

リニアモーターカー用リアクションプレート “溝付き特殊平鋼”の開発*

川崎製鉄技報
22 (1990) 3, 183-189

Development of Grooved Flat-Bar Steels for the Reaction Plates of Linear Motor Cars



橋本 隆文
Takahumi Hashimoto
水島製鉄所 管理部条鋼管理室 主査(課長補)



山中 栄輔
Eisuke Yamanaka
水島製鉄所 管理部条鋼管理室 主査(部長補)



朝生 一夫
Kazuo Aso
水島製鉄所 条鋼圧延部条鋼技術室 主査(課長)



永広 尚志
Takashi Ehiro
水島製鉄所 条鋼圧延部条鋼技術室 主査(課長)



志賀 勝利
Katsutoshi Shiga
鉄鋼技術本部 鋼材技術部 主査(部長)



林 宏之
Hiroyuki Hayashi
鉄鋼研究所 プロセス研究部圧延研究室 主任研究員(課長補)

1 緒 言

都市交通システムの中で、大都市周辺の土地価格の高騰への対応や、地方中核都市の中規模輸送システムとして、リニアモーター駆動小型地下鉄の実用化が進められようとしている。

リニアモーターは原理的には通常の回転モーターを直線状に展開したもので、1次側のコイルと2次側回転子に相当するリアクションプレートから構成されている¹⁻³⁾。

このリアクションプレートは、誘導電流によって磁気反力を発生させるためのアルミ板や銅板と磁束を集中させるための鋼板を組み合わせた複合構造となっている。異種金属間の接合法として、すでに①爆着による接合、②圧延による接合、③リベットまたはボルトによる固定が実用化されている。しかし、いずれの方法も結合力の信頼性、製造可能寸法の制約および製造コスト面で一長一短があ

要旨

リニアモーターカー用リアクションプレートを製造するために、アルミ板を鋼板に接合するためのアンカーボンド法を川崎重工業株式会社と共同で開発した。鋼板の表面に溝底の方が広いアリ溝を熱間圧延で成形することは困難とされていたが、プラスチックモデルと熱間鋼モデルの研究からアリ溝形成が可能であることを見出した。これを実機に適用し2.0mm以上のオーバーハング量を有する平鋼が得られた。また結合力の高いリアクションプレートを製造するためのアリ溝断面積とアルミ板突条部断面積を適正範囲に管理し、アリ溝内に均一にアルミを充填させる製造技術確立した。

Synopsis:

A method that permits jointing of aluminum plates and steel plates as key material for the manufacture of reaction plates for linear motor cars has been developed by Kawasaki Steel jointly with Kawasaki Heavy Industries, Ltd. Hot forming of overhang grooves, with their opening narrower than their beds, on the steel plate surface was virtually impossible. But a study using Plasticine models and hot-rolled steel models paved the way for this new method called the anchor-bonding. By applying it to commercial-scale mills, flat bars having an overhang beyond 2.0 mm have been successfully obtained. With a technology also established to control cross-sectional areas of both overhang groove and aluminum projection within proper range, the resultant uniform filling of aluminum within the overhang grooves assures the manufacture of reaction plates of yet higher bonding.

るため、機械的に結合する新しい接合法を川崎重工業株式会社と共同で開発した。

この機械的結合法は過去熱間圧延では困難とされていたアリ溝を平鋼の表面に成形し、そのアリ溝内にアルミ板または銅板の突出部を冷間加工で塑性変形により充填させ接合するものである。

アンカーボンド法は川崎重工業株式会社が基本的に開発したもので、それを工程生産するための具体的な技術課題として、アリ溝の最適形状の選択と、それを達成するためのモデル実験、実機への適用結果、さらにはアルミ板との一体成形加工の結果について報告する。

2 アンカーボンド法の要求性能

アンカーボンド法による異種金属の接合の基本概念を Fig. 1 に示す。硬質金属である鋼板のアリ溝部に軟質金属であるアルミ板の

* 平成2年5月17日原稿受付

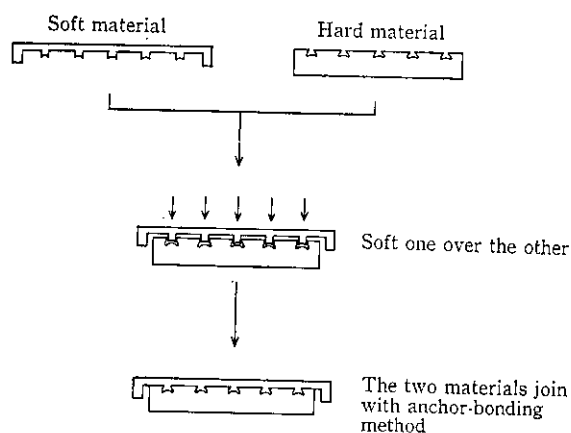


Fig. 1 Schematic of anchor-bonding method

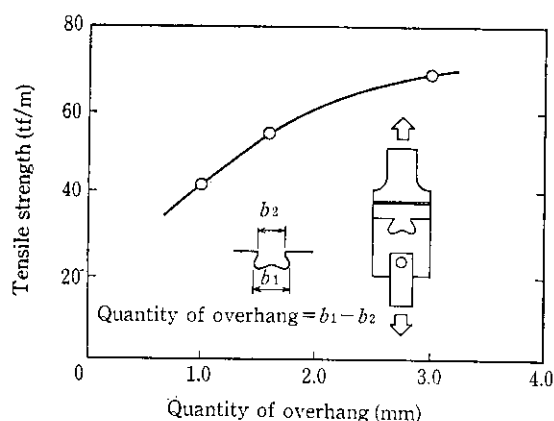
Fig. 2 Relationship between quantity of overhang and tensile strength (by Matsui et al.⁴⁾)

Table 1 Main specifications of reaction plate

	Fundamental load per 2495-mm length
Load of adsorption	8 000 kg
Axial load (at starting)	3 300 kg

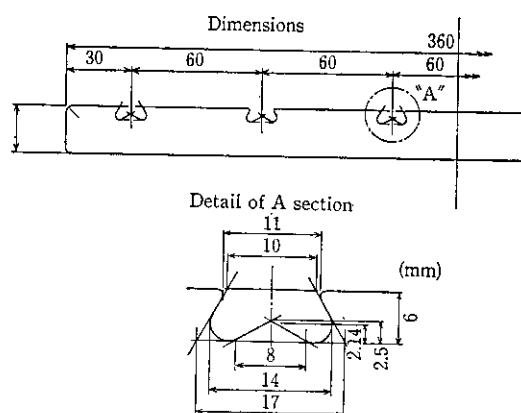


Fig. 3 Cross-section of grooved flat-bar steel

突条部を充填し、機械的に結合させるもので、この結合力がリアクションプレートに作用する駆動力、すなわちせん断方向の力、垂直方向の繰返し変形による耐剝離に十分耐えられるものでなければならない。

さらにリアクションプレートには気候による温度変化と、誘導電流によるジュール発熱を伴い、アルミ板と鋼板との熱膨張係数の違いから生ずる熱応力に耐えることが要求される。

そのためアンカーボンド法による異種金属接合法は、アリ溝付平鋼におけるアリ溝の形状、特にオーバーハング量とその溝内へのアルミ板の充満度合いが重要となる。

まず必要なアリ溝のオーバーハング量については、松井ら⁴⁾は、所定の溝を切削加工し、それにアルミ板をロール圧着した供試体で引張試験を行った。その結果を Fig. 2 に示す。リアクションプレート用アリ溝のオーバーハング量は、Table 1 に示すリアクションプレートの基本仕様と Fig. 2 から、1.0 mm 以上あれば性能を十分保証することがわかる。このことから、アリ溝は Fig. 3 に示す形状とした。

3 モデル実験による検討

アンカーボンド法に用いられる溝付平鋼は、従来の溝付製品と異なり、内部に比べ表面開口幅の方が小さい逆テーバー形状のアリ溝が必要とされる。このようなアリ溝付平鋼を安価に大量生産するには、切削加工で製作するよりは、圧延のような塑性加工がきわめて有利である。複雑な断面形状を圧延により成形するには、通常孔型ロールが用いられる。しかしいままでの孔型ロールでは、溝の形状と同一のロール^{5,6)}を使用するため抜け勾配が必要で、アリ溝形状を成形することは不可能である。

このためアリ溝付平鋼の圧延は、Fig. 4 に示すようにあらかじめ溝の両側に突起を造形し、次にこれを溝内側面に倒す 2 段階の加工が必要である。この際、

- (1) 最適突起形状（突起高さ、幅等）の選定
- (2) カリバー圧延による突起造形の可否
- (3) 突起を溝内側へ有効に変形させる方法

などがアリ溝付平鋼製造の課題であった。これらをプラスチックと熱間鋼を用いたモデル実験により検討した。

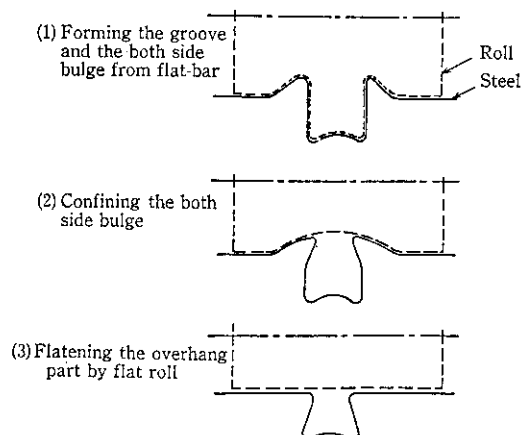


Fig. 4 Schematic illustration of the processing of grooved flat-bar steel

3.1 最適突起形状

溝両側の突起は次工程のロールによる圧下で溝の内面側に変形する。このときの圧下は突起部のみであることから、断面全体の長手方向の変形はほとんどなく、突起付近の幅方向への変形が主として生じる。このことから、圧延ではなく平面歪み鍛造条件下でも近似的に突起の変形状況をシミュレートできるものと考えられる。ここでは塑性加工のモデル実験材料としてよく用いられる粘土材料（プラスチン）を用いて、Fig. 5 に示す種々の突起形状部分が周囲の平坦部と同一高さになるまで平金型で圧下を加えた後の溝形状を比較検討した。

Fig. 6 に各突起の圧下後の形状を示す。No. 1 では良好な逆テーパ状の溝形状を示しているが、同一の突起高さで突起幅を大きくすると形状は悪くなる (No. 2 および No. 3)。またさらに突起高さも

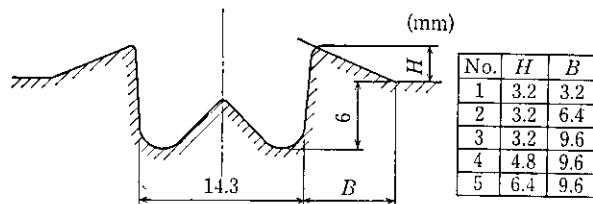


Fig. 5 Shape of projection before forging used in model experiments by Plasticine

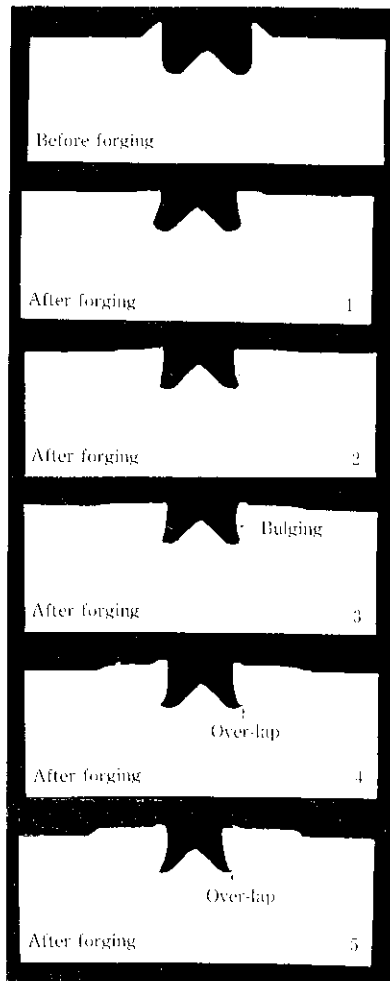


Fig. 6 Shape of projection after forging used in experiments by Plasticine

幅も大きくすると、溝底の部分でオーバーラップを生じている (No. 4 および No. 5)。これらの結果から、圧下前の突起の幅寸法を必要以上に大きくすると、溝形状の不良を招くことが明らかである。

また突起部分は平ロールで圧下されるときに溝の内外面に変形が生じ、このときの外面への変形は平坦部の圧下の増加を招くことになる。このことから、突起形状の最適化とともに、突起部を平ロールで圧下する前に傾斜カリバーなどにより予成形が必要である。

3.2 孔型圧延による突起造形

溝の両側の突起断面積は、前述のように、少なくとも圧延後のオーバーハング量より大きくする必要がある、また突起部を溝内面方向へ変形させる際のメタルフローを考慮すれば、突起幅寸法を大きくするより突起高さ寸法を大きくする方が望ましい。

このような突起を孔型圧延で造形するには、平鋼圧延のどの段階から突起造形を開始すればよいか、また平鋼幅方向の各位置での複数の突起が均一に形成されるかなどを検討するため、プラスチン材料を用いて孔型ロールによるテスト圧延を行った。

Fig. 7 に実験に用いた石こうロールの孔型図を示す。孔型は2種類のクローズドカリバーとして各々1パスの圧延とした。プラスチン圧延材の縮尺は実機に対し等倍とし、板厚は製品寸法に近い (30~27 mm) とし、幅も5条溝を有する実製品に近い 300 mm とした。しかし、ロールについては、使用可能な石こうロールの直径が 300 mm のため、実機にくらべて相対的に小径ロールでの実験となっている。

Fig. 8 に板厚 30 mm と 27 mm の場合の各パスの圧延後横断面形

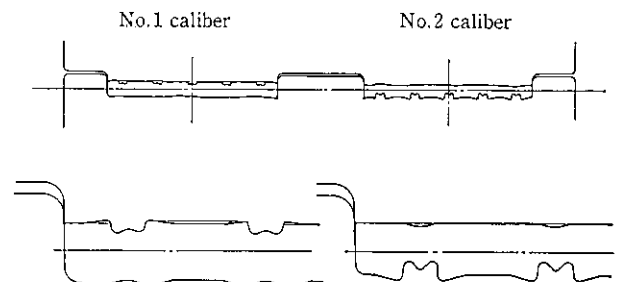


Fig. 7 The figure of roll caliber made of plaster

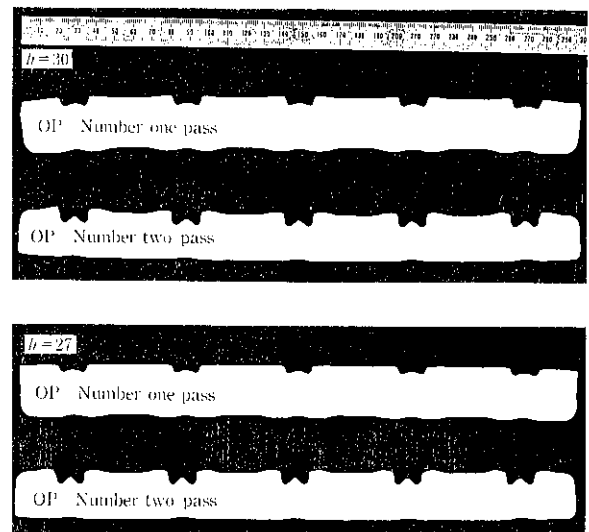


Fig. 8 Cross section of grooved Plasticine after rolling

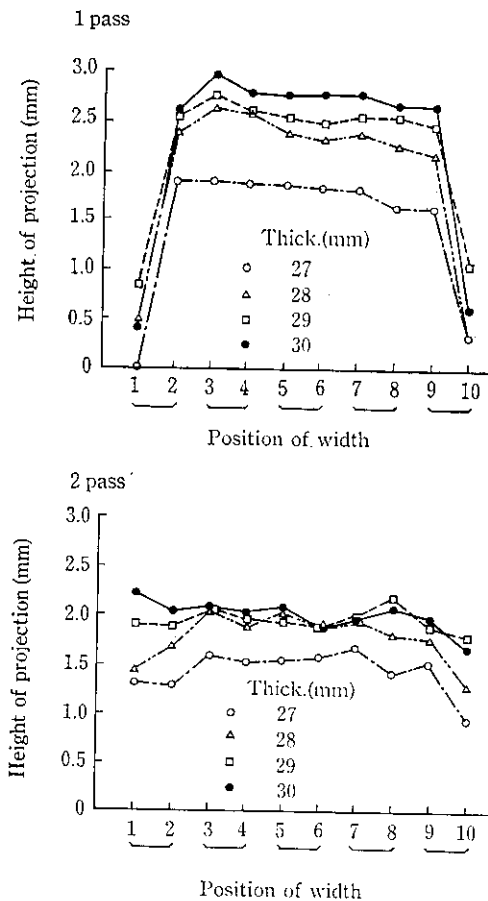


Fig. 9 The height of projection after rolling

状を示す。この図から圧延前の板厚の小さい 27 mm の場合は、突起造形用孔型への充填が不足しており、第 2 パス終了後の突起高さが小さいことがわかる。また 5 条溝のうち幅方向端部溝の端部側の側壁に段付き形状がみられる。これは、幅方向端部でのメタルフローにより第 1 パスでの幅方向端部が広がって、第 2 パスの幅方向端部の孔型と位置の相違が生じたためである。

Fig. 9 に幅方向各位置での突起高さの実測値を示す。ここで縦軸の突起高さは全厚さと平坦部の全厚さの差としている。本図より第 1 パスでは幅方向最端部の突起の造形が不十分であること、圧延前の板厚が薄いと突起高さも不足することがわかる。しかし第 2 パスになると幅方向最端部の突起高さも増加する。これは、前述のように第 1 パスで幅方向端部が幅広がりを生じたため、第 2 パスではカリバー側壁に充填して幅方向の変形が拘束されたためである。このため突起造形圧延の際、適宜幅圧下を加えて幅方向端部の突起形状を改善する必要がある。

ロール径比は異なるものの実機と等倍で実験を行った結果、板厚がほぼ仕上げ寸法に近い段階で突起造形を行う場合は、約 2.0 mm 程度の突起高さしか得られないことが判明した。このため突起の造形は、厚みの厚い粗圧延段階から行う必要がある。

3.3 突起曲げ成形加工

良好な溝形状を得るためには、成形前の突起高さを確保すると同時にそれを効率的にオーバーハング量へ転換する成形加工プロセスが重要である。成形の効果を熱間鋼を用いたモデル実験で検討した。

Table 2 Experimental conditions of hot rolling

Rolling mill	2 Hi rolling mill
Roll dimensions	290 ϕ mm dia., 300 mm length
Material*1	SS 41
Standard	SS 41
Dimension (mm)	34 t $\times$ 100 W $\times$ 250 L $\times$ 10 H of projection 38 t $\times$ 100 W $\times$ 250 L $\times$ 6 H of projection
Method of forming	① One pass of flat roll ② Two pass of flat roll ③ Overhang formed by No. 1 caliber plus flat roll ③' Overhang formed by No. 2 caliber plus flat roll ④ Overhang formed by No. 1 caliber plus flattening the overhang part
Rolling temperature	900°C
Rolling speed	15 rpm

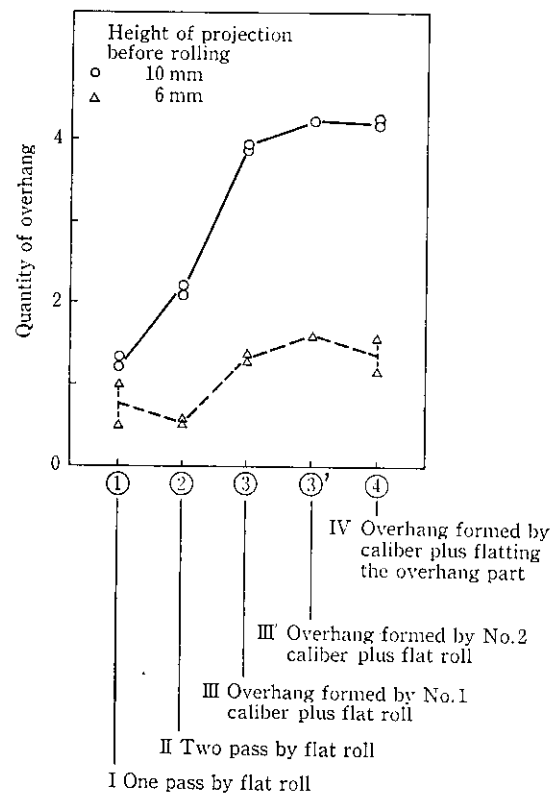


Fig. 10 The quantity of overhang formed each method

Table 2 に示す条件で熱間圧延を行い、圧延後のサンプルから溝底の最大幅と溝内部の最小幅を測定し、両者の差からオーバーハング量を求めた。その結果を Fig. 10 に示す。図の横軸は Table 2 に示す各圧延スケジュール、ただし突起曲げ成形用カリバーは Fig. 11 の 2 種類を用いている。縦軸はオーバーハング量である。圧延前の突起高さが低い場合は、いずれのパススケジュールにおいても突起高さの高い場合に比べオーバーハング量は小さい。このことから圧延前の突起高さを確保は重要である。

また突起高さの高い場合は、平ロールのみで成形するのに比べ、傾斜カリバーで突起部の曲げ予成形を加えることでオーバーハング

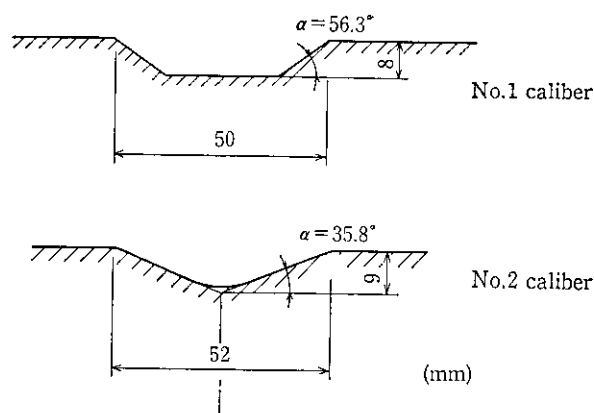


Fig. 11 Experimental shape of roll caliber for bending projection

量は大幅に増加し、突起曲げ予成形の効果は顕著となる。さらに突起曲げ成形角度は 56.3° に比べ 35.8° の方がオーバーハング量は大きく、最適角度は 0° から 35.8° の間にあるものと考えられる。

4 アリ溝付平鋼の製造

前節の結果に基づき Fig. 12 に示す大和電機製鋼(株)水島工場の6基の圧延設備で溝付平鋼の圧延を行った^{5,6)}。素材は水島製鉄所第1連鑄工場製ブルーム (270 mm × 340 mm) を使用し、Fig. 12 の各ロールを順次圧延成形し、アリ溝付平鋼の製品化を達成した。

4.1 圧延方法

リアクションプレート用アリ溝付平鋼は、アルミ板との安定した結合力を保証するため、溝内寸法のバラツキ、さらには5条溝間のバラツキの小さい精度のよいものが必要で、全く新しい圧延方法で

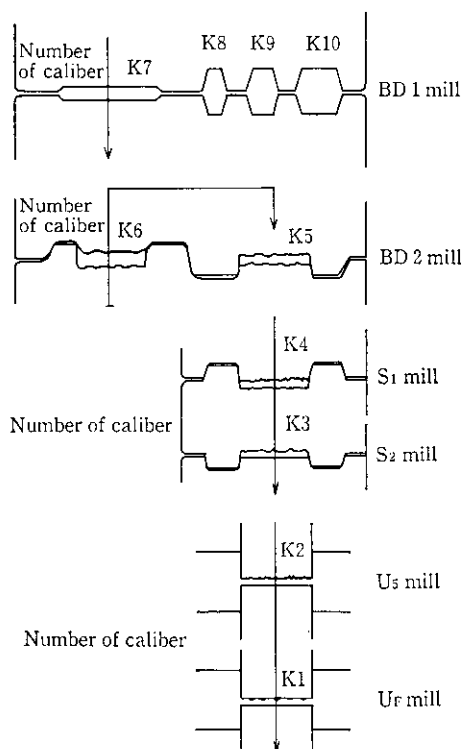


Fig. 12 Mill-train for grooved flat-bar steel

ある。

そのため実機での生産に際しては下記の点を考慮する必要があった。

- (1) 突起高さは細く高いものが得られること (目標 5.0 mm 以上)。
- (2) 幅方向端部の突起は幅方向のメタルフローを考慮し、幅方向中央部の突起以上の高さが得られること。
- (3) カリバーへの誘導がよいこと。
- (4) 安定した突起曲げ成形ができること。

まず2基のブレイクダウンミル (BD1, BD2 ミル) では、Fig. 13 に示すように上下面に突起と溝を形成する。上面の突起および溝はアリ溝を形成するための溝とその両側の突起に対応する。後段のミルで厚みを減少させる場合に突起の高さも Fig. 14 のように減少する。ブレイクダウンミル突起高さはこれらを考慮して大きくしておく必要がある。また幅方向端部では、厚み圧下を行うことで幅方向へのメタルフローにより突起高さが減少することから、中央部の突起高さに比べ大きくする必要がある。下面側の突条はこの突条を次カリバーで圧下する時、上面側の突起の形成を促進させるためと、圧延材を正確に次カリバーへ誘導するために設けた。

後段の中間連続圧延 (S_1 , S_2 ミル) では粗成形された上面側の突起と溝をより整える役割をもっている。さらに後段の仕上げ連続圧延 (U_5 , U_6 ミル) の U_5 ミルは溝および突起を最終仕上げするミルで、H形鋼を圧延するユニバーサル圧延方式とした。これは垂直ロ

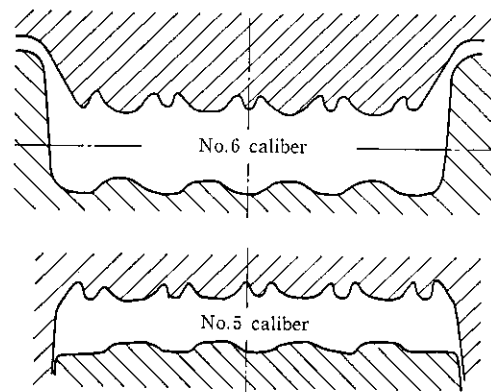


Fig. 13 Examples of roll caliber provided in BD2 mill

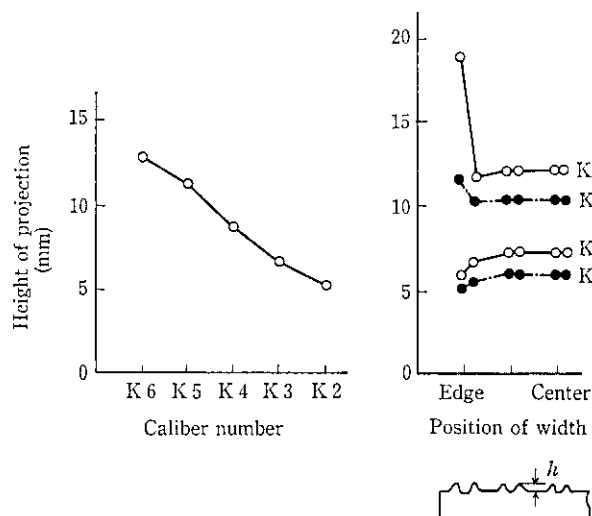


Fig. 14 Change in the height of projection after rolling

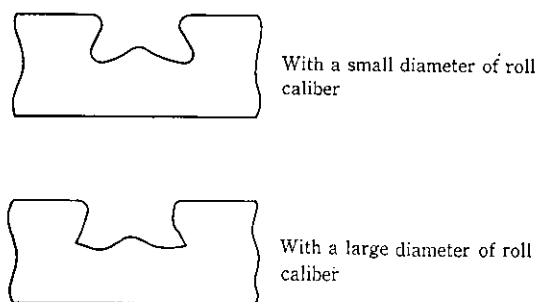


Fig. 15 The cross-section of grooved flat-bar steel formed with small and large diameter roll calibers for bending projection

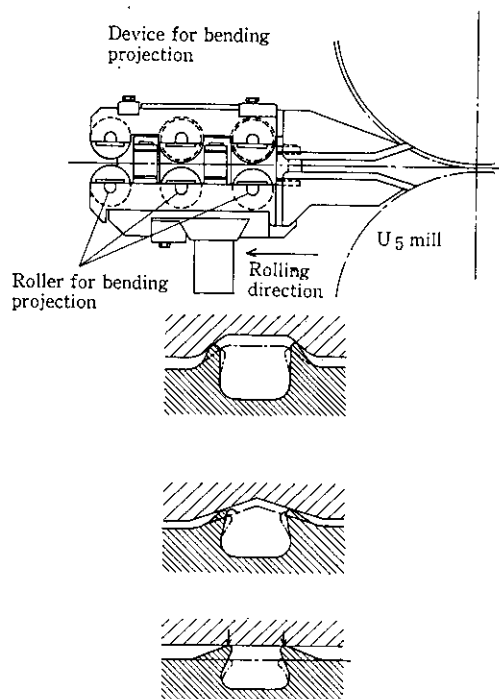


Fig. 16 Schematic of device for bending projection

ールによる圧下で幅方向の広がりを抑え、幅方向端部の突起高さを確保することをねらいとしたものである。最終の U_5 ミルもユニバーサル圧延方式で、上下方向の水平ロールの圧下はオーバーハング量の大きさも減少しない範囲に限定し、厚み精度、幅精度を保証することをねらいとしたものである。

4.2 突起曲げ成形加工方法

突起曲げ成形加工としては、前節の結果、多段曲げ成形の方がオーバーハング量の大きいアリ溝が得られる知見が得られ、実機に適用された。このとき大径ロールを使用すると、Fig. 15 に示すように突起の寸法に対し曲げ成形ロールの接触面積が大きく、圧下が突起部のみでなく、溝内にも影響して、溝内寸法が小さくなるとともに有効なオーバーハング量が得られない現象がみられた。

そこで Fig. 16 に示すような径の小さい溝付ローラーを3段に配置した曲げ成形ローラーガイドを U_5 ミル出側に設置した。曲げ成形加工ローラーの角度は前段が $\alpha=30^\circ\sim 38^\circ$ 、中段が $\alpha=15^\circ\sim 20^\circ$ 、後段は平ローラーとし、一気に曲げ成形加工を行わず、 U_5 ミルで成形した突起部分を圧下することなく有効に曲げ成形加工が行えるものとした。

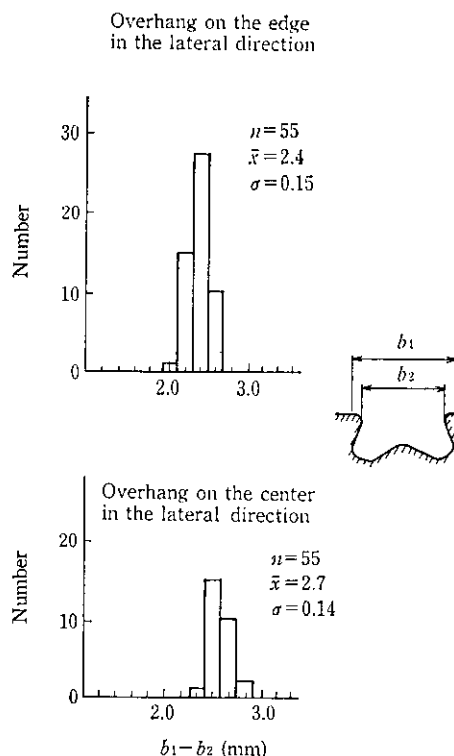


Fig. 17 Example of the quantity of overhang (b_1-b_2) of commercially produced steel flat-bars

4.3 アリ溝の寸法精度

Fig. 17 に幅方向溝位置別のオーバーハング量の実績を示す。ほとんどの位置においてオーバーハング量 2.0mm を保証している。ただし、幅方向中央部の溝に比べ幅方向端部の溝のオーバーハング量はやや小さくなっている。製品内長さ方向、および製品間のオーバーハング量のバラツキは小さく、精度のよいものが得られた。

5 アリ溝付平鋼とアルミ板との一体成形加工

Table 3 に示す実験用 2Hi 圧延機でアリ溝付平鋼とアルミ板の一体成形加工の実験を行った。Table 4 に圧下条件を示す。Fig. 18 に各パスの積層材全厚さと圧下荷重を示す。いずれの場合でも前半パスに比べ後半パスでは荷重は増加するものの全厚さ圧下量が減少する。これは後半パスでは溝内部にアルミが充満して接触面積が増加し長手方向の伸び変形を拘束することと、溝以外の平坦部でも圧下が始まるためである。能率を考慮すればパス回数は少ない方が望ましいが、3パス圧下では1パス当りの圧下量が大きくなり、特に初期パスにおいてアルミ板の伸び、反りが顕著に現れる。このことから初期パスでは軽圧下としパス回数を多くする方がよい。

また、アルミ板突条部断面積とアリ溝断面積との関係は、Fig. 19

Table 3 Specifications of the model cold rolling mill

Rolling mill	2 Hi rolling mill
Roll dimensions	300 ϕ mm dia, 400 mm length
Mill motor	D.C. 75 kW
Maximum load	100 tf
Roll opening	0~35 mm
A revolution number	0~750 rpm

Table 4 Rolling reduction mill load and plate thickness during the rolling for bonding extruded aluminum shape to grooved flat-bar steel

Division	Pass No.	Total thickness (mm)	Rolling reduction (mm)	Draft schedule (mm)	Load (tf)	An electric current (A)
3 pass schedule	0	29.35				
	1	28.05	1.39	27.20	74	400
	2	27.76	0.29	26.90	68	160
	3	27.70	0.06	26.70	75	140
5 pass schedule	0	29.35				
	1	28.54	0.81	28.00	45	230
	2	28.12	0.42	27.50	54	140
	3	27.92	0.20	27.20	59	120
	4	27.74	0.18	26.90	69	120
	5	27.70	0.04	26.70	80	80

Aluminium

Steel

5 mm

Photo 1 Cross-section of grooved flat-bar steel combined with aluminium

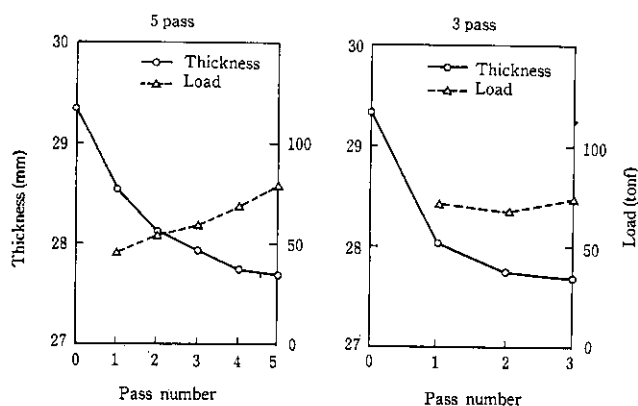
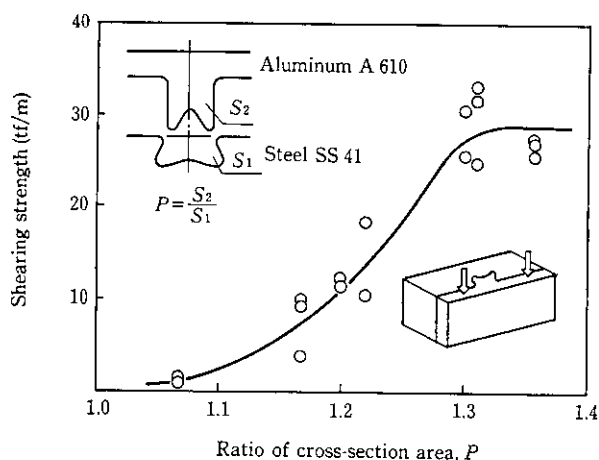


Fig. 18 The change of mill load and plate thickness during the rolling for bonding extruded aluminium shape to grooved flat-bar steel

Fig. 19 Relation between ratio of cross-section for groove, P , and shearing strength

に示すように、断面積比が大きくなるほど、単位溝長さ当りのせん断荷重は大きくなる。しかし、アルミ板突条部断面積が過度になるとアリ溝部からオーバーフィルし悪影響がでるため⁴⁾、溝断面積と

アルミ板突条部断面積には所定の精度管理が必要である。

Photo 1 に冷間ロール成形により一体化した後の溝の状況を示す。アルミ突条部がアリ溝内へ過不足なく充満し、良好な断面状況であることがわかる。

6 結 言

リニアモーター用リアクションプレートを製造するための、アルミ板あるいは銅板を鋼板表面に接合する方法として、川崎重工業株式会社と共同で低コストで高い信頼性の得られるアンカーボンド法の適用を検討してきた。その結果アルミ板または銅板との機械的結合を可能とするアリ溝付平鋼の開発に成功し、アンカーボンド法による製造方法を確立することができた。

以下にアリ溝付平鋼の圧延法およびアルミ板との一体成形加工について得られた重要な知見を示す。

- (1) 突起曲げ成形前の突起高さを 5.0 mm 以上とするためには前段ミルから高い突起の形成が必要である。
- (2) 突起部の曲げ成形加工は多段階曲げを採用することでオーバーハング量の大きい溝が成形できる。
- (3) アルミ板との接合ではアルミ板突条部とアリ溝の断面積比の精度管理が重要である。
- (4) (1)～(3) を達成するためには各ミル前後面のガイド設計、各成形ロールのカリバー設計も重要である。

アリ溝付平鋼は、今後ますます増大すると考えられるリニアモーター用リアクションプレートへの適用とともに、異種金属との接合法として種々の用途に適用範囲が拡大されてゆくものと期待される。

終わりにあたり本製品の開発に多大の御尽力をいただいた川崎重工業株式会社各位に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 松本 陽: 運転協会誌, 30 (1988) 7, 344-349
- 2) 松宮恒夫: 「電気と管理」, 8 (1986), 31-37
- 3) 山田 一, 大平啓一: 「電気と管理」, 8 (1986), 25-30
- 4) 松井繁明, 山田 猛, 龍 治真, 上門正樹, 仁瓶寛太, 石塚寿彦, 石田 猛, 吉野満治: 川崎重工技報, 106 (1990)
- 5) 川崎製鉄(株): 特願平 01-169047
- 6) 川崎製鉄(株): 特願平 01-224126