用せず

測定：5万回ごとに採取したスロットの抜きカス3枚についてカエリ高さと寸法を測定し平均した。なお、製品のスロット部のカエリも測定したがすべて抜きカスより小さい値であった。

製品の形状を図6に、試験結果を図7に示す。
このモーターコアの打ち抜き工程はまずシャフト

ステーター (パーティング前)

ローター

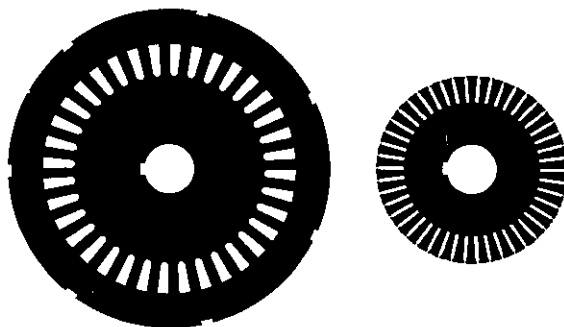


図6 モーターコアの形状

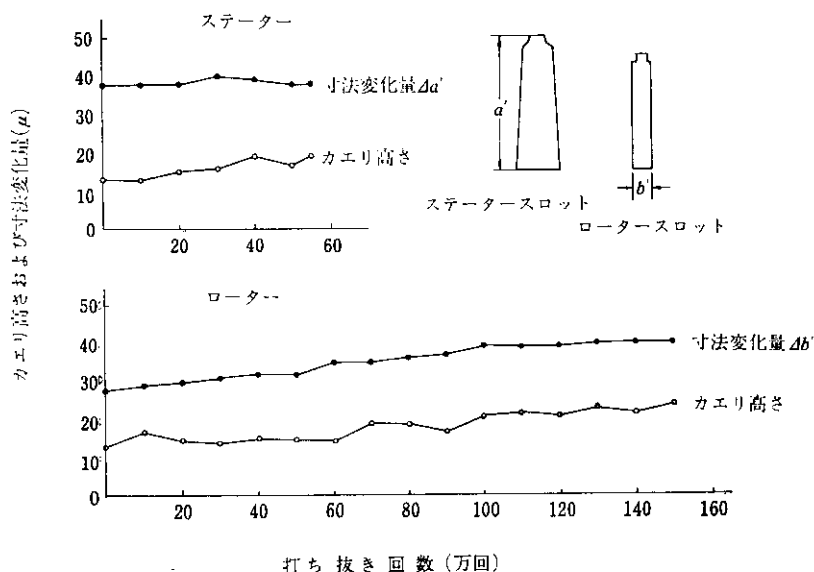


図7 モーターコアのノッチング打ち抜き試験における打ち抜き数とカエリ高さおよび寸法変化の関係 (RKL Cコーティング材)

穴打ち抜きとステーター外周のブランキングを一工程で行ない、つぎにステーターのスロットを1個ずつノッチングする。図6の左側からローターを抜き落してステーターと分離し（パーティング）、最後にローターのスロットをノッチングするという四工程からなる。

ステーターのノッチング試験は50万回でカエリ高さ 18μ と非常に良好であったが、55万回ごろ2枚抜きの事故があり中止した。ローターの試験は好調に進み、150万回で試料が無くなったがその時のカエリ高さはまだ 24μ で 50μ に達するまでにはあと150万回計300万回の打ち抜きは可能であったと推定される。ローターコアのスロット抜きカスの切口形状の推移を示した図8によれば剪断面は抜き始めの36%から150万回後には72%に増大しているが、その増え方は一様ではなく位置によってかなり異なることがわかる。切口形状における剪断面と破断面との比率はダイスのクリアランスの大小とダイスエッジの摩耗の程度に依存することが知られている¹⁾。形状が同じ場合ダイスの位置、たとえばA点とB点とにおける剪断面比率および剪断面比率の推移がかなり異なるのはクリアランスの片よりがあること、そしてその片よりが打ち抜き数により変動することを表わしていると考えられる。打ち抜き油は全く使用しないので試験を開始するまでは抜き型の発熱、焼きつきなどによる破損が懸念されたが、そのようなトラブルは全然見られなかった。この金型における無機

質被膜Dコーティングを処理したRKLの打ち抜き実績は打ち抜き油を用いて3～5万回であったのでCコーティングにより打ち抜き性が30倍以上に向上したことになる。

この他、RKLを油を用いて抜いた場合100万回以上の打ち抜き性を示したモーターコアの順送り抜き型で油なしの打抜試験を行なった。その結果2～14万回で1～2カ所のカエリが急激に発達したのでダイスをおろして調べると下型側面に焼きつき（金属粉などが融着すること）が見られた。しかし、それ以外の大部分の切刃では全く異常なくカエリ高さも $9\sim 14\mu$ とほとんど打ち抜き開始時と同程度であった。焼きつきが起こったのは下型切刃より数mm下部であったことからどのような原因によるのかわからないが抜きカスが下型内を落下しにくくなってポンチからの力が抜きカスを介して下型内面に対し大きな側方力となって作用したため焼きつきを引き起こしたのではないと思われる。このようなトラブルがない場合には打ち抜き油を用いない方が打ち抜き性がよいことは丸ポンチの試験用ダイスでも認められており、Cコーティング処理の鋼帯を打ち抜く場合、打ち抜き油は鋼帯を剪断する時の潤滑に対しては全く寄与しないかむしろ劣化させるぐらいであるが、抜きカスが下型内壁をすべるための潤滑剤としては効果があるといつてよいのではなからうか。いずれにせよこの問題についてはさらに研究する必要がある。

5. 絶縁被膜としての特性

Cコーティングの処理方法は特許出願中であるが、主成分はクロム酸塩で一部有機樹脂を配合したものである。電気鉄板の絶縁被膜としての諸特性もつぎに示すようにすぐれている。

膜厚 : $1\sim 2\mu$ 、被膜処理による占積率の低下はない

層間抵抗 : $5\sim 40\Omega\cdot\text{cm}^2/\text{枚}$ (JIS第2法)

密着性 : 優秀、 $10\text{mm}\phi$ で 180° 折り曲げても剝離しない

耐食性 : 優秀、塩水噴霧試験10hrで発錆なし

耐薬品性 : 冷媒（フロン）、変圧器油、不燃性絶縁油により変質しない

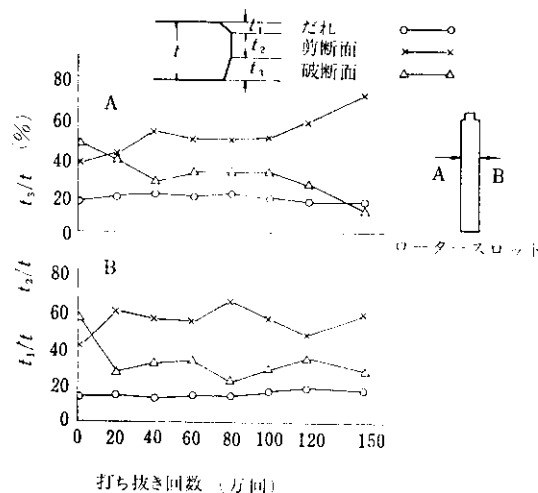


図8 ロータースロットの切口面性状の変化

耐熱性 : 弱酸化性雰囲気中で850°C以下の焼きなましに耐える。

溶接性 : 有機質系被膜よりは良いが無機質系被膜に比べるとやや劣る。50cm/min以下の溶接速度が良い。

6. 新しい溶接法について

積層した鉄心板を成形するために行なわれる溶接はタングステン電極により鉄心板自体を溶融して溶接ビードを形成するため、鉄心板の材質がリムド鋼の場合や、打ち抜き油が付着していたり、有機質系の絶縁被膜が処理されている場合には、ガスが発生しピンホールやブローホールなどの溶接欠陥を発生しやすい。Cコーティングの場合十分にガスを放出させてから凝固するように溶接速度をやや遅くすれば解決するが、能率上好ましくない。この点について研究の結果、Cコーティングに限らず一般に打ち抜き油や有機質被膜などのガス発生物質が表面に存在する鉄心板の溶接性を大幅に改良できる効果的な方法(特許出願中)が見出された。これは溶接の際発生するガスを積層の層間を通して後方へ抜けやすくするために、開先の後方にガス抜き孔を設ける方法である。図9に開先形状の例を示すが、従来は特別に開先を作らずに位置Gのような突起のないところに溶接したり、位置Dのような形の開先部に溶接が行なわれていた。これらに対し、A、EおよびFのように開先部の内側に孔を設けるとガスは層間を通してこの孔へ逃げ、ブローホールなどの溶接欠陥が大幅に防止できる。この場合、側端部から孔までの最端距離が短かすぎると溶け落ちが発生し、長すぎると拡散しにくくなって効果がない。約2mmのとき良い結果が得られたが板の表面粗度や電流、速度、加圧力などの溶接条件によって若干変わってくる。孔の大きさはブローホール発生にはほとんど

影響がなく、打ち抜きダイスのポンチの強度やコアの形状によって決めればよい。このようなガス抜き孔を設けることにより従来は溶接が不可能であった膜厚の厚い有機質被膜でも溶接でき、Cコーティングの場合は約120cm/minの高速溶接が可能となった。無機質被膜の溶接速度が従来最高80cm/min程度であったのに対しCコーティングは50cm/min以下であったので、この方法により溶接速度を2～3倍に向上できるわけである。

7. 打ち抜き性向上によるメリット

絶縁被膜としてCコーティングを処理した電気鉄板を使用すると打ち抜きコストがどのくらい低減できるかを試算するとつぎのようである。

たとえば、外径100mmφのモーターコアを順送り型工具鋼ダイスで打ち抜く場合、1回研磨あたり従来の無機質被膜材を5万枚、Cコーティング材を100万枚抜き得ると仮定する。ダイスの研磨代が8mm、1回研磨量が0.1mmとすればダイスの総寿命は前者は400万枚(素材160t)、後者は8,000万枚(素材3,200t)となる。金型が1台200万円、研磨費が1回5,000円とすれば、金型費用は240万円となる。素材トンあたりの打ち抜きコストは前者が1万5千円に対し後者はわずか750円でよく、1万4千円以上のメリットが出ることになる。実際の打ち抜きコストの低減は金型費の他に金型着脱の労力減少やプレス稼働率の向上による利益も算出されるのでさらに大きな金額となろう。

8. むすび

鋼板の打ち抜き性を向上させる表面被膜について、従来から知られていた方法が3～5倍程度であったのに対し、今回開発されたCコーティングが工具鋼ダイスで100万回以上の打ち抜きを可能にし、打ち抜き性を一挙に15～40倍に向上させたことは工業的に非常に意義深いものがあるといえよう。引続いて開発された改良開先による溶接能率の向上とあいまって鉄心製作の合理化とコストダウンのために今後Cコーティングをほどこした

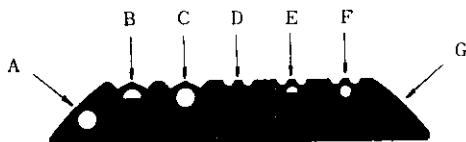


図9 TIG溶接試験に用いた開先形状

電気鋼帯の使用は大幅に増大することを期待したい。

剪断加工における工具と鋼板との間の摩擦と潤滑に関しては、未だ多くが解明されていないのが現状であり、Cコーティングの開発に際しても100万回単位の打ち抜き実験を数多く実施せざるを得なかった。Cコーティングのようなすぐれた打ち

抜き潤滑性の機構は学術的にも興味深いものがあり、今後さらに発展を見るにはその解明が必要であろう。

おわりにCコーティングの開発にあたり、被膜の試作実験ならびに打ち抜き試験にご尽力を頂いた葺合工場製造部のかたがたに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) K. G. Brownlee and T. W. Smythe : J. Iron & Steel Inst. 9 (1970), 806
- 2) Amer, Iron & Steel Inst. Steel Product Manual Flat Rolled Electrical Steel. Feb. 1964
- 3) K. Buchmann : Werkstattstechnik 53-3 (1963) 128