強変形せん断接合法の創生とその基本的特性

—— 熱間エンドレス圧延用バー接合への

固相接合方式の適用に関する研究 第 2 報 ——

堀井 健治* 舟本 孝雄** 芳村 泰嗣*

Creation and Fundamental Characteristic of Super Deformation Joining Method

—— A Study of Solid-State Joining for In-Line Bar Joining of Endless Hot Rolling II ——

Kenji HORII*, Takao FUNAMOTO** and Yasutsugu YOSHIMURA*

(Received on May 30, 2008)

The endless hot rolling concept was introduced to meet the demand for diverse hot-rolled steel sheet products produced by a cost-effective process compared with the conventional batch-type process. Endless rolling involves joining the head and tail ends of two bars following their rough rolling. By applying solid-state joining utilizing the high temperature of the joined materials for endless hot rolling, a new joining technology was proposed to instantaneously obtain a sound and uniform joint as the base metal using relatively simple equipment. This report presents the super deformation joining method, which was developed from a study on remedying the friction joining method. In this method overlapped materials are sheared incompletely to obtain a sound joint. In laboratory tests, in the presence of scale on the overlapping surface, the joint strength was approximately half that of the base metal, and the joint area was about 60 %, although the joint strength was approximately the same as that of the base metal when there was no surface scale. Obtaining a sound joint under actual hot rolling conditions, in the presence of scale on the overlapping surface remains a problem to be overcome.

Key words: endless hot rolling, conventional batch-type process, joining, solid-state joining, super deformation joining (SDJ), friction joining.

1. 緒 言

熱間圧延で多くのメリットを有するエンドレス圧延は、バー接合技術や熱間圧延工場全体にわたる連続圧延システムの構築など難しい課題が数多く存在するが、1996年に誘導加熱+圧接¹⁾、1998年にレーザ溶接²⁾を利用した接合技術が採用され実用化している。これら2例の接合は、いずれもやや長い接合時間を要するため、接合装置は走行台車方式となり移動距離が長く大掛かりな設備となっている。

熱間エンドレス圧延にて、より広く採用され得る接合方式であるためには、簡単な接合機で、瞬間的に接合ができて、母材並みの強度が確実に得られることを条件とした方式であることが望まれる。

この開発指針をもとに接合方式として固相接合を基本とする新技術の創生を目指した。固相接合方法を採用した背

景は、熱間圧延材が高温であるので特別な加熱無しに瞬時に圧着できれば、接合時間の短縮が可能と考えられたからである。

しかし、固相接合を実現するためには接合面の酸化スケールを除去し清浄化する必要があり、加圧方法と併せこれら課題を解決する必要があった。

前報³⁾では、接合面の清浄化方法として、接合面を切断して摺動圧着端面を得て、接合面的一方で相対する接合面を摺動して酸化スケールを剥離し接合する摺動圧着接合法について報告した。

摺動圧着接合法は、短時間に接合できる可能性はあるが、摺動領域が上面側と下面側を除く厚さ方向の中央部付近に限定され、酸化スケールも残存し真に接合された面積は小さく、また、その真に接合された部分の接合強度も不十分であった。高い接合強度を得るためには、接合面全体を摺動し大きな押圧力を与えて接合する必要があり接合機も大型化することから実用化へのハードルは高いことが予想された。

本報では、摺動圧着接合法の課題を克服する新しい接合法である強変形せん断接合法の創生と、その基本的特性に

* 三菱日立製鉄機械(株) 〒108-0014 東京都港区芝 5-34-6
Mitsubishi-Hitachi Metals Machinery, Inc.
5-34-6 Shiba, Minato-ku, Tokyo 108-0014, Japan.

** 日立協和エンジニアリング(株) 〒317-0072 日立市弁天町 3-10-2
Hitachi Kyowa Engineering Co., Ltd.
3-10-2 Benten-cho, Hitachi-shi 317-0072, Japan.

ついて報告する。

2. 強変形せん断接合法の概要

前報の摺動圧着接合プロセスでは、バー材それぞれを別々に切断後、摺動圧着することとなるが、別々に切断する限り同一のシヤーで切断したとしてもその切り口形状は同一とはならない。

Fig. 1 は、シヤーのカット断面を示す。ドラムシヤーによる切り口⁴⁾は、先細りでとがった形をしている。また、ペンジュラムシヤーによる切り口⁵⁾は、ほぼ垂直なせん断面となるものの、実際には2つのせん断面の垂直度合いにわずかな差が存在している。

Fig. 1 Comparison of cross section of cut shape by the drum shear and the pendulum shear

接合する2つの端面を別々に切断して接合面を得る方法では、切断後接合までに形成される酸化スケールと不揃いのせん断面という固相接合にとって厳しい条件が存在する。

この問題を打開するために、新しい切断方法としてバー材2枚を重ね、刃物で同時にせん断し、得られた新生な切断面同士を摺動圧着するプロセスを模索し、2枚重ねせん断を検討した。2枚の試験片を重ねて上部材と下部材を刃物で同時にせん断した際に、上部材と下部材をはずそうとしてもはずれないことがあり、そのせん断面の観察から発見された新しい接合方法が強変形せん断接合 (Super Deformation Joining: 略称「SDJ」) 法である。

Fig. 2 に、切断途中の切り口部の断面組織を示す。

2枚重ねした試験片を完全にせん断してしまうのではなく、途中でせん断を止めた状態である。せん断したときに、クロップが接合材につながったままになる問題はあるが、上部材と下部材のせん断面同士が接合された状態であることがわかる。

Fig. 2 Macroscopic photograph and microstructure on cross section of sheared surface obtained by shearing pretest; test piece was heated at 1200 °C in air and sheared around 1080 °C

ここで、2枚重ねせん断の過程で、接合される双方の接

合界面近傍に強い変形が生じていることから強変形せん断接合という名称とした。

本報では、強変形せん断接合法の実用性を探ることを目的とした。簡易的な接合装置を準備し、2枚のバー材を重ねて表面から刃物を押し込み、せん断しつつ接合し、特に接合強度に及ぼす押し込み量、重ね合せ面の清浄性及び押し込み速度の影響を確認した。

3. 強変形せん断接合法の基本的特性

3.1 実験方法

Fig. 3 は、実験に用いた強変形せん断接合試験装置と接合試験片を示す。

接合材は、市販のSS400を用いた。強変形せん断接合試験装置(以下、接合装置と略す)は、上下刃物、上刃物の押し込み量を調整するストッパーと接合試験片(以下、試験片と略す)をクランプする治具からなる。接合は、試験片2枚を重ねた状態で接合装置に挿入し、クランプしたあとに油圧プレスまたは高速鍛造機を用いて、上刃物を試験片に押し込み行った。押し込み速度 0.1 m/s 未満は油圧プレス、0.1 m/s 以上は高速鍛造機での値である。

Fig. 3 から、この接合装置では接合部が2カ所できる。熱間エンドレス圧延用バー接合に適用するためには、上下の接合材を1カ所で接合して一体化することが望ましいが、本報では2枚重ねせん断でどこまでの接合強度が得られるかなど基本的特性を確認するために、この簡易的な接合装置を準備した。

Fig. 3 Test apparatus for super deformation joining

電気炉で1200 °Cまたは1100 °Cに加熱後、出炉して接合した。接合温度は1200 °C加熱のときが約1080 °C、1100 °C加熱のときが約980 °Cであった。接合強度に及ぼす重ね合せ面の清浄性の影響を調べるため、試験片の加熱は大気、Ar及び真空の各雰囲気で行い、いずれの雰囲気においても2枚の試験片を重ねて加熱し、接合に供した。

ここで、Ar雰囲気とは幅100 mm×高さ100 mm×奥行き1000 mmの加熱炉に、Arを5 L/minの流量で供給して加熱したものであり、加熱炉から抽出して接合までの約60 sは重ねた状態で大気に触れる。

また、真空雰囲気は酸化スケールの影響をできるだけ排除するため、試験片を重ね、 1.3×10^{-2} Paの真空雰囲気下で周囲を電子ビーム溶接し重ね合せ面を封止した。これに

より重ね合せ面が真空に保たれ、接合まで清浄性が維持できることになる。

接合強度へ及ぼす押込み量の影響を調べるため、以下に定義するストローク率を変えて接合を行った。

Fig. 4 は、ストローク率 α_s とラップ L_o の定義を示す。

ストローク率 α_s は、押込み量 D_p と試験片の板厚 t_b から算出される値である。ラップ L_o は、上下の刃物が水平方向でオーバーラップしている状態をプラスと定義した。Fig. 3 から、以下の試験では L_o を -0.25 mm に一定とした。

ここで定義した L_o は、通常のせん断では上下刃物のクリアランスとして表現されるものであるが、接合においては接合部に押圧力を付与するという観点から、刃物がオーバーラップする状態をプラスと定義した。

Fig. 4 Definition of stroke ratio α_s and knife lap L_o of SDJ

各接合条件で接合を行った後、前報³⁾と同様に引張試験、接合部の断面組織観察、引張試験後の破面観察などを行った。断面組織観察は研磨、腐食後に光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡(SEM: Scanning Electron Microscope)で、引張試験後の破面は SEM で観察した。また、接合部断面の元素分布を EDX(Energy Dispersive X-ray Spectrometer)を用いて測定した。

3.2 実験結果

1) 真実接合強度

Fig. 5 は、真実接合強度 σ_{jl} の求め方を示す。

Fig. 5 Evaluation method of joint strength of real joint area

接合材から任意の幅を切り出して引張試験に供した。Fig. 5 の写真は、押込み試験片と固定試験片それぞれの接合部の破断面を示す。周囲に比べて白く見えるところが接合し

ているところであり、この領域を真に接合した面積 A_j として、真実接合強度 σ_{jl} を求めた。

接合率 η は、 A_j と接合部面積 A_0 の比とした。

Fig. 6 はストローク率 α_s と真実接合強度 σ_{jl} の関係を、また、**Fig. 7** はストローク率 α_s と接合率 η の関係を示す。加熱雰囲気と押込み速度 V_p をパラメータとして整理した。

Fig. 5 に示す引張試験片には 2 カ所の接合部が存在するが、どちらか弱い側が先に破断するのでその弱い側の σ_{jl} と η を評価したことになる。

Fig. 6 Effect of stroke ratio α_s , heating atmosphere and pressing speed V_p on joint strength of real joint area of SDJ

Fig. 7 Effect of stroke ratio α_s , heating atmosphere and pressing speed V_p on joint rate of SDJ

ここで、Ar 雰囲気加熱の加熱温度は、いずれも 1100°C で接合温度は約 980°C である。また、大気雰囲気加熱及び真空雰囲気加熱の加熱温度は、いずれも 1200°C で接合温度は約 1080°C である。

大気及び Ar 雰囲気加熱で大きな差がないことから、Ar 雰囲気とした効果は少なかつたと考えられる。また、真空雰囲気下で重ね合せ面の周囲を封止した真空雰囲気加熱の接合強度は著しく大きな値となっている。Ar 雰囲気加熱は重ね合せ面の酸化を少しでも少なくしようとしたものであったが、その酸化防止効果が不十分であったと考えられる。さらに、大気雰囲気加熱ではデータにバラツキが多い。これらをまとめると、ラップ L_o が -0.25 mm の条件で以下が言える。

1) 大気及び Ar 雰囲気加熱の場合は、 α_s が 1.40 程度で σ_{jl} は母材の約半分、 η は 60 % 程度が上限の値である。これは、接合部面積 A_0 全体での平均的な接合強度に換算すると、母材の 30 % 程度となる。

これに対し、真空雰囲気加熱では α_s が 1.50 程度で σ_{jl} が母材強度に近く、かつ、 η がほぼ 100 % となっている。

- 2) 大気やAr雰囲気加熱の結果から、 α_s が大きくなると σ_{jl} や η が大きくなる傾向がある。
- 3) 大気及びAr雰囲気加熱と真空雰囲気加熱とで σ_{jl} に差がでていることから、重ね合せ面の酸化スケールの状態が接合強度に影響を与えていると推定できる。

押込み速度 V_p に関しては、0.005~4.5 m/sの範囲でその明確な影響を確認できなかった。前報³⁾の摺動圧着接合法では、摺動速度を速くすることで、接合強度が向上する傾向があったが、2枚重ねせん断で接合する場合は、0.005 m/sの低速においても高速と同等の接合強度を得られる可能性があることがわかった。摺動圧着接合と異なり強変形せん断プロセスでは、刃物の押込み過程で重ね合せ面の密着が進み、雰囲気から酸素の進入が抑制される。そして、接合強度は接合前に存在していた重ね合せ面の酸化スケールの分断による清浄な接合界面の創生に寄与する押込み量に依存し、押込み速度の影響が少ないことを示していると考えられる。

また、押込み量によって決まるストローク率 α_s が1.50ということは、Fig. 5に示す接合厚さ t_j が接合材の厚さの半分になっていることを意味する。実際の熱間エンドレス圧延では、接合後に複数回圧延されるがその圧延初期に接合部厚さは母材と同様の厚さとなる。この圧延中に破断が生じない接合強度であれば、接合時の接合厚さが母材よりも薄くとも問題とはならないと考えられる。

2) 断面組織、破面

Fig. 8は、接合部の断面マクロ組織を示す。

Fig. 8 b)の真空雰囲気加熱では、 σ_{jl} が高い値となっており、接合線を認識することが難しく、外観上良好な接合状態と考えられる。

a) Air α_s : 1.37 V_p : 3.3 m/s		σ_{jl} : 278 MPa η : 53.4 % 10 mm
b) Vacuum α_s : 1.50 V_p : 3.3 m/s		σ_{jl} : 416 MPa η : 96.0 % 10 mm
c) Air α_s : 1.54 V_p : 0.005 m/s		σ_{jl} : 79 MPa η : 13.4 % 10 mm
d) Air α_s : 1.50 V_p : 4.5 m/s		σ_{jl} : 179 MPa η : 55.4 % 10 mm

Fig. 8 Macroscopic photograph of cross section on atmospheric conditions, stroke ratio α_s and pressing speed V_p of SDJ

Fig. 8 c)の大気雰囲気加熱では、接合強度が低くなっているが、特に右側に比べて左側の接合部の厚さ方向の接合面積が小さくなっており、 σ_{jl} と η はこの左側の値に相当し小さな値となっている。また、Fig. 8 d)も大気雰囲気加熱であって、Fig. 8 c)と同様に右側に比べて左側の接合部の厚さ方向の接合面積が小さくなっている。これは、ラップが右側

の接合部に偏って、左側のラップのマイナス傾向が大きくなったためと考えられる。このことが、Fig. 6及び7においてバラツキを生じた理由の1つと考えられる。

接合強度を高めるためには、重ね合せ面の酸化スケールを減らすこととラップ L_o やストローク率 α_s などの接合条件最適化の両面の改善が必要になると考えられる。

ここで、Fig. 8 b)の真空雰囲気加熱では、クロップと接合材がA部でつながっており、クロップを取り除くことが難しくなる。実際のエンドレス圧延において、真空雰囲気加熱と同様に重ね合せ面の酸化を完全になくすことは困難であり、このことが懸念材料となることはないと考えられるが、エンドレス圧延用接合装置に適用する場合、クロップの取り除き性を考慮する必要がある。

Fig. 9は、大気と真空の各雰囲気加熱された接合部断面のSEM組織を示す。下段のSEM組織には酸素濃度変化も示す。観察位置は、接合部厚さ方向の中央部である。

Fig. 9 Effect of heating atmosphere on SEM microstructures and elemental distribution of oxygen at joint interface; test pieces were heated at 1200 °C and joined by V_p 3.3 m/s

Fig. 9 b)の真空雰囲気加熱で接合した場合は、接合部近傍の酸素濃度変化がほとんど無く、また、接合部はフェライトとパーライト組織からなり、結晶粒も接合線を横切り存在して母材と一体化していた。 σ_{jl} や η も母材と同様の値に至っている。

これに対してFig. 9 a)の大気雰囲気加熱で接合した場合は、接合部はフェライト組織からなり、接合部近傍に内部酸化に伴う粒状の酸化物があ、また、酸化スケールが接合線上に認められ、酸素濃度も接合部で高い値となっている。 σ_{jl} や η は低い値を示した。接合部がフェライト組織になった理由は、大気雰囲気加熱から接合までの間に重ね合せ面の酸化が進行するのと同時に、脱炭が生じたためと考えられる。

Fig. 10は、Fig. 9と同じ接合材の引張試験後の破面を示

す。観察位置は、厚さ方向中央部である。

Fig. 10 SEM photographs of fracture surfaces of joints; test pieces were heated at 1200 °C and joined by V_p 3.3 m/s

Fig. 10 b)の真空雰囲気加熱で接合した場合は、介在物の少ない延性破面からなり、ディンプルの形態も明瞭であった。これに対して Fig. 10 a)の大気雰囲気加熱で接合した場合は、介在物が多くディンプルも延性の小さい脆弱な様相を呈していた。この介在物の存在によって真実接合強度 σ_{jl} が低下していると考えられる。

Fig. 11 は、大気雰囲気加熱、押込み速度 V_p が 3.3 m/s で接合したときの接合部の硬さ分布を示す。

Air, heating temp.: 1200 °C, V_p : 3.3 m/s, α_s : 1.41, σ_{jl} : 249 MPa, η : 65.4 %

Fig. 11 Hardness profile across joint interface

SEM組織は Fig. 9 a)に相当するもので、接合線近傍の硬さは、母材とほぼ同じ値であった。大気雰囲気加熱であっても、結晶粒は接合線を横断し、粒径及び硬さは母材並みであることがわかった。

接合部の酸素濃度が高いことが接合強度低下の要因であり、この酸素濃度を下げること、すなわち酸化スケールを減らすことが強い接合強度を得るために必要となってくる。

4. 結 言

新しい接合方法である強変形せん断接合 SDJ の基礎的な

検討を行い、ラップ L_o が -0.25 mm の接合条件で以下の基本的な特性を得た。

1) 真空雰囲気加熱、すなわち重ね合せ面に存在する酸化スケールが極わずかと想定される場合は、ストローク率 α_s が 1.50 程度のとき真実接合強度 σ_{jl} が母材並みで接合率 η がほぼ 100 % の接合部を得ることができる。

大気や Ar 雰囲気加熱、すなわち重ね合せ面に存在する酸化スケールが多いと想定される場合は、 α_s が 1.40 程度の条件で、 σ_{jl} は概略母材の半分が上限の値で、 η は 60 % 程度であり、接合部面積全体での平均的な接合強度は母材の 30 % 程度が上限である。

2) ストローク率 α_s を大きくすると σ_{jl} が増す傾向がある。

3) 押込み速度 V_p が 0.005~4.5 m/s の範囲で、接合強度に明確な差を確認できなかったことから、摺動圧着接合法のような接合速度の影響はないと考えられる。

4) 接合強度に影響を与える因子としては、重ね合せ面の酸化スケールとラップ L_o やストローク率 α_s などの接合条件が考えられる。

さらに、SDJ をエンドレス圧延用バー接合装置に適用する場合、クロップの取り除き性を考慮する必要がある。

SDJ は、摺動圧着接合における接合面積確保の課題克服の過程で考案したものである。重ね合せ面が清浄と想定される場合は、接合部は母材と同様の組織となり母材並みの接合強度が得られた。一方、大気雰囲気加熱で重ね合せ面の酸化スケールが多いと想定される場合は真実接合強度が低く、接合率も低下することが判明した。

熱間エンドレス圧延の環境では、高温であるバー表面の酸化スケールを真空雰囲気加熱同様の条件にすることは極めて困難である。実生産におけるバー表面の酸化条件のもとで、強変形せん断接合の過程に接合部に介在する酸化スケールをいかにして少なくするかが課題であることを確認できた。

謝 辞

本研究において、西野 忠様、青天目 隆治様、長久保 源様の協力を得た。また、論文の作成には東北大学大学院工学研究科の藤田 文夫教授の助言を得た。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Takano, T., Matsuda, K., Moriya, S., Shibatomi, N., Mito, Y. & Hayashi, K.: Iron and Steel Engineer, **74-2**(1997), 41-47.
- 2) 松尾慎二・前田勝宏・大下 滋・久保山栄一・西林 茂・三田井裕二・新沢恭一・常田 弘・赤崎 宏: 材料とプロセス, **13**(2000), 1056.
- 3) 堀井健治・舟本孝雄・芳村泰嗣: 塑性と加工, **50-577** (2009), 139-143.
- 4) 大森舜二・林 寛治・日朝幸雄・吉谷弘毅・橋本正一: 鉄と鋼, **67-15**(1981), 270-275.
- 5) 福井嘉吉・中西恒夫・大竹幸雄・中島正明: 日立評論, **61-9**(1979), 7-12.