鉄鋼用摩擦攪拌接合装置の試作

西原 公*

Development of Friction Stir Welding Apparatus for Steels

Tadashi NISHIHARA

Synopsis : Friction stir welding (FSW) is a relatively new solid-state joining process primarily for aluminum alloys. FSW process can also be applied to the welding of a variety of other materials, including magnesium alloys, titanium alloys, stainless steels and metal matrix composites. While considerable experimental work has been done in FSW, there is little published information about FSW apparatus for steels. The development of new FSW apparatus for steels needs to proceed with caution and attention to detail and the reduced cost and time.

The objectives of this study are to develop a FSW apparatus for steels and to discuss some initial results on FSW of mild steel.

Key words: friction stir welding; FSW; tool; mild steel; tungsten carbide tool.

1. 緒言

非消耗回転ツールとワークの間に発生する摩擦熱と塑性流動を利用した新しい固相接合法としてFriction Stir Welding (FSW/摩擦攪拌接合)が注目されている。本接合法は英国ケンブリッジにあるTWI(溶接研究所/接合・溶接・表面改質に関する受託研究機関)で発明され、1991年に特許が取得された¹⁾。

本接合法は、Fig. 1のように回転するツールを溶接部材に押し付け、移動することによりキーホール溶接的に摩擦接合が行われるものである。このツールは図に示すようにプローブとショルダと呼ばれる部分が必要とされている。

このFSWは特に溶接性が劣るアルミニウム合金板の接合に適していることからその研究が集中的に行われ、さらに銅、マグネシウムそして現在ではチタン、ステンレス鋼、MMC(金属基複合材料)にまで応用の可能性が広く検討されている。またその応用分野の可能性は航空宇宙、自動車、鉄道および海洋など、多岐にわたっている。現在約115企業/組織がFSW技術の使用実施権を得ており、FSW

に関連した1200以上の特許を申請している²⁾。また欧米、日本、オーストラリアの数社が商業製品の開発を行っている。

しかしながら、FSWの原理は公表されているが、溶接機器および接合条件についての詳細については不明の点が多く、特にツール形状などの具体的な形状寸法はほとんど明らかにされていない。さらに鉄鋼材料などのFSWには高温に耐えるツールが必要なこともあり、その研究は比較的少ない³⁻¹⁰⁾。

本研究においては鉄鋼材料のFSWが可能なシステムを試作し、その接合および材質改善の可能性を検討する。

2. 実験方法

試作したFSW装置をFig. 2に示す。本装置は大別して、(1)立型フライス盤、(2)供試材拘束ジグ、(3)ツール、および(4)ツールホルダーから構成されている。ツールは

Fig. 1. Principle of friction stir welding.

Fig. 2. Experimental setup of friction stir welding system.

平成21年9月29日受付 平成21年12月29日受理 (Received on Sep. 29, 2009; Accepted on Dec. 29, 2009)

* 国士舘大学理工学部 (School of Science and Engineering, Kokushikan University, 4-28-1 Setagaya Setagaya-ku Tokyo 154-8515)

Fig. 3. Inside of prototype FSW chuck.

Fig. 4. FSW of mild steel.

Fig. 5. Example of broken tool probe.

Fig. 6. Face (a) and root (b) roller bend tests and tensile test (c) in mild steel sheets.

WC系の超硬合金（三菱マテリアル GTi30C）を用いてショルダ径15 mm，プローブ形状が円錐台形（根元径5.0 mm，先端径2.0 mm）のものを試作した。本実験においてはプローブ高さ2.8 mmとした。試作したツールホルダの内部をFig. 3に示す。ホルダー部はツール本体を固定するコレットチャックを含む回転部および非回転部の二重構造からなり，外部より冷却ガスあるいはシールドガスを供給することが可能である。本実験においては窒素ガスを使用した。

供試材は市販のSPCC材とした。板厚は3 mmであり，ツール回転数1335 rpm，溶接速度30~50 mm/minで突合せ溶接を行った。また開先はI型とし，ルート間隔は0 mmとした。

3. 実験結果および考察

3・1 軟鋼のFSW例

軟鋼のFSW時におけるツールおよび供試材近傍の外観をFig. 4に示す。ツールおよび供試材の色からかなり高温になっていることが推測された。本実験において温度測定は行わなかった。ツールおよび供試材などの温度変化の詳細を知ることが必要となろう。鉄鋼材料の変態とFSW時の急熱・急冷などの相互作用による組織改善等も期待できる。

またFig. 5に示すように接合中にツールのプローブ部分

が破損する場合があった。本実験において使用したツールは市販のWC系超硬合金を加工したものであるが，ツール寿命はかなり超硬合金の等級に依存した。高温下における硬さ，弾性率，圧縮強度および破壊靱性などの相違によるものと思われる。FSW時の高温に耐える安価なツール開発が望まれる。

3・2 FSW継手性能の評価

継手の性能を評価するために引張試験および曲げ試験を行った。曲げ試験はJISZ3122 ローラ曲げ試験 ($R=5$ mm) に準拠して行った。Fig. 6に試験後の外観を示す。引張試験においてはすべて母材で破断した。裏曲げ試験においては最終的にルート部より亀裂が生じ，表曲げにおいて破断は生じないが，Fig. 6(a) に示すように表面にいくつかの割れが生じた。

表曲げ試験において，割れはFig. 7に示すように表面のみに生じていた。すなわち割れは表面で発生し，表面直下でその進行を停止していることがわかる。Fig. 6に示すように引張試験においては母材で破断しており，FSW継手部の表面近傍が硬化していることが考えられる。

3・3 FSWによる硬さおよび組織の変化

突合せ継手断面の表面から1.5 mmにおける硬さ分布をFig. 8に示す。母材から撈拌部中央に向かって硬化する傾向にあることがわかる。撈拌部においては等軸微細結晶粒が観察されている。

Fig. 7. Example of surface cracks.

Fig. 8. Hardness distribution across the mid-section through the FSW zone.

突合せ継手断面中央部の表面から裏面方向への硬さ分布を Fig. 9 に示す。表面近傍で硬さが急激に増大することがわかる。表面近傍では最高硬さ 906HV1.0、平均硬さ 573HV1.0 が観察された。

Fig. 9 に対応する表面近傍の組織変化を Fig. 10 に示す。表面近くにはマルテンサイトと思われる白色層が存在し、その下方にはウィドマンステッテン組織が観察された。これらのことから FSW 時のツール直下ではオーステナイト域への急熱およびオーステナイト域からの急冷が生じ、母材の（フェライト＋パーライト）組織からマルテンサイトおよびウィドマンステッテン組織が生じたものと考えられる。

4. 結言

試作した鉄鋼用 FSW 装置により軟鋼の FSW を試み、FSW 特性を実験的に検討した結果、固相接合により健全な継手が得られる可能性があることを示した。しかしながら、鉄鋼の FSW 時の温度測定、さらに急熱急冷現象との

Fig. 9. Hardness distribution from face to root.

Fig. 10. Microstructure of near surface in the friction stir welded mild steel.

関連を知ることも重要であり、今後さらなる研究が必要と思われる。

最後に、本研究の一部に対しご援助いただいた（社）日本鉄鋼協会に深甚なる感謝をいたします。

文 献

- 1) W.M. Thomas *et al.*: Friction Stir Butt Welding, 2 International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application No. 9125978.8, Dec. 1991, U. S. Patent No. 5,460,317.
- 2) Spreadsheet of FSW patents: <http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/binary/FSWPatents.xls>.
- 3) 摩擦撹拌接合—FSWのすべて—, 溶接学会編, 産報出版, 東京, (2006), 129.
- 4) H.Fujii: *Weld. Technol.*, **53** (2005), 60.
- 5) L.Cui, H.Fujii, N.Tsuji, K.Nakata and K.Nogi: Proc. 6th Int. FSW Symp., Montreal, Canada, 10–13 October, 2006, CD-ROM.
- 6) T.Ishikawa, H.Fujii, K.Genchi, S.Iwaki, S.Matsuoka and K.Nogi: *Tetsu-to-Hagané*, **94** (2008), 539.
- 7) H.Fujii: *J. Jpn. Weld. Soc.*, **77** (2008), 731.
- 8) R.Ayer, D.P.Fairchild, S.J.Ford, N.E.Nissley and A. Ozekcin: Proc. 7th Int. FSW Symp., Awaji, Japan, 20–22 May, 2008, CD-ROM.
- 9) H.Fujii: *J. Jpn. Weld. Soc.*, **78** (2009), 274.
- 10) M.Fujimoto: *J. Jpn. Weld. Soc.*, **78** (2009), 520.