突合せ溶接したステンレス鋼薄板の成形性*

安田 克彦**, 神馬 敬***, 恩沢 忠男****

Formability of Butt Welded Stainless Steel Thin Sheet*

by Katsuhiko Yasuda**, Takashi Jimma*** and Tadao Onzawa****

The formability of butt welded stainless steel sheets was investigated through Erichsen cupping and deep drawing tests.

In the case of austenitic stainless steel SUS304, even TIG welded sheet with wide fused zone showed the same degree of formability as that of base material, taking care against lubricant. In the case of ferritic stainless steel SUS430, the EB welded sheet with narrow fused zone was better than that of TIG welded sheet. The formability of welded sheet of modified SUS430 with lower C and with ferrite-forming element was nearly equal that of base material.

1. 緒 言

近年、加工技術の複合化が各方面で注目されてきている。溶接においても、たとえば電縫管の製造では冷間ロール成形、溶接、矯正の工程がタンデムに直結された塑性加工との複合加工であり、さらにステンレス鋼流し台や浴槽などのプレス加工においても塑性加工と溶接加工の複合化が見受けられる。こうした塑性加工と溶接のかかわりにおいて溶接をどのような方法で利用するかは問題で、溶接方法や成形方法を工夫することにより塑性加工前に溶接を行うことで、i)溶接をやりやすくする、ii)材料の歩留りを高める、iii)成形限界が向上できる、iv)溶接によって生ずるひずみをその後の塑性加工で矯正できる、などの利点が得られる。ただ、こうした塑性加工と溶接の複合加工は、実作業では行われているものの関連する研究は極めて少ない^{1,2)}。

本報は、突合せ溶接した薄板材のプレス成形において問題となる溶接材の成形性をステンレス鋼の場合について検討した結果について述べる。

2. 実験方法

本実験に使用した材料は、板厚 0.8 mm の市販のステンレス鋼板で、その化学成分を Table 1 に示す。

これらの材料はシャー切断の後、溶接前に脱脂処理を

行いワイヤブラシで清浄し溶接を行った。溶接は主としてティグ溶接を用い、トーチを固定した状態で溶接棒を使用しない片面溶接を行った。この場合、母材ルート部裏面は Ar によるバックシールドを行い、溶接速度 40 cm/min 一定で溶接電流を変化させ、各種の溶融幅の試験材を得た。なお、特に溶融幅の狭い試験材の製作にはその状態で優れた片面溶接性を示す電子ビーム溶接を採用した。

溶接された試験材は、溶接線が試験片中心線位置となるよう加工し、エリクセン試験、円筒深絞り試験及び引張試験を行った。Table 2 は、成形試験における試験方

Table 1 Chemical compositions of material used

Material	Chemical composition (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti
SUS 304	0.06	0.67	1.01	0.027	0.011	8.67	18.33	—
SUS 430	0.058	0.47	0.41	0.023	0.009	0.39	16.59	—
low carbon SUS 430	0.02	0.54	0.34	0.019	0.007	0.21	16.30	—
low carbon SUS 430 with Ti	0.007	0.57	0.24	0.030	0.006	0.21	17.09	0.34

Table 2 Conditions for forming tests

Test	Erichsen cupping	Deep drawing
Method
Punch	$r_p = 10.0\text{mm}$	$\phi_p = 40.0\text{mm}$ ($r_p = 4\text{ or }8\text{mm}$)
Die	$\phi_d = 27.0\text{mm}$ ($r_d = 0.75\text{mm}$)	$\phi_d = 42.5\text{mm}$ ($r_d = 6\text{mm}$)
Lubricant	Graphite grease Polyethylene film with machine oil	Machine oil (#110) Stainless steel forming oil
Working speed	10 mm/min	10 mm/min

*原稿受付 昭和59年2月28日 (全国大会論文発表講演)

**正 員 職業訓練大学校 Member, Institute of Vocational Training

*** 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology

****正 員 東京工業大学 Member, Tokyo Institute of Technology

法および試験条件を整理して示したものである。なお、これらの試験結果の多くは母材の表面と裏面での溶融幅の平均値 (W_B) と母材板厚 (t) の比, W_B/t で整理した。

3. 実験結果および考察

3.1 溶接材の張出し成形性

Fig. 1 は、素材の圧延方向と平行に板継ぎした SUS 304 溶接材のエリクセン試験の結果で、標準潤滑材であるグラファイトグリースの他にマシン油を含ませたポリエチレン膜を潤滑材として用いた。

まず、素材のエリクセン値 (E_r) は潤滑性能の優れたポリエチレン膜を用いた方がグラファイトグリースを用いた場合に比べて約 1.7 高い。ところが、溶接材の E_r は潤滑方法によってかなり異なり、グラファイトグリースの場合には素材の E_r と等しく、かつ溶融幅の影響をほとんど受けない。これに対して、ポリエチレン膜の場合には溶融幅の影響を強く受け、溶融幅 (W_B) が板厚

Fig. 1 Erichsen value of welded SUS304 sheet

Fig. 2 Deformation characteristic in Erichsen cupping test of SUS304 sheet

(t) の 4 倍以上になると E_r は急激に低下する。なお、 $W_B/t < 4$ の範囲では、ポリエチレン膜を用いて潤滑した溶接材の E_r は同じ潤滑条件の素材の E_r よりは低く、グラファイトグリースを用いて潤滑した溶接材の E_r よりも高くなる。

Fig. 2 は、エリクセン試験における各ポンチストローク (成形高さ) S_p での試験片各位置の基本的な円周方向伸びひずみを素材で求めた結果で、グラファイトグリースを潤滑材とする場合では成形初期にポンチ頭部に当る試験片中心部の変形が進み、その後は中心から 7 mm 程度離れた部分に変形が集中する。したがって、溶接線と直角方向においては成形過程での変形に対し溶接部の存在が無視できるようになり、また溶接線方向においても溶接部の変形能が比較的高いことから溶接材も素材と同等の成形性を示したと考えられる。Fig. 3(a), (b), (c) がその成形結果の代表的なものである。一方、マシン油を含ませたポリエチレン膜を潤滑材とした場合では、グラファイトグリースに比べて潤滑性能が良かったためポンチの試験材に対する摩擦抵抗が減少し、試験材中心部もかなりの変形を受けるようになる。したがって、 W_B/t が 4 以上の溶接材では、変形能が母材に比べてやや低い溶融部の存在が溶接線と直角方向の変形に対し無視できなくなり、Fig. 3(e), (f) のような溶融部に溶接線に平行な割れを発生するようになる。また、成形による変形を受ける領域に溶融部が占める割合が多くなるほど溶接材の成形性は低下する。ただ、 W_B/t が 5.5 程度であっても素材の 80% 程度の成形性が認められ、極端に溶融幅を広げない限り、一般的な成形加工においてはさほど問題とならないことがわかる。また、 W_B/t が 4 以下の溶接材では、破断は Fig. 3(d) に示すように素材の場合に近い位置で溶融部に溶接線と直角方向に割れを生じ、素材に近い成形性を示す。なお、溶融幅の狭い W_B/t が 3 前後においても成形性の低下が認められる。これは、ティグ溶接でこのような溶融幅の狭い片面溶接を行うと、裏面での融合が片寄る状態となり、成形での破断が裏ビードのルート部で発生するようになったためであ

Lubricant : Graphite grease

Lubricant : Polyethylene film with machine oil

Fig. 3 Erichsen cupping test results of welded SUS 304 sheets

る。ただ、 W_B/t が 1.2 程度の電子ビーム溶接材では、融合状態が改善されることでこうした破断とはならず、ティグ溶接で良好な融合が得られた場合と同様の Fig. 3(d) のような破断となり、素材に近い成形性を示す。

Fig. 4 は、SUS 430 ティグ溶接材のエリクセン試験を潤滑剤にグラファイトグリースを用いて行った結果である。この種の材料では溶接部が結晶粒の粗大化や粒界へのマルテンサイトの生成によりぜい化するため³⁾、溶融

Fig. 4 Erichsen value of welded SUS 430 sheet

部が直接的な変形を受ける成形の初期に割れを発生し、溶接材の張出し成形性はほとんど期待できない。なお、溶接方向が板の圧延方向に対して平行 (0°)、直角 (90°) のいずれの場合も同様の結果となる。ただ、 W_B/t が小さくなると、変形域に占めるぜい化域の割合が少なくなるため成形性の改善が認められる。Fig. 5 は SUS 430 の素材およびティグ溶接材、電子ビーム溶接材のエリクセン試験結果の一例を示したもので、電子ビーム溶接のように完全な溶込みが得られ、しかも溶融幅の狭い溶接が可能となる場合は溶接材も素材に近い成形性を示すまでに改善される。

Fig. 6 および 7 は、この種の材料の溶接材の成形性を材料面からの改善を検討した結果で、粒界におけるマルテンサイトの生成を防止する目的で炭素含有量を低めた材料及び低炭素でしかもフェライト生成元素の Ti を添加した材料では、溶接材の成形性の改善が顕著に認められる。ただ、これらの材料では、溶接材の成形性が W_B/t の値や素材圧延方向に対する溶接方向によって特異な変化を示しているが、こうした現象は成形時の破断様式が継手の硬さ分布などによって変化したためであると解釈される。

Fig. 8 は、フェライト系ステンレス鋼溶接継手の硬さ分布を示したもので、低炭素素材では SUS 430 の場合と

Fig. 5 Erichsen cupping test results of SUS 430 materials

Fig. 6 Erichsen value of welded low carbon SUS 430 sheet

Fig. 7 Erichsen value of welded low carbon SUS 430 with Ti sheet

Fig. 8 Hardness distributions of welded joints in ferritic stainless steels

同様に溶融部と母材部での硬さに差が認められるものの、Ti 添加材ではこの差は比較的小さい。なお、引張試験から求めたフェライト系材料の加工硬化指数は 0.3 程度で、各々の材料での差は極めて少ない。すなわち、低炭素材は 430 材に比べ、溶融金属の変形能が改善されしかも溶融部と母材部での硬さの差が大きく、成形時の母材部の加工硬化による硬さの逆転は考えられず、溶接線と直角方向の変形に対し溶融部は変形しにくく、むしろ成形中にたえず変形を受ける溶接線方向で溶融部に横割れの状態と破断を生じたと考えられる。逆に Ti 添加材では、低炭素材と同様の溶融部の変形能の改善は認められるものの、母材部との硬さの差は小さく、母材部の変

形による加工硬化で溶融部が軟化域となり、変形が集中しやすくなったため縦割れの状態と破断したと考えられる。Fig. 9 にフェライト系ステンレス鋼溶接材の成形結果を示しているが、上述の破断様式に差の生じている状態がよくわかる。

なお、素材圧延方向に対する溶接方向の張出し成形に対する影響の違いは、横割れの状態となる低炭素材では割れの発生する方向を変形能の優れた圧延方向となるように、素材圧延方向を溶接方向とする方がよく、縦割れの生ずる Ti 添加材では全く逆の傾向となる。このように、フェライト系ステンレス鋼のティグ溶接材においても、材料を低炭素にするかまたはこれにフェライト生成元素を添加することで素材の 60~80% の張出し成形が可能となり、電子ビーム溶接材では Fig. 5(c) に示す成形状態となり、やはり素材に匹敵する成形性が得られるようになる。

3.2 溶接材の深絞り成形性

試験片中心位置で板縫ぎされた円形のブランクから円筒深絞り加工により、溶接材の深絞り成形性を検討した。

溶接材の深絞り成形においては、溶融部の縮みフランジ変形に対する変形能が問題となることは少なくむしろ成形初期のポンチ底部および肩部での変形が問題となり、その成形性は張出し成形の傾向に類似する。すなわち、比較的変形能に富む溶融金属である SUS 304 や

Fig. 9 Erichsen cupping test results of welded ferritic stainless steel sheets

Fig. 10 Deep drawn cups of SUS 304 shetes (D.R. (Drawing Ratio=Blank dia./Punch dia.)=1.93)

SUS 430 の改良材では、素材とほぼ同等の成形性を示すが、SUS 430 材では成形初期に容器肩の溶融部で破断し成形し得ない。Fig. 10 には潤滑剤にマシン油 (#110) を用い肩半径 8 mm のポンチで成形した SUS 304 材、Fig. 11 には潤滑剤にステンレス鋼成形油を用い肩半径 4 mm のポンチで成形した各フェライト系ステンレス鋼を、それぞれの素材の成形限界に近いブランク径で成形したもので示している。なお、SUS 430 低炭素材の場合では、Fig. 11 に示すように成形完了時とほぼ同時に発

生する微小割れが容器壁の溶融金属中央部附近に認められ、この材料での溶融部の変形能の改善が十分でなかったことを示している。ただ、この場合も溶融幅を狭くすると、こうした割れは発生せず良好な成形が行われる。

こうしたフェライト系ステンレス鋼における組成の改良効果は、異なった素材を溶接した接合ブランクの深絞り成形⁴⁾においても認められる。すなわち、SUS 430 の円環状素材の中心に SUS 304 の基本ブランクを接合した異材接合ブランクでは、Fig. 12(a) に示すように溶接ボンド部から破断してしまうが、円環状素材として低炭素 Ti 添加の改良材を用いた場合には同 (b) のように良好な成形が可能となり、接合ブランクを用いることの有効性が認められる。一方、基本ブランクとして板厚の厚い同質材を用い成形限界を向上させようとする同質材接合ブランクによる深絞りにおいても、Fig. 13 に示すように基本ブランクと円環状素材を溶接した時の溶融幅が狭い方が成形性が改善されており、こうした溶接材の深絞りにおいても、溶融幅の狭くなるような溶接方法が有効であることがわかる。

3.3 溶接材の引張変形特性

上に述べたように、溶接材の成形性は継手の伸び変形能に左右されることが多く、(i)溶融金属自体の変形能、(ii)溶融部と母材部の硬さの違い、(iii)変形による硬さ分布の変化などによっても影響を受ける。

Fig. 14 は、試験片中心が溶接部となる JIS 13 号 B 引張試験片で SUS 304 溶接材の引張試験を行った結果で、 W_B/t の値が 2.5 附近を境に破断が母材部から溶融部へ移り、引張強さは溶融幅が広がるほど低下している。なお、母材で破断した場合では、溶接部の両側でくびれを生じ、このくびれの状態などで強さはわずかに変化するものの引張強さは母材のそれより高くなる⁵⁾。Fig. 15 は、引張試験での破断位置を中心に、各位置での伸びと硬さを整理したもので一様伸び、極限伸びとも素材の方が溶接材に比べ大きく、それにとまって各位置の硬さも高い。

試験前の溶接材においては、溶融部は母材部に比べ Fig. 8 の低炭素 SUS 430 材程度の硬さの差を示していることから、溶融部は母材部に比べ降伏応力は高いが加工硬化が少ないことがわかる。すなわち、溶接材が引張荷重を受けると、変形初期の溶融部が降伏するまでは母材部で変形の大部分を受けつつも、溶融部が一旦降伏して後は母材部に比べ加工硬化の少ない溶融部の変形が急速に進んで破断に至ったと考えられる。一方、 W_B/t が

Fig. 11 Deep drawn cups of welded ferritic stainless steel sheets

Fig. 12 Deep drawn cups with annular welded blanks (D.R.=2.3)

Fig. 13 Effect of width of fused zone on L.D.R. of annular welded SUS 304 blank

Fig. 14 Relation between tensile strength and width of fused zone of SUS 304 welded joints

Fig. 15 Distribution of tensile strain of SUS 304 specimen

Fig. 16 Relation between tensile strength and width of fused zone in ferritic stainless steel welded joints

2 以下では、溶融部周辺の母材がこの部分の変形を一部受けつような状態となり多くの場合が母材破断に移行したと考えられる。

Fig. 16 は、フェライト系ステンレス鋼溶接材の引張試験結果で、溶融部にはほとんど伸び変形が期待できない SUS 430 材においても、溶融部が母材部に比べ硬く、しかもその差が大きく、また母材の加工硬化が少ないことなどから、 W_b/t が 5.5 程度までの溶接材ですべて母材破断となっている。同様の傾向は低炭素 SUS 430 溶接材においても認められ、溶融部の伸び変形能が改善されたことから、 W_b/t が 7 程度であっても溶融部破断には移行しない。一方、溶融部と母材部での硬さの差の少な

い Ti 添加材では、変形域における溶融部の存在が無視できるような溶接材を除き、変形初期に硬さ分布が逆転し、溶融部破断となっている。この場合、溶融部の変形能は改善されており、成形性は向上しているものの成形初期に硬さ分布が逆転、溶融部破断となるため、張出し成形のような場合には素材に近いまでの成形性の改善は望めない。

以上のように、引張試験での溶接材の変形特性は、先に述べた溶接材の成形特性を良く裏付ける結果となっている。

4. 結 論

ステンレス鋼溶接材の成形性について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

(1) SUS 304 の場合、溶融幅が広くなり易いティグ溶接材でも一般的な張出し成形や深絞り成形に関しては素材に匹敵する成形を示す。

(2) 溶接部近傍で変形量の多い加工や、接合ブランクによる深絞りを SUS 304 の溶接材で行う場合、溶融幅を狭くすることで成形性が改善される。

(3) SUS 430 の場合には溶接部のぜい化が著しく、一般的なティグ溶接材の成形はほとんど期待できない。

(4) SUS 430 で炭素含有量を低く抑えるなり、これにフェライト生成元素を添加した改良材では、ティグ溶接材でも素材の 60% を越える成形が可能となる。

(5) SUS 430 ならびにその改良材においても、成形性は溶融幅が狭くなるにしたがって改善される。

(6) 突合せ溶接材のエリクセン試験における潤滑材としては、一般的なグラファイトグリスよりも潤滑性の良いマシン油を含ませたポリエチレン膜の方が材料の特性を良くあらわし得る。

おわりに、本研究を始めるにあたり元職業訓練大学学校教授、故阿部邦雄博士に適切な御助言をいただいた。ここに故人に対し深く感謝の意を表するとともに御冥福を御祈りする。

参 考 文 献

- 1) 安田; 溶接を利用したプレス加工, 本誌50-1 (1981), 120-125
- 2) 西田, 矢田, 山本; 各種ステンレス鋼薄板の電子ビーム溶接継手特性, 本誌44-6 (1975), 11-18
- 3) 西尾, 大前, 吉田, 三浦; 17Cr ステンレス鋼の溶接に関する研究, 三菱重工技報7-6 (1970), 70
- 4) 安田; 溶接を利用した深絞り, 塑性と加工20-8 (1979), 756
- 5) 佐藤, 豊田; 機械的不連続をふくむ材の静的引張強度に関する基礎的研究, 本誌40-9 (1971), 54-56