

電磁鋼板製品へのレーザ溶接の適用 Application of Laser Welding to Electrical Steel Strip

小 野 弘 路*
Koji Ono

多 鹿 洋**
Hiroshi Tajika

長 坂 省 治***
Shouji Nagasaka

田 中 茂****
Shigeru Tanaka

藤 井 守*****
Mamoru Fujii

佐々木 弘 明*****
Hiroaki Sasaki

Synopsis:

Application of CO₂ laser beam to the square butt welding for electrical steel strip has greatly enhanced welding qualities, resulting in better appearances, accuracy in dimensions and mechanical properties of the weld.

Laser beam is so sharp and requires very precise fit-up of both strips sheared edges and alignment between beam running line and fit-up line. Key to a success in using laser for square butt welding is how to obtain the accuracy of fit-up and alignment stably and efficiently in practical production line.

1. 緒 言

最近、需要家は、電磁鋼板の加工の自動化への志向を強めている。したがって、材料コイルの長尺化、連続化、均一化、さらには無欠陥化への要求が一段と強まってきた。その対応策の一つとして、製品溶接があるが、従来のTIG溶接も含め、各種突合せ溶接法を比較検討した結果、実用化の可能性及び溶接部の品質の点で、レーザ溶接が優れていることがわかった。

レーザ溶接は、約 $\phi 0.2\text{mm}$ の集光ビームを用いるため、被溶接物の突合せ間隙の許容値が小さく¹⁾、開先の突合せ精度が非常に厳しいものとなる。

したがって、レーザ溶接適用の成否の鍵は、この精度を如何にして設備的に確保するかにあった。

本報告は、昭和56年8月より稼動に入った電磁鋼板突合せレーザ溶接実用機第1号の製作に関するものである。

2. 各種突合せ溶接法の比較

2-1 電磁鋼板の製品溶接部に要求される品質

溶接部の品質には下記の項目が要求される。

- (1) ビード部の厚さが、板厚公差($\pm 10\%$)以内であること。
- (2) 穴あきや、溶込み不良のないこと、また、端

* 阪神製造所製造部製造技術室主任(課長)

*** 阪神製造所製造部剪断課課長

***** 阪神製造所企画部企画開発室

(昭和57年1月14日原稿受付)

** 阪神製造所製造部製造技術室

**** 阪神製造所企画部企画開発室主任(掛長)

***** 技術研究所溶接研究室主任研究員(掛長)

部に切込みや、焼玉のないこと。

(3) 突合せ不良や、熱ひずみなどによる形状ひずみのないこと。

(4) 機械的性質として、引張強さは母材並、硬度は母材より余り高くないこと、また、繰返し曲げは、2 回以上あること。

2.2 各種溶接法の比較

2.1 で記した品質を満足し、薄鋼板に適用できる溶接法としては、一般的に、突合せ溶接であるが、その熱源に何を選ぶかが問題となる。アーク、プラズマアーク、レーザ、光ビーム、電子ビームがあるが、これらの良否について検討する。

(1) プラズマアーク溶接は、高速プラズマジェットのため、溶融金属が吹飛ばされるので、薄板の場合適用は難しい。

(2) 光ビーム溶接は、キセノンアークランプを使用するが、集光点のエネルギー密度がレーザに比べ低いこと、および、大きな反射鏡の移動が要求され装置構成上適用は難しい。

(3) 電子ビーム溶接は、真空チャンバーの中で溶接を行うので、ラインでは使いにくい。したがって、レーザ溶接か、従来のアーク溶接、すなわち、TIG 溶接に絞られる。レーザは、高エネルギー密度 (10^7 W/cm^2 で TIG の 10^3 倍) の熱源であり、低入熱高速溶接が可能となるが、高い突合せ精度、トレース精度を必要とする。しかし、TIG 溶接との比較において、品質的に優れておれば、これら精度の確保の検討に値する。

2.3 レーザ溶接と TIG 溶接の品質比較

Table 1 に示す溶接条件での溶接部品質および機械的性質を調べた。

(1) 溶接部品質

溶接エッジ部および溶接部断面を、Photo. 1 に示す。レーザ溶接は TIG 溶接に比べ、エッジ部の切込みや焼玉がない。ビード形状も余盛がないうえ、ビード幅も狭く非常に良好である。

(2) 硬度分布

ビード硬さを Fig. 1 に示す。レーザ溶接部は母材に比べ H_V で 25 位硬くなるが、TIG 溶接部よりも若干低くなるので、硬度の点で少し有利となる。

(3) 引張強さ

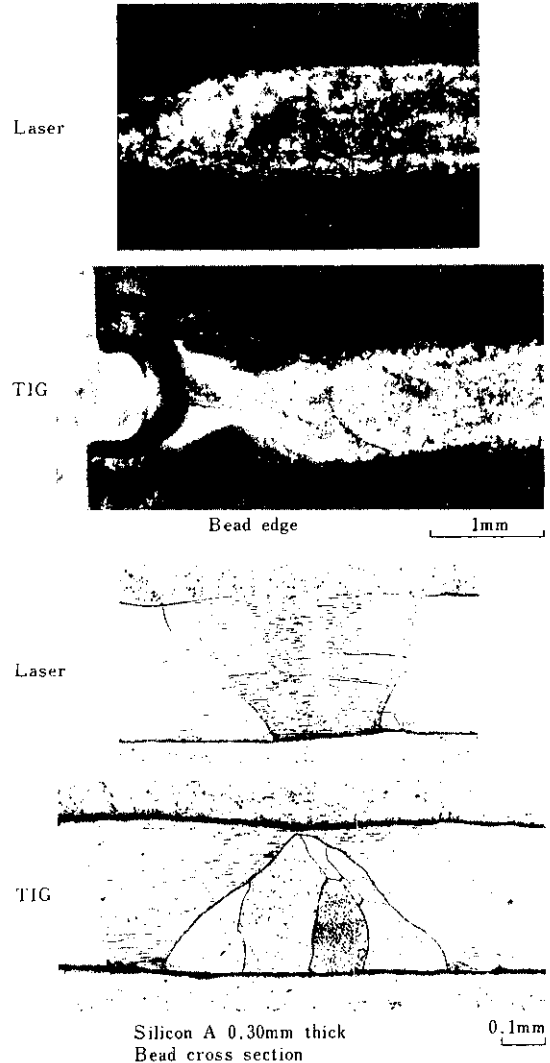


Photo. 1 Appearance of Laser and TIG welded joints

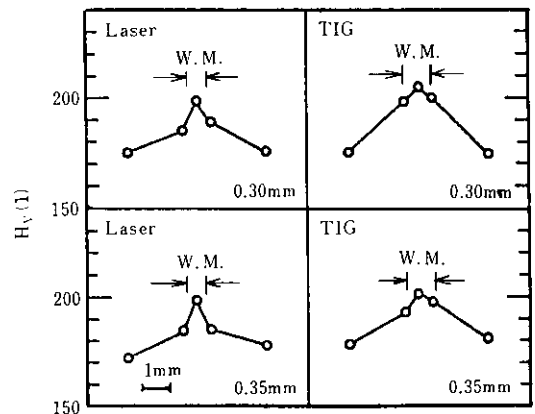


Fig. 1 Hardness distribution in welded joint

溶接継手の引張強さを Table 1 に示す。

レーザ溶接および TIG 溶接とも、溶接金属の強さは、硬さからも推測できるように母材をうわまわり、両者間ほとんど差はないが、TIG では一部溶接部で破断するものがある。

(4) 反復曲げ延性

溶接継手の反復曲げ延性を Table 2 に示す。

TIG の場合、熱影響部の結晶粒の粗大化のために、反復曲げ延性が悪いが、レーザ溶接は急熱、急冷によって、結晶粗大化が抑止されるため、反復曲げ延性は良好である。

3. レーザ溶接条件の検討^{2,3)}

レーザ溶接は、被溶接物の物性、熱源の出力、溶接走行速度などに加え、被溶接物表面の反射率、ビームモード、焦点位置 (Fig. 2 参照)、ビーム径の影響を強く受ける。ビームモードおよびビーム径は、発振器で決まるため、焦点位置、出力、速度が溶接条件のパラメータとして、一般に採用される。

3.1 溶接条件決定のための評価基準

以下の項目が評価基準となる。

- (1) ビードの溶込みが裏面まで十分に達していること。
- (2) ビード幅が出来るだけ狭いこと。
- (3) 溶接速度が出来るだけ速いこと。

(4) 溶接端部に切込みが少なく、また、裏面も溶融していること。

(5) 外観形状、および機械的性質が優れていること。

3.2 ビームの吸収

Table 3 に示す供試材を用いて、同一溶接条件で溶込深さを調べた結果を、Fig. 3 に示す。

Silicon A は、他のものに比べ、表面に光沢がなく、ビームの吸収が良好で溶込深さが大きい。また、B, C, D から判るように、同じ被膜種類であっても、膜厚が厚い C の方が溶込深さが大きく、

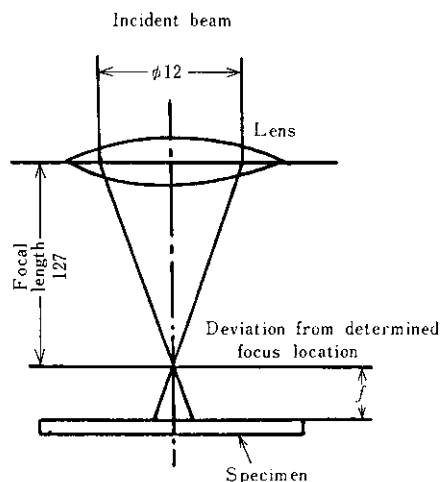


Fig. 2 Dimensions of focusing system

Table 1 Condition of laser and TIG welding

Welding method	Type of steel	Thickness (mm)	Power (kW)	Welding speed (m/min)	Heat input (J/cm)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Location of rupture
Laser	Silicon A	0.30	1	2.9	207	34	B.M.
		0.35	1	2.1	286	34	B.M.
TIG	Silicon A	0.30	0.77	0.7	660	34	B.M.
		0.35	0.88	0.6	880	34	B.M.

Table 2 Results of reverse bend test

Welding method	Type of steel	Thickness (mm)	Radius of bending (mm)	Number of repetition to rupture	Location of rupture
Laser	Silicon A	0.30	5	5, 6, 12, 4	HAZ
		0.35	5	15, 6, 13, 8	
TIG	Silicon A	0.30	5	0, 1, 2, 0	HAZ
		0.35	5	1, 1, 0, 0	

Table 3 Materials used for welding test

Type of steel	Si %	Grade	Coating
Silicon A	3.0	Grain oriented	Phosphate
Silicon B	0.5	Non oriented	Semi organic (Thin)
Silicon C	2.0	Non oriented	Semi organic (Thick)
Silicon D	0.5	Non oriented	Semi organic (material : matted surface)
Silicon E	1.0	Non oriented	Phosphate
Silicon F	0.5	Non oriented	Organic

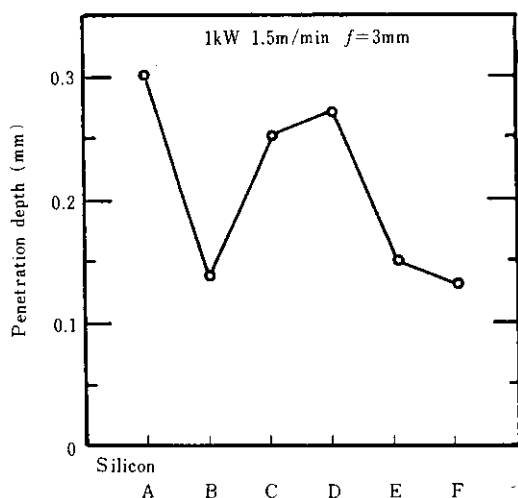


Fig. 3 Variation of penetration depth with materials and thickness of coatings

表面粗度の大きい D がより溶込深さが大きくなることが判る。

3.3 溶込み深さ

焦点位置, 溶接速度をパラメータにとり (出力は 1kW で一定とした。) 溶込深さの関係を, ビードオンプレートで調べた結果を Fig. 4 に示す。

Silicon A は, ビームの吸収が良いので, バックバーに平坦なものを使用した, E は, ビームの吸収が悪いので, バックバーを平坦なものにすると, 冷却効果が良すぎて, 溶込不足となるため, バックバーには, 溝付を使用した。

焦点位置を被溶接表面上 1mm にすれば, Silicon A は勿論, E も溶込可能となり, 溶接速度も速くできることが判る。

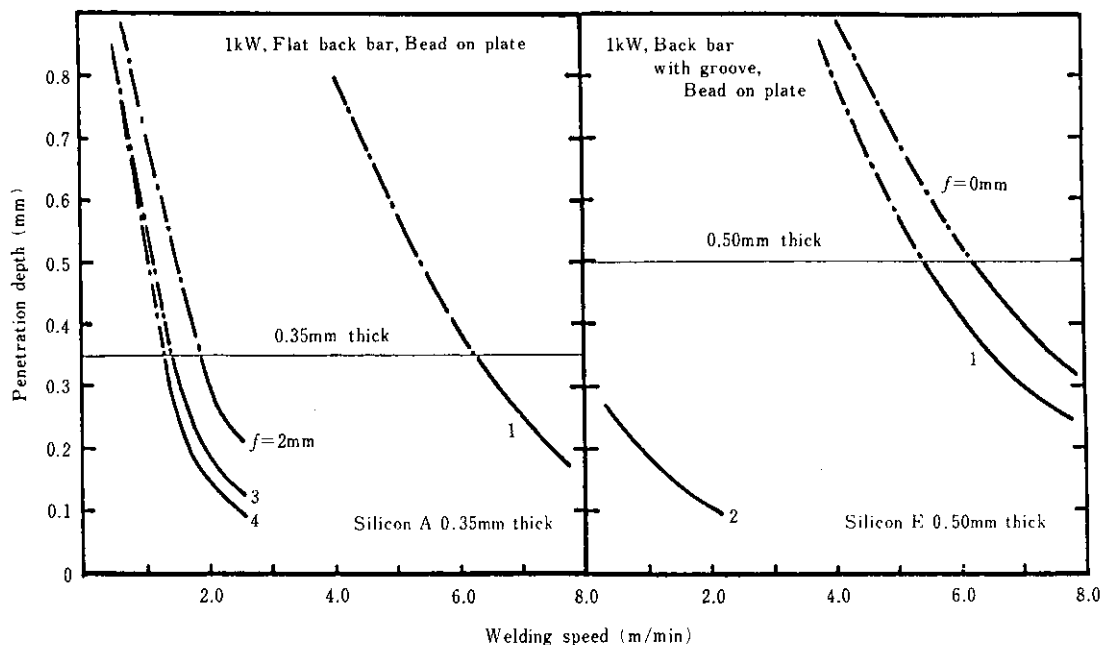


Fig. 4 Variation of penetration depth with focus deviation and welding speed

3-4 ビード幅

Fig. 4 と同試験材でビード幅を調べた結果を Fig. 5 に示す。

表ビード幅は、焦点位置が被溶接材に近いほど、また、スピードが早くなる程狭くなる。裏ビードは焦点位置が被溶接材表面から離れる程溶込みが浅くなるので狭くなる。

3-5 許容開先幅

テーパギャップ試験片 (Fig. 6 参照) を用いて、A→B にビームを走らせ、突合せギャップの許容値を調べた結果を Fig. 7 に示す。

焦点位置が、被溶接材に近づく程、また、溶接スピードが早くなるほど、許容ギャップ値は小さ

くなる。 $f=1\text{mm}$ 以下では、許容ギャップ値は 0.1mm 以下となり、突合せ精度が非常に厳しくなる。

3-6 レーザのクレータ処理方法

TIG 溶接の場合、溶接スタート時、被溶接材にコーティングがあると、アークが飛びにくい。

したがって、早目にスタートすることとなり、溶接端部に切込みが発生する。また、アークを発生させる出力に下限があるのに対し、レーザ溶接は下限がなく技術的に自動制御が容易である。ま



Fig. 6 Taper-gapped specimen

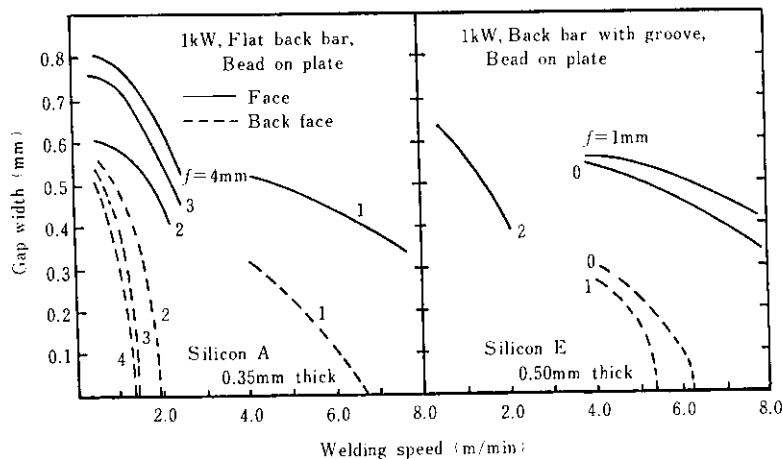


Fig. 5 Variation of bead width with focus deviation and welding speed

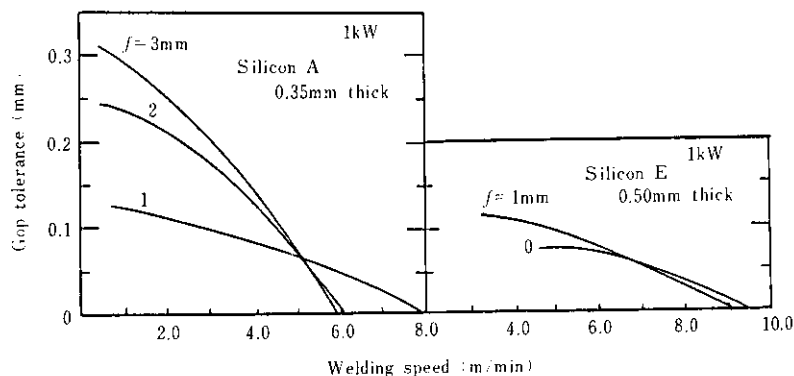


Fig. 7 Variation of gap tolerance with focus deviation and welding speed

た、コーティングがあれば、被溶接材のレーザ光吸収率が上がるためかえって有利となる。Fig. 8に自動制御のクレータ処理方法を示す。

3.7 クレータ処理条件

Fig. 8に示すクレータ処理長さ比($\Delta L_1/L_1$)をパラメータにとり、溶接端部の切込長さ、裏ビード未溶融長さの関係を調べた結果をFig. 9に示す。

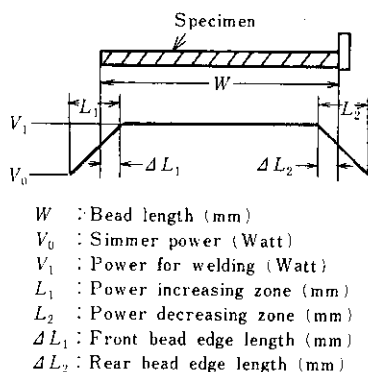


Fig. 8 Schematic diagram of power controll for edge shaping

す。裏ビード未溶融長さが発生しない点での、切込長さの小さい方という条件で、 $L_1=5\text{mm}$ の方が有利である。そのとき、 $\Delta L_1/L_1=0.87$ となる。

Photo. 2にクレータ処理の良否を示す。

3.8 溶接条件の決定

以上の検討結果から、各材種に対して、機械の突合せ精度等を考慮した適正条件をTable 4に示す。

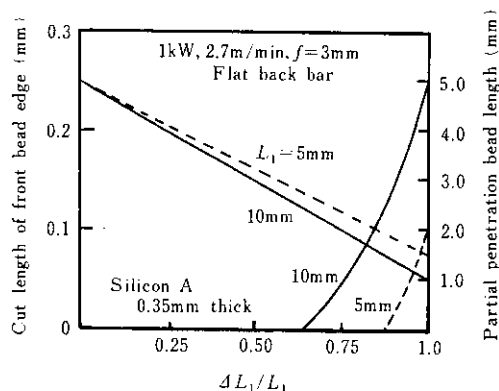


Fig. 9 Relation between bead shapes and power control parameter($\Delta L_1/L_1$)



Good ($L_1=5\text{mm}$, $\Delta L_1/L_1=0.87$) 1mm



Bad ($L_1=5\text{mm}$, $\Delta L_1/L_1=0$)

Photo. 2 Edge shaping

Table 4 Optimized welding conditions

Type of steel	Thickness (mm)	Power (kW)	Welding speed (m/min)	Focus location (mm)	Note
Silicon A	0.27	1	3.3~3.5	3	Lens ZnSe Focal length : 127mm Back bar (Flat)
	0.30	1	3.1~3.3	3	
	0.35	1	2.5~2.7	3	
Silicon B	0.35	1	8.8~9.3	1	Lens ZnSe Focal length : 127mm Back bar with groove
	0.50	1	5.7~6.2	1	
Silicon C, D	0.35	1	2.5~2.7	2	
	0.50	1	7.2~7.5	1	
Silicon E, F	0.35	1	8.8~9.3	1	
	0.50	1	5.7~6.2	1	

す。実際の突合せ溶接では、ビードオンプレートに比べ、溶込みが良くなるので、溶接速度は、約1.5~2.0m/min 速くなる。

これらの条件の下で各材種とも、溶接品質および機械的性質は、非常に優れていた。

4. 設備精度の確保

電磁鋼板全材種について、溶接可能なレーザの条件は、 $f=1\text{mm}$ 、即ち、焦点深度を考慮してビームスポット径⁴⁾は、約 $\phi 0.2\text{mm}$ ということになる。したがって、このビームが、被溶接両板何れをも、必ず溶かし、且つ、突合せギャップより抜けてしまわないための精度は、要素別に等分し、次の三つとなる。

- (1) 鋼板切断面の直線性…… $<0.05\text{mm}$
- (2) 板の突合せ精度……… $<0.05\text{mm}$
- (3) ビームのトレース精度……… $<0.05\text{mm}$

さらに、溶接部の板厚精度および、ベンド特性に影響するところの、

板のクランプ精度……… $<0.01\text{mm}$ を目標とした。(Fig. 10 参照)

これらの精度を確保するための、シャーおよび溶接機への施策を以下のようにすることで、対応できる目途が立ち、レーザ溶接機の製作に入った。

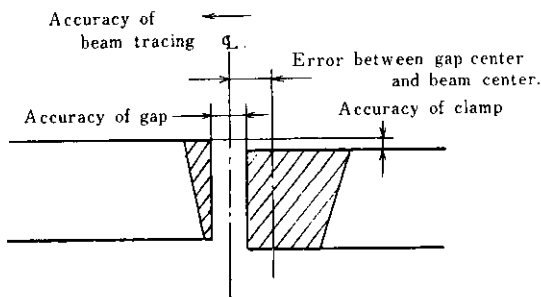


Fig. 10 Factors of fit-up and alignment accuracies

4.1 シャーへの施策

一般のシャーを使用した場合の直線性を調べた結果、ほぼ $0.04\text{mm}/500\text{mm}$ 幅、に入ることが判った。更に仕様を 0.03mm とし、これを維持するため、次の各項を配慮した。

- (1) シャー角（レイキ角）をできるだけ小さくす

ること。

- (2) シャー刃先角を小さくする程良い。(Fig. 11 参照)。
- (3) シャー時の板押えを強力にし、板の引張込みを防止する。
- (4) シャーブレードの真直度を 0.01mm 以下とする。また、取付金物平坦度も同じ精度とする。
- (5) シャー材質は超硬とする。
- (6) シャーと溶接機は、一体とせず分離し、シャーの精度保守を行い易いようにする。(Fig. 13参照)

以上の結果、鋼板の直線性を 0.02mm 以下に、また、突合せギャップは 0mm にできた。

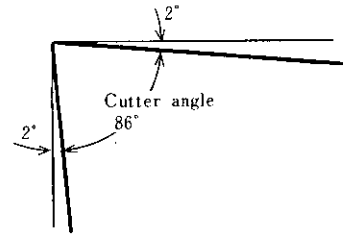


Fig. 11 Cutter angle

4.2 溶接機への施策

ビームが確実に突合せ部を走行する必要がある。そのために次の各項を配慮した。

- (1) シャーのサイドガイドと溶接加工台のサイドガイドとの寸法、配列等を全く同じとする。
- (2) レーザトーチヘッドより、炭酸ガスレーザの代りに He-Ne レーザスポットを出させ、突合せ部両端で、位置の一致を確認する。

まず一端を He-Ne レーザで合せ、(加工台のライン方向移動微調整による)その後、He-Ne レーザを他端まで移動し、突合せ部のズレを、一端を中心に加工台を回転させ両端を一致させる。

- (3) レーザビームヘッドの走行時の真直度を確保するために、リニアモーションベアリング (LM ガイド) を 8 個使用し、お互いにプリロードをかけることにより、横振れを防ぐ。(Fig. 12 参照)
- (4) 溶接部のクランプを極力近づけ (溶接線より 1.5mm) また、クランプ圧力を大きくすることにより板の形状歪の影響を小さくする。

以上の結果、ビームのトレース精度を 0.01mm

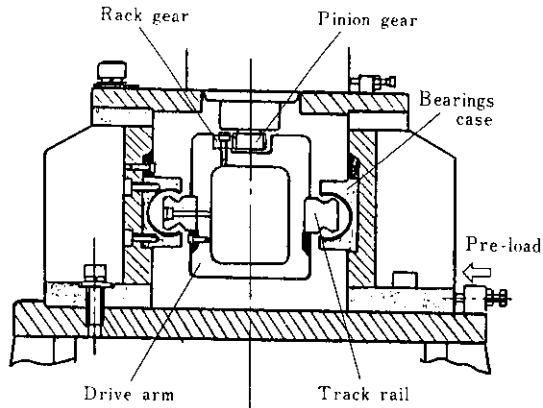


Fig. 12 Laser beam head traversing mechanism

以下に、また、板のクランプ精度を 0.01mm 以下に確保することができた。

5. レーザ溶接機の概要および運転結果

5-1 設備概要

レーザ溶接設備の概要を Fig. 13 に、設備仕様を Table 5～8 に示す。

5-2 溶接要領

下記の順序で溶接を行う。

- (1) 溶接する先行板、後行板の突合せ部の剪断および突合せを、それぞれ剪断線に対するサイドガイドおよび突合せ線に対するサイドガイドの位置寸法関係が全く合同なシャーと溶接加工台で行う。

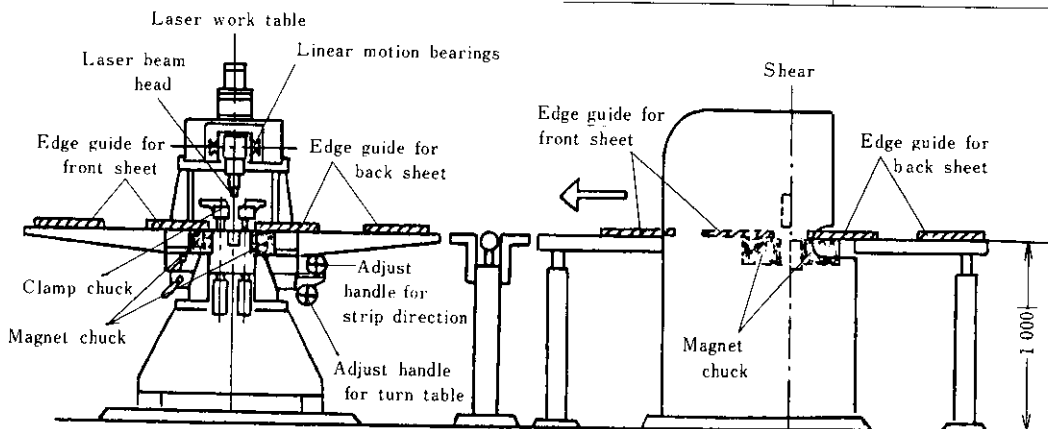


Fig. 13 Laser welding machine

Table 5 Specification of CO₂ Laser

Output power	1 000W (CW)
Laser medium	CO ₂ -N ₂ -He
Wavelength	10.6μm
Beam diameter	12mm
Cavity length	18m
Gas system	Slow-flow
Excitation	Gas discharge, 22kV

Table 6 Specification of Shearing machine

Item	Specification
Maximum width of strip	500mm
Maximum thickness of strip	0.7mm
Minimum thickness of strip	0.2mm
Motor power	2.2kW
Shearing speed	120r.p.m
Shearing angle	1°30'
Straightness of shearing	0.03mm/500mm

Table 7 Specification of Work table

(1) Adjust equipment of line direction	Manual
a Adjust capacity	±10mm
b Adjust length	0.5mm/1 turn of handle
(2) Adjust equipment of circle:	Manual
a Adjust capacity	±0.1°
b Adjust angle	1°30'/1 turn of handle
(3) Clamp	Oil pressure
a Clamp power	400kg/each side
b Clamp stroke	600mm

Table 8 Specification of laser head traverse equipment

Type of drive	D.C motor, rack pinion
Type of slide rail	Linear motion bearing
Traverse speed	0.3~9.9m/min
Traverse stroke	650mm
Straightness of traverse	0.05mm/650mm
Minimum unit of position	0.1mm

- (2) 突合せ線とレーザービームの走行線との一致を確認するため、事前に、同トーチより赤色の、He-Ne レーザーを出し一端の一致をライン方向に調整後、He-Ne レーザーを他端まで走行させて、一端を中心として旋回させ他端をも一致させる。
- (3) 両線の一致が確認できたら、正式に両板を溶接部近傍でクランプし、アクリルカバーを閉じるなど安全対策を施し、準備作業を完了する。
- (4) 溶接条件を設定し、レーザービームを走行させ、溶接を完了する。

5.3 運転結果

溶接部品質および機械的性質を調べた結果、2・1で述べた。製品溶接に要求される品質を十分に満足するものであった。(Photo. 3に、溶接部の端部

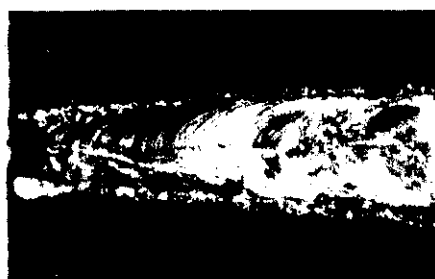
とビード断面を示す。)

また、溶接作業時間を調べた結果、溶接部をシャーで切断してから、溶接が終了するまでの時間は、約2～3分であり、溶接能率の面でも良い結果を得ている。また、レーザー使用という安全面での危惧も、安全対策で完全に解消できている。

6. 結 言

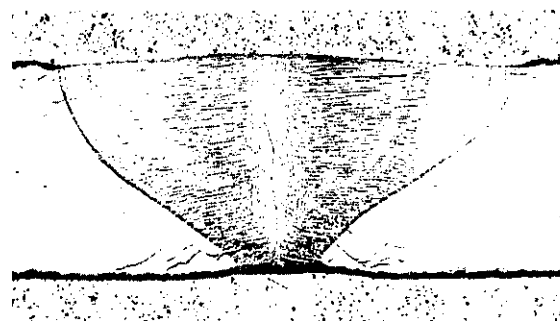
稼動開始後、約8箇月になるが、目下順調に操業を行っている。したがって、所期の目的を達成することができ、電磁鋼板の溶接分野で大きく前進したといえる。

これを契機とし、レーザ溶接の利用の拡大を検討追求していくつもりである。



Bead edge

1mm



Bead cross section

Silicon A, 0.30mm thick

Photo. 3 Appearance of laser welding joint

参 考 文 献

- 1) S.L.Engel: Tooling up for laser welding, SME paper No, MR-76-873, (1976)
- 2) 佐々木弘明, 西山昇, 坪井潤一郎: 川崎製鉄技報, 13 (1981) 3, 104
- 3) 妹島五彦, 鴨原啓之助, 蔵部弘敏: 溶接技術, 特集 (1980) 6, 27
- 4) Laser Focus March (1977) 14