
薄鋼板製造プロセスに対するレーザ溶接の適用性に関する基礎的検討

Applicability of Laser Welding to Steel Strip for Cold Rolling

佐々木 弘明 (Hiroaki Sasaki) 西山 昇 (Noboru Nishiyama) 坪井 潤一郎
(Jun-ichiro Tsuboi)

要旨：

薄鋼板の冷間連続圧延時には、能率向上のためコイル同士の接合が行なわれる。コイル接合の一手段としてレーザ溶接法の適否を検討するため、ビーム焦点位置、ビーム径の簡易測定法の比較および突合せ溶接時の開先間隙の許容値拡大法に関して検討を行ない、生産工程への適用が可能であることを確認した。また、レーザ溶接部の機械的性能を圧延性の観点で評価するため、一般冷延鋼板および珪素鋼板溶接部の反復曲げ延性試験、試験圧延機による圧延などを行なった結果、3%珪素鋼においてもレーザ溶接部の圧延性は良好であった。

Synopsis：

Applicability of the CO² laser welding to hot-rolled steel coils for a higher efficiency production of cold rolled steel strip is discussed with emphasis on how to determine welding conditions best suited to each production line and on increasing fit-up tolerance. Rollability of welds is evaluated in rimmed, killed, and silicon steels by using reverse bend test and miniature mill rolling. As a result, the CO² laser welding is found applicable to cold-rolled sheet steel production, and the weld joints of 3% silicon steel have shown good rollability.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

薄鋼板製造プロセスに対するレーザー溶接の適用性に関する基礎的検討

Applicability of Laser Welding to Steel Strip for Cold Rolling

佐々木 弘 明*

Hiroaki Sasaki

西 山 昇*

Noboru Nishiyama

坪 井 潤一郎**

Jun-ichiro Tsuboi

Synopsis:

Applicability of the CO₂ laser welding to hot-rolled steel coils for a higher efficiency production of cold-rolled steel strip is discussed with emphasis on how to determine welding conditions best suited to each production line and on increasing fit-up tolerance.

Rollability of welds is evaluated in rimmed, killed, and silicon steels by using reverse bend test and miniature mill rolling. As a result, the CO₂ laser welding is found applicable to cold-rolled sheet steel production, and the weld joints of 3% silicon steel have shown good rollability.

1. はじめに

鋼帯の生産工程ではフラッシュバット、シームなど各種溶接法が使われ、生産効率の向上に寄与しているが、入熱、ビード形状、強度、溶接速度などの点で従来の溶接法が適用しがたい場合がある。例えば、冷延鋼帯の接合部分は鋼帯表面に押し疵がつかないようにビード余盛のないことが望ましく、珪素鋼帯では溶接熱影響部の結晶粒粗大化による脆化を避けるために溶接入熱を極力さげる必要がある。しかし、フラッシュバット、シーム溶接では前述の欠点が避けがたく、TIG溶接は溶接速度が遅いため生産効率阻害の一因となっている。

当社では近年めざましい発展を示している炭酸ガスレーザー加工機¹⁻³⁾に注目し、その切断、溶接特性を調べ、生産現場への適用を検討してきた。本報告はレーザー溶接条件の実験的決定法とレーザー溶接継手の試験圧延結果を述べたものである。

2. レーザ溶接の特徴

レーザーは電子ビームと同様に高エネルギー密度熱源として用いられ、単位入熱あたりの溶込み深さが大きく、低入熱高速度溶接が可能で、溶接変形や熱影響部の結晶粒粗大化も少ない溶接継手を得ることができる。溶接条件によってはビード余盛の生成も抑えることができる。電子ビーム溶接では高速の電子が被溶接物に衝突して運動エネルギーが熱エネルギーに変換されると同時にX線の発生をもひき起こし、その遮蔽が必要となるが、光量子をエネルギー伝達手段とするレーザーはX線の発生が問題になることもなく、使いやすい熱源である。

レーザー溶接は被溶接物の物性、熱源の出力、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、ビーム径の影響を強く受ける。ビームモードおよび発振波長はレーザー発振器によって決まるため、焦点でのビーム径を代表するF値 (Fig.1参照)、焦点位置、出力、速度が溶

* 技術研究所溶接研究室主任研究員
〔昭和56年2月16日原稿受付〕

** 技術研究所溶接研究室主任研究員・室長

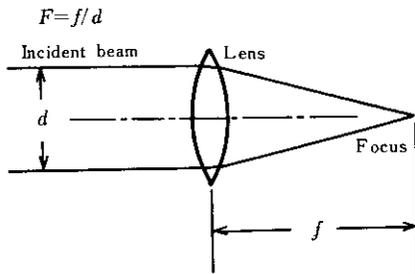


Fig. 1 Definition of F

接パラメータとして一般に採用されている。赤外線レーザーでは焦点位置の測定などビーム諸元の測定が比較的に行ないにくいことと、集光ビームが用いられるため被溶接物の突合せ間隙の許容値が小さく⁴⁾、開先の突合せ精度の要求が厳しいという問題がある。

3. 実験概要

レーザー溶接のパラメータとして重要なビーム諸元の測定方法および開先間隙の許容値の検討を行なうために、出力 2kW の炭酸ガスレーザー発振器を用い、Fig. 2 に示す配置で実験を行なった。ついで、得られた溶接パラメータを用いて一般冷延鋼、珪素鋼の突合せ溶接継手をつくり、その圧延性の

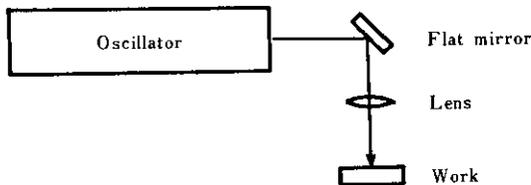


Fig. 2 Configuration of optical system

評価を反復曲げ試験、試験圧延により行なった。レーザー発振器の仕様を Table 1 に示す。

Table 1 Specification of CO₂ laser

Output power	2 000W, CW
Laser medium	CO ₂ -N ₂ -He
Wavelength	10.6μm
Beam diameter	25mm
Cavity length	8m
Gas system	Fast-flow, axial
Excitation	Gas discharge, 30kV

4. ビーム諸元の実験的検討

4-1 焦点

集光系はレンズで構成されるものと、反射鏡で構成されるものがある。焦点距離は公称値に対し数%の誤差を含むのが普通であり、使用にあたっては実際にビームを用いてその焦点を確認する必要がある。焦点位置の測定には以下に列記するような方法がある (Fig. 3 参照)。

- アクリル板をレーザービームを横切って一定速度で掃引し、板上に生じた溝幅が最小である位置をもって焦点とする。
- レーザービームの半分をアクリル板に平行にあて、アクリル板上の最小溝幅位置を焦点とする。
- 等エネルギー密度を与える被照射位置を二箇所求め、その中間点を焦点位置とする。
- 焦点が被溶接物表面にあるときに最大溶込み深さを与えるとして、ビードオンプレート溶接をし、その溶込み深さを測定することによって焦点位置を求める。

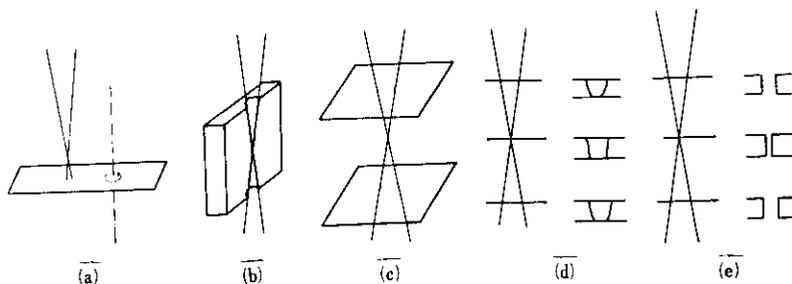


Fig. 3 Means for determining focus location

(e) 焦点が被切断物表面にあるとき、最小切断幅を得るとし、切断幅の測定を行なって焦点位置を求める。

(a) では高速度を得るためアクリル板を回転させる必要が生じ、実際の溶接、切断用の治具がそのまま使えないが、原理的に最も確度の高い方法と考えられる。(b) では Wall focusing 効果のためか、他の方法とのずれが大きい。(c) ~ (e) は簡便な焦点位置の求めかたで、いずれも実用上問題は無い。各方法によって得られた (a) に対する焦点位置の差は Table 2 のようであった。現場的に最も簡便な方法 (d) でも誤差は小さく、十分実用に供し得る。

Table 2 Comparison among means for determining focus location

Means	Condition	Deviation of determined focus location (mm)	Note
a		0	300m/min, Standard
b	2kW	2.5	—
c	F/5	0.5	—
d		0.4	4m/min
e		0.2	7m/min

- (a) Measuring diameter of the beam with moving acrylic plate
 (b) Checking longitudinal cross section of laser beam with acrylic plate
 (c) Determining mean point between cross sectional equi-energy density planes of the beam
 (d) Regarding focus as on surface when deepest penetration is obtained
 (e) Regarding focus as on surface when narrowest kerf width is obtained

4.2 ビーム径

溶接位置におけるビーム径の測定は前項の (a) で求めることができるが簡便法として以下のものがある。

- (f) テーパーギャップ試験片 (Fig.4) を用いて、A→B または逆方向にビームを走らせ、ビームの最小通過幅をもってビーム径とする。
 (g) アクリル薄板にビームを照射、穿孔し、その径をビーム径とする。

(f) は実際の被溶接材と同じ材質、表面状態の試験片をつくれれば、突合せ間隙の許容値を同時に

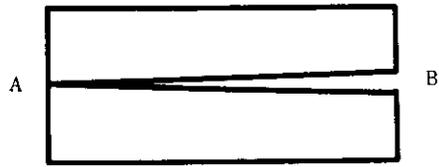


Fig. 4 Taper-gapped specimen

確認でき、実用的な方法である。

Table 3 に焦点におけるビーム径の測定結果を示す。ビーム断面でエネルギー密度の低い周辺部分はテーパギャップ試験片の表面で反射されるため、実際のビーム径は方法 (f) で得られたものより大きいと考えられる。方法 (g) は方法 (a) によるものより大きい値を与えることがあり、信頼性に乏しい。

Table 3 Diameter of focused beam

Means	Condition	Diameter (mm)	Note
a		—	—
f	1kW	0.15	5m/min
g	F/5	1.15	
a	2kW	0.5	300m/min
f	F/5	0.18	5m/min
g		1.45	

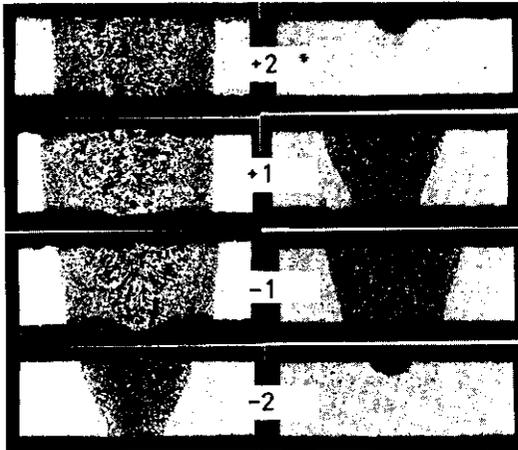
- (a) Narrowest width of burn pattern on moving acrylic plate
 (f) Narrowest gap through which the beam can pass
 (g) Diameter of drilled hole in thin acrylic plate by focused beam

一般に焦点位置でのビーム径は波長とレンズの焦点距離に比例し、レンズに入射するビーム径に反比例するものとして計算されている。Table 3 の条件では比例定数はほぼ 1 であるため、レンズに入射するビームの径を 25mm とすると、焦点でのビーム径はほぼ $32\mu\text{m}$ と算出されるが、レンズの取差、ビームの平行度の影響を無視しているため、実測値に比べ小さい値となり、実用に供し得ない。

4.3 焦点深度

レーザ溶接では被溶接材表面におけるビームのエネルギー密度が重要で、その表面状況によって異

なるビーム反射率に応じて、深溶込み溶接となるエネルギー密度のしきい値が存在する。焦点深度は対象加工材に焦点位置を変えてビームを照射し、溶込み形状を観察して決定する。Photo. 1 に焦点深度測定結果の一例を示す。



Case	Power (kW)	Focal length (mm)	F number	Welding speed (m/min)
A	1.2	127	10	1
B	1.1	127	14	1

* Distance from focus to plate surface (mm)

Photo. 1 Penetration corresponding to focus location

5. 溶接条件の検討

5-1 溶込み深さ

溶込み深さは出力、速度の関数であることはもちろんであるが、ビームモード、被溶接材組成にも影響を受ける。ビームを低次モードとし、出力をパラメータにとり、一般冷延軟鋼板を用いて速度と溶込み深さの関係を求め、Fig.5 に示す。リムド鋼とキルド鋼で材質の影響は認められない。

5-2 冷却速度

レーザー溶接時の温度分布は2次元の移動点熱源熱伝導方程式で記述でき、移動点熱源通過後の溶接線上の冷却過程は次の Rosenthal の式⁵⁾で表される。

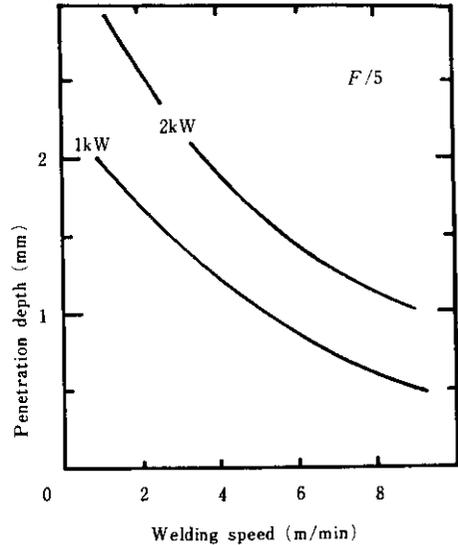


Fig. 5 Penetration curve

$$T - T_0 = (4 \pi k \rho c t)^{-1/2} (J/hv) \quad \dots\dots\dots (1)$$

T : 熱源通過時間 t 後の温度

T₀ : 初期温度

t : 熱源通過後の時間

π : 円周率

k : 熱伝導度

ρ : 比重

c : 比熱

J : 入熱

h : 板厚

v : 熱源の通過速度

鋼種により物性定数が変わるので、TIG 溶接時の溶接線上の熱サイクルから(1)式の係数をそれぞれの鋼種に対して求め、熱源通過後 500℃ までの冷却に要する時間を計算した結果を Table 4 に示す。リムド鋼 (3.2mm 厚) での冷却時間は 1 秒

Table 4 Cooling time to 500℃ in weld metal

Type of steel	Thickness (mm)	Welding condition		Calculated cooling time* (s)
		Power (kW)	Speed (m/min)	
Rimmed	3.2	2	1.5	1.0
Killed	3.2	2	1.5	1.0
Silicon A	2.0	2	3	1.0
Silicon B	3.2	2	1.5	1.7

* Time after heat source passing

であり、容易に硬化組織を形成し得る。**Photo. 2**にその組織を示す。ビード中央のビッカース硬さ Hv は母材の 100 に対して 200 になっている。

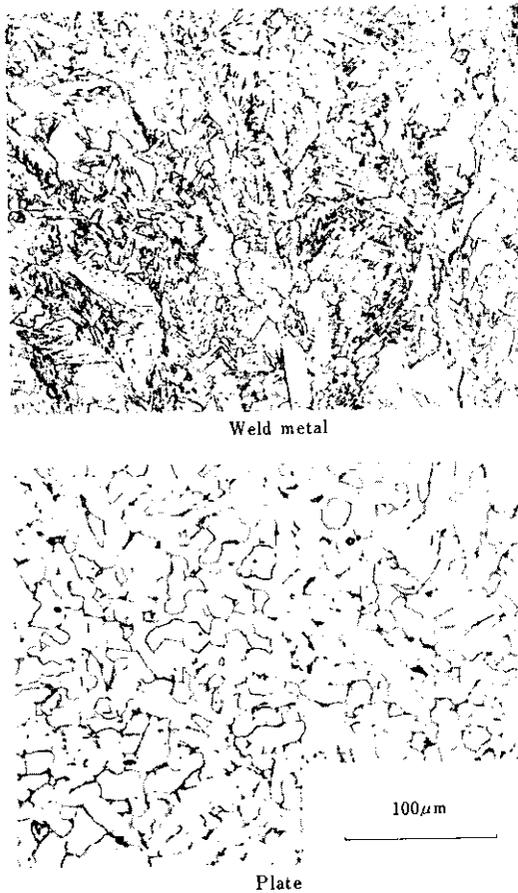


Photo. 2 Microstructure of laser welded rimmed steel

5-3 突合せ間隙の許容値

突合せ溶接 (Square Butt Welding) の許容間隙は原則としてビームの径以下であり、**Fig. 4** の試験片を用いてその許容値を求めることができる。**Table 3** から出力 2 kW、 $F/5$ で許容値はたかだか 0.2 mm であることがわかる。

許容間隙を拡大する手段には、つぎのものがあ

- (1) ビーム径の拡大
- (2) 開先内の充填
- (3) 傾斜溶接
- (4) ウィーピング溶接

それぞれの方法で検討した結果を **Table 5~8** に示す。いずれも裏当材を用いなくて溶接した。比較的厚い板ではウィーピング法が有効であるが、薄鋼板に対してはビーム径の拡大が効果的である。

Table 5 Fit-up tolerance for defocused beam welding

Thickness (mm)	Fit-up tolerance (mm)	Focus location* (mm)	Speed (m/min)	Welding** direction	Note
0.5	0.17	0	6	A→B	
	0.16	0	6	B→A	
	0.25	1.5	2	A→B	
	0.23	1.5	2	B→A	
	0.20	2	0.8	A→B	
	0.26	3	1	A→B	Blackened
1.0	0.20	0	3	A→B	
	0.20	0	3	B→A	
	0.30	1.5	1	A→B	
	0.30	1.5	1	B→A	
1.6	0.28	0	1	A→B	
	0.15	0	1	B→A	
	0.50	1.5	0.5	A→B	
	0.32	1.5	0.5	B→A	

* Distance from the plate surface

** Refer to Fig. 4

Table 6 Fit-up tolerance for iron powder inserting

Thickness (mm)	Fit-up tolerance (mm)	Particle size (μm)	Focus location (mm)	Speed (m/min)	Welding direction
0.5	0.15	149-177	0	6	A→B
	0.20	<44	0	6	A→B
1.0	0.35	149-177	0	3	A→B
	0.40	<44	0	3	A→B
1.6	0.23	149-177	0	1	A→B
	0.20	<44	0	1	A→B

Table 7 Fit-up tolerance for inclined welding

Thickness (mm)	Fit-up tolerance (mm)	Angle (rad)	Focus location (mm)	Speed (m/min)	Welding direction
0.5	0.14	0.43	0	4	A→B
1.0	0.18	0.43	0	1.5	A→B
1.6	0.45	0.43	0	0.5	A→B

Table 8 Fit-up tolerance for the welding with weaving

Thickness (mm)	Fit-up tolerance (mm)	Weaving		Focus location (mm)	Speed (m/min)	Welding direction
		Repetition (1/mm)	Width (mm)			
0.5	0.10	1.3	0.6	0	1.5	A→B
	0.35*	1.3	0.6	0	1.5	A→B
1.0	0.40	2.0	0.6	0	1.0	A→B
	0.30	2.0	0.4	0	1.0	B→A
1.6	0.60	4.0	0.6	0	0.5	A→B
	0.50	4.0	0.4	0	0.5	B→A

* Backing

6. 溶接継手の性質

一般冷延材ならびに珪素鋼板を供試材として溶接継手の性質を調べた。Table 9 に供試材の化学組成を示す。

6-1 硬さ分布

Table 4 と同一の溶接条件でのヒード硬さを Fig. 6 に、溶接速度を変えた場合の硬さを Fig. 7 に示す。低入熱高速溶接では最高硬さが Hv 300 を超え圧延時に問題となろう。

6-2 引張強さ

溶接継手の引張強さを Table 10 に示す。溶接金

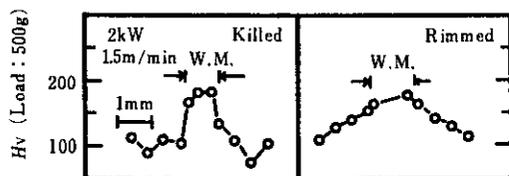


Fig. 6 Hardness distribution in welded joint

Table 9 Chemical compositions of materials used (wt.%)

Type of steel	C	Si	Mn	Al	P	S	O	N
Rimmed	0.068	0.003	0.35	0.001	0.014	0.018	0.0370	0.0018
Killed	0.042	0.020	0.31	0.059	0.013	0.015	0.0024	0.0076
Silicon A	0.009	2.77	0.17	0.27	0.014	0.005	0.0020	0.0040
Silicon B	0.034	3.15	0.07	0.001	0.008	0.004	0.0020	0.0037

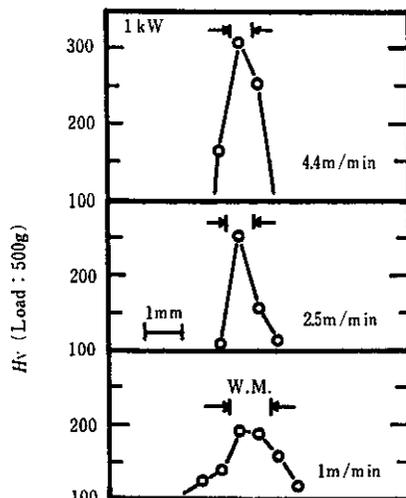


Fig. 7 Hardness distribution of welded at various welding speeds

Table 10 Results of tensile test of welded joints

Type of steel	Thickness (mm)	Power (kW)	Welding speed (m/min)	Tensile strength (kgf/mm)	Location of rupture
Rimmed	3.2	2	1.5	31	W.M.
Killed	3.2	2	1.5	32	B.M.
Silicon A	2.0	2	3	56	B.M.
Silicon B	3.2	2	1.5	55	B.M.

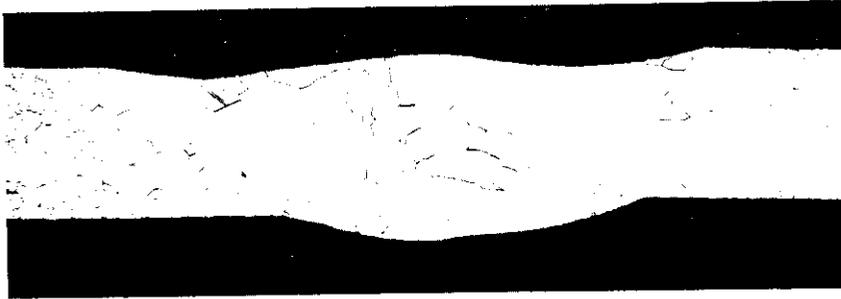
属の強さは硬さからも推測できるように母材をうわまわる。

6-3 反復曲げ延性

珪素鋼などの脆性材料に対して、圧延性の評価に反復曲げ延性試験が用いられる。珪素鋼を含む各種鋼のレーザ溶接継手の反復曲げ延性を調べた結果を Table 11 に示す。従来の比較的ビード幅の広い溶接継手を対象に定められた反復曲げ試験法

(JIS Z 3126)を狭幅のレーザー溶接部に適用することに問題は残るが、いずれも反復曲げ延性は良好であった。珪素鋼の溶接継手は通常のTIG、MIG法で行なった場合、熱影響部の結晶粒の粗大化の

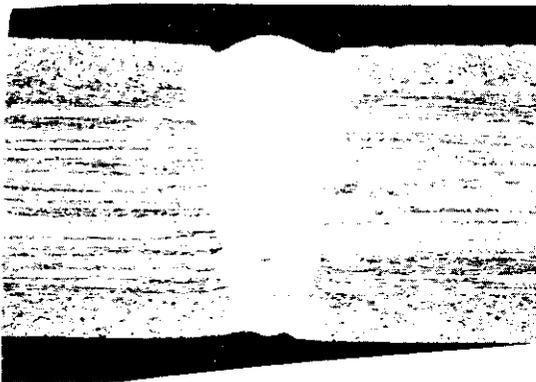
ため反復曲げ延性が悪く、圧延も困難であるが、レーザー溶接継手は急冷によって結晶粒粗大化が抑止されるため、反復曲げ延性が良好である。Photo. 3に珪素鋼のレーザー溶接継手の組織を示す。



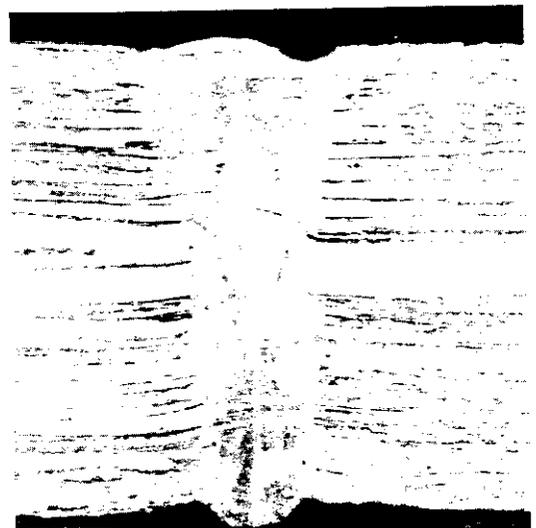
Steel A, 2mm thick, TIG 6 000 J/cm



Steel B, 32mm thick, TIG 6 000 J/cm



Steel A, 2mm thick, Laser 340 J/cm



Steel B, 32mm thick, Laser 800 J/cm

Photo. 3 Cross sections of TIG and Laser welded beads of silicon steels A and B

Table 11 Results of reverse bend test

Type of steel	Thickness (mm)	Radius of bending (mm)	Number of repetition to rupture	Location of rupture
Rimmed	3.2	30	5	W.M.*
			2	
			2.5	
			4	
Killed	3.2	30	63	B.M.
			65	
			67	
			70	
Silicon A	20	20	74	B.M.
			73	
			75	
			83	
Silicon B	3.2	30	21.5	B.M.
			8	
			9	
			2	

* Porous bead

6-4 圧延試験

Table 10 と同じ溶接条件で作製した継手を試験圧延機で圧延した結果を Table 12 に示す。工場の圧延機を用いる場合にくらべると、第1パス圧下率を除き、圧下率が低く、張力もかからないため、試験圧延結果から決定的な判断は下せないが、反復曲げ延性試験結果も溶接欠陥のあったリムド鋼

Table 12 Results of test rolling of welded joints

Type of steel	Pass schedule (mm)	Crack length* (mm)
Rimmed	3.2-2.5-2.0-1.6-1.1-0.8	0
Killed	"	0
Silicon A	2.0-1.7-1.2-0.8-0.6-0.5	0
Silicon B	3.2-2.5-2.0-1.6-1.1-0.8-0.6-0.5	0

* Total crack length on rolled welded joint

の場合を除き母材より良好であるため、溶接欠陥がなければいずれの鋼種の継手も実圧延に耐えると判断される。

7. まとめ

レーザービーム諸元の測定法、溶接条件の検討を行なったのち、極小入熱条件で溶接継手をつくり、その試験圧延を行なった。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) ビーム諸元は生産現場で容易に測定ができ、開先間隙の許容値は非常に小さいが現行技術で克服できる範囲内にある。
- (2) 溶接部の冷却速度が速く、一般冷延材でも硬化組織を形成する。
- (3) 一般冷延鋼材、珪素鋼のレーザー溶接継手の試験圧延結果は良好であった。

参考文献

- 1) E.V.Locke : Metal processing with a high power CO₂ laser, J. Quantum Electronics, QE-10 (1974) 2, 179
- 2) M.Yessik : Laser processing at Ford, Metal Prog., 107 (1975) 5, 61
- 3) M.N.Watson : Laser welding applications, W.I. Research Bulletin, 21 (1980) 8, 236
- 4) S.L.Engel : Tooling up for laser welding, SME paper No, MR-76-873, (1976)
- 5) D.Rosenthal : The theory of moving heat sources of heat and it's application to metal treatments, Trans. ASME, 12 (1946) 11, 849