溶接および 9~13に示す EG 溶接などの大入熱溶接の適用によっても著るしく優れた靱性を示しており, 溶接入熱依存性の小さいことが実証された。それらは溶接の高能率化指向を現実化する重要な意義を有するものといえる。

5. 結 言

低温用アルミキルド鋼大入熱溶接部の靱性改善を目的として, 鋼中 N と Ti, Al の相乗作用について基礎的検討を行った。得られた主要な結果は次のとおりである。

- (1) 鋼中 N 量の低減ならびに Sol. Al 量の増大によって大入熱溶接部の靱性は著るしく向上する。
- (2) 過剰の Sol. Al の添加によってもたらされる靱性の改善は, 溶接時の冷却過程での Al と N との結合による free-N の低減効果に起因する。

(3) Ti は TiN として析出し溶接熱サイクル過程で粒成長抑制効果を有する反面, TiN の解離によって生じた固溶 Ti による靱性劣化を生ぜしめる。

(4) 高 Al-低 N を前提とした場合, 微量の Ti 添加は靱性改善に補完的役割をはたす。

(5) LPG 船, LPG 貯槽の建造を想定した各種溶接試験において, 高 Al-低 N-(微量 Ti) 系鋼の大入熱溶接への適合性が実証された。

参 考 文 献

- 1) 金沢他; 鉄と鋼 61 (1975) 2589
- 2) Kanazawa; Trans. ISIJ, 16 (1976), 486
- 3) 笠松他; 鉄と鋼 65 (1979) 102
- 4) W.C. Leslie; Trans. ASM, 46 (1954), 1470
- 5) 青木他; 金属学会誌 26 (1962) 437
- 6) 青木他; 金属学会誌 26 (1962) 679

摩擦圧接方式に関する研究 (第1報)*

—摩擦圧接継手熱影響部形状及び摩擦寄り挙動に及ぼす回転減速状態の影響—

平 博仁**, 山田桑太郎**, 上村隆夫***, 塩見敦史***, 天野一雄**

Study on the Type of Friction Welding (Report 1)

—Effect of the Deceleration Condition on the Shape of HAZ and Burn-off Behaviour—

by Hirohito Hira**, Sōtaro Yamada**, Takao Uemura***,
Atsushi Shiomi*** and Kazuo Amano**

There are two types of friction welding machine, one is brake type and another is inertia type. Main difference between them may be the deceleration condition of rotation. Rotation is stopped abruptly in the brake type welding process, however, it is stopped gradually in the inertia type welding process.

In this study, effect of the decelerating condition of rotation on the burn-off behaviour and macrostructure of joint was studied by controlling the brake ability of rebuilt brake type welding equipment in order to clarify the characteristics of each type machine. Used material was heat resisting steel FV 607. In addition, combined effect both of the axial pressure change and of the time-lag between pressure change and start of deceleration on them were also examined.

Obtained results are as follows;

- 1) Burn-off rate increases with the deceleration of rotation. And additional burn-off during deceleration is in proportion to deceleration time.
- 2) When axial pressure is not changed, shape of heat affected zone becomes narrower and concave shape

*原稿受付 昭和56年 8 月 31 日

**正 員 川崎重工業(株) Member, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

*** 川崎重工業(株) Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

with increase both of axial pressure and of deceleration time.

- 3) When axial pressure is changed and deceleration time is sufficiently long, effect of prior axial pressure, friction time and time-lag on the shape of HAZ becomes insignificant.
- 4) Added burn-off at final stage by deceleration of rotation shows different effect on the shape of HAZ from that by upset pressure.

1. 緒 言

摩擦圧接は、その継手の信頼性が高いことから重要な部品の製作にも広範に用いられている。接合方式は大きく分けてブレーキ式とイナーシャ式がある。両方式の標準摩擦圧接サイクルを Fig. 1 に示す。ブレーキ式は、一

Fig. 1 Comparison between brake type and inertia type friction welding.

定摩擦圧力および一定回転数で所定時間摩擦後、ブレーキで回転を急停止させるとともに大きなアプセット圧力を付加して接合するものであり、イナーシャ式は回転側のフライホイールに所定の回転エネルギーを与えた後、部材同士を押し付けるとともにクラッチを解放して、摩擦仕事により回転エネルギーを放出せしめて自然に回転を停止させることにより接合を完了させるものである。

国内では前者が一般に普及しているが、アメリカでは後者がほとんどであり、そこで発展したジェットエンジン産業ではほぼ後者のみが実績を持っている¹⁻³⁾。そこでこの分野に対して国内で摩擦圧接を適用する場合、両方式の特性の差異を明らかにしておくことは重要である。Fig. 1 のブレーキ式の摩擦圧接サイクルにおいて摩擦圧力 (P_1) とアプセット圧力 (P_2) とを一致させた場合は、両方式の違いはほぼ回転減速状態のみである。C. R. G. Ellis⁴⁾, Duffin et al⁵⁾, 福島等⁶⁾ は、軟鋼や炭素鋼を用いて加圧力を一定に保持し回転減速状態を変化させた場合について実験を行い、摩擦圧接現象の変化、および継手性能への影響について調べている。しかし継手部の組織状態の変化にはあまり考慮がはられていない。またアプセット圧力付加と回転減速時間が長い場合の相乗効果も調べられていない。

本報告は、ブレーキ式摩擦圧接機のブレーキ能力をコントロールして、イナーシャ式的なゆっくりした回転減速から、一般のブレーキ式の装置よりも回転を急停止する状態まで変化させ、その寄り代の変化および継手熱影響部形状におよぼす影響を調べたものである。そのさいまず摩擦圧力とアプセット圧力を同一とする条件で、回転減速状態のみを変化させた場合について調べ、次に2つの圧力が異なる場合について、その圧力の組合せと減速状態との複合的な影響を調べた。また、ブレーキ式ではアプセット圧力付加のさい、イナーシャ式では回転減速のさいと両方式とも圧接最終時に急激に寄り代が増加するが、その各々の方式による寄り代増分と継手影響部形状との関係を比較した。

2. 実験方法

供試材は、摩擦圧接適用を検討しているジェットエンジン部品の材料である FV 607 耐熱鋼である。Table 1 にその化学組成を示す。組織は焼戻しマルテンサイトの状態である。直径 13 mm の同径丸棒の継手について実験した。

Table 1 Chemical composition of heat resisting steel FV607 (weight %).

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V
0.15	0.30	0.80	11.0	0.60	0.80	0.25

実験に使用したブレーキ式の摩擦圧接実験機は油圧ブレーキが用いられており、その油圧力に変化させたり油圧回路を変更することにより制動力を変化させることができる。制動力がゼロの場合、主軸系はモーター停止後蓄積された回転エネルギーによって、イナーシャ式の装置のようにゆっくりと減速する。制動力が最大の場合、主軸系は制動開始後約 0.1~0.15 秒で停止する。今後このブレーキの制動力をブレーキ制動油圧 (P_b)、ブレーキ制動開始から回転停止までの時間を回転減速時間 (t_d) と呼ぶことにする。なおこの装置で $P_b = 0 \text{ kg f/cm}^2$ の場合、回転系の慣性モーメントは約 $3.3 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$ である。

摩擦圧接の加圧方式は、装置がブレーキ式の改造機で

あるので, ほぼ Fig. 1 の Brake type のように行った. ただし, 最初から直接摩擦圧力 (P_1) を付加するのではなく, 0.5 秒程度予備的に小さな圧力を付加後 P_1 まで上昇させた. そして P_1 を付加している摩擦時間 (t) の間は, 一定の回転数 (N) で摩擦発熱させた. その後圧力をアプセット圧力 (P_2) に上昇させるとともに回転を減速させた. なおこの実験では N を 2400 rpm と一定にした. また P_1 から P_2 へは 0.1 秒以内に变化する.

Fig. 2 は P_1 と P_2 とを一致させた場合の, 主軸系の回転減速状態を示す. $P_1=P_2$ の場合はそれを加圧力 (P) と呼ぶことにする. P_b が大きなほど, また P が大きなほど減速時間が短い. $P_b=0$ kgf/cm² のものは, 一定圧力で適当な時間摩擦後イナーシャ式的に摩擦圧接を行うことに対応している.

Fig. 2 Effect of the axial pressure and brake pressure on the deceleration characteristics of machine used.

また P_1 と P_2 が異なる場合は, ブレーキ制動開始時期と P_2 の付加時期とのずれの影響も調べた. このずれをタイムラグ (Δt) と呼ぶ. なおこの場合, 摩擦時間 (t) はブレーキ制動開始までの時間と定義し, ブレーキ制動開始前に P_2 を付加する場合のずれを負のタイムラグ, 開始後遅れて P_2 を付加する場合の正のタイムラグとした.

以上のように, P_1 , P_2 , および P_b , t , Δt を変化させた場合の寄り挙動, および継手熱影響部形状への影響を調べた. なお, ここで用いている P_b とその減速状態への影響は装置の個性に依存しているものであり, 本来はこのパラメータで整理することはさけるべきである. そ

こで制動の結果の現象として現われる減速時間 (t_d) を実験結果にはできるだけ記入することにした.

3. 実験結果および考察

3.1 $P_1=P_2$ の場合の摩擦寄り挙動および継手熱影響部形状におよぼす回転減速状態の影響

Fig. 3 は, 加圧力を 15 kgf/mm² として P_b を変化した場合の摩擦寄り挙動を調べたものである. 部材接触後短時間でほぼ一定の寄り速度となる. 減速開始後は, 回転数の低下に伴ない寄り速度が少しずつ増加する. 減速時間の短い $P_b=60$ kgf/cm² の場合は, 減速中のより速度は一定回転中とほぼ同様であり, 減速中の寄り代増量も少ない. それに対して $P_b=0$ kgf/cm² とイナーシャ式的に回転を減速した場合は, 停止時まで摩擦寄り速度はかなり増加し, しかも減速時間も長いのでその間の寄り代が急増している. $P_b=25$, 12.5 kgf/cm² の結果は $P_b=0$ kgf/cm² と $P_b=60$ kgf/cm² との結果の中間に位置しており, P_b の減少に伴ない, 最終的な寄り速度および減速中の寄り代が増加する.

Fig. 3 [Relation between deceleration of rotation and burn-off behaviour. ($P=15$ kgf/mm², $N=2400$ rpm, $t=1$ sec)]

この減速開始後の寄り挙動が, それまでの摩擦時間に依存するか否かを調べた. Fig. 4(A), (B) は加圧力 5 kgf/mm², および 15 kgf/mm² について $P_b=0$ kgf/cm² とした場合の寄り代の変化を, 各摩擦時間について調べたものである. 減速前はほぼ一定の速度で寄り代が増加している. 丸の矢印の位置で減速を開始したが, 図より減速中の寄り代変化は, それまでの摩擦時間によらずほぼ一

Fig. 4 (A) $P=5 \text{ kgf/mm}^2$ Fig. 4 (B) $P=15 \text{ kgf/mm}^2$.**Fig. 4** Effect of the friction time and inertia type deceleration on burn-off behaviour.

定である。特に $P=15 \text{ kgf/mm}^2$ で $t=0.12 \text{ sec}$ の結果は、摩擦寄り速度が一定になる前に減速を開始したものであるが、他とはほぼ同様の寄り代変化を示している。

Fig. 5 は、 $P=15 \text{ kgf/mm}^2$ における摩擦時間と全寄り代との関係を、3 種類の P_b について調べたものである。なお各 P_b について、減速時間は摩擦時間にはほとんど依存していなかった。また、 $P_b = 60 \text{ kgf/cm}^2$ は Fig. 3 の結果に示すように減速中の寄り代がほとんどな

Fig. 5 Effect of the friction time and brake condition on the total upset.

い場合に対応する。図より 3 つの制動油圧の結果はほぼ平行線をなしており、減速中の寄り代は摩擦時間によらずほぼ一定であることがわかる。他の加圧力についても線の傾きや平行線の幅は異なるが Fig. 5 と同様な結果が得られた。

次に減速中の寄り代について調べた。Fig. 6 は図中の 4 種類の摩擦圧接条件における、減速時間と全寄り代との関係を示す。各加圧力について減速時間と全寄り代との間にはほぼ直線関係があり、その傾きは加圧力が大きなほど大きい。

Fig. 6 Effect of the deceleration time on the total upset.

Fig. 5 および Fig. 6 より、全寄り代は摩擦時間と減速時間とに各々独立にほぼ直線関係を示すことがわかった。ただしその直線の傾きは、加圧力に依存している。

Fig. 7 Relation between axial pressure and $\partial U_T / \partial t$ or $\partial U_T / \partial t_d$, $\partial U_T / \partial t$; Increment ratio of U_T by t at each pressure. $\partial U_T / \partial t_d$; Increment ratio of U_T by t_d at each pressure.

そこで各加圧力について, 各々の直線関係の傾き, すなわち $\partial U_T / \partial t$, $\partial U_t / \partial t_d$ を調べた. Fig. 7 はその結果である. 図より各加圧力について, $\partial U_t / \partial t_d$ は $\partial U_T / \partial t$ に比べて2倍以上大きい. P と $\partial U_T / \partial t$ とはほぼ直線関係があるのに対し, $\partial U_T / \partial t_d$ はそれよりも急増加している. すなわち寄り速度から見れば, 減速中は一定回転中に比べて加圧力が2倍以上付加された状態となる.

次に継手面のマクロ組織観察を行い, 溶接熱影響部の形状を調べた. Fig. 8(A), (B)は各々 $P=5, 15 \text{ kgf/mm}^2$ で $P_b=0, 60 \text{ kgf/cm}^2$ の場合の, 各摩擦時間における断面マクロ組織を調べた結果である. 摩擦時間が長くなるにつれてバリは大きくなる. $P=5 \text{ kgf/mm}^2$ の(A)で $P_b=60 \text{ kgf/cm}^2$ と急停止させた場合は, 摩擦時間の経過とともに熱影響により白化した領域が広がってゆく. またこれらの継手には, 接合面の外周部に非接合欠陥がみられる. この欠陥は摩擦時間を長くしても消滅しない. それ

に対し $P_b=0 \text{ kgf/cm}^2$ の継手は, $P_b=60 \text{ kgf/cm}^2$ の継手よりもバリが大きく外周部の欠陥もない. また熱影響部の幅も狭く, 少し凹レンズ型の形状となる.

(B)は $P=15 \text{ kgf/mm}^2$ の結果である. $P=5 \text{ kgf/mm}^2$ の結果に比べてかなり熱影響部の幅が狭い. $P_b=60 \text{ kgf/cm}^2$ の継手は少し凹レンズ型の傾向を持つ熱影響部形状をしている. $P_b=0 \text{ kgf/cm}^2$ となると, 回転中心部の熱影響部の幅が外周部の幅に比べて極端に狭くなり, 凹レンズ型の傾向が著しくなる. また, 摩擦時間の増加とともにバリはかなり大きくなるけれども熱影響部の幅や形状, および継手接合面の直径はほとんど変化しない. この接合部の直径は, 部材の直径よりも大きくなっており, Fig. 8(A)の $P=5 \text{ kgf/mm}^2$, $P_b=60 \text{ kgf/cm}^2$ の継手にみられるような外周部の欠陥は現われていない.

P および P_b を変化させて継手の熱影響部形状を調べたところ, P が大きく P_b が小さなほど, その幅は狭くなりしかも凹レンズ型化することがわかった. これについては3.3節で示す.

熱影響部は接合面近傍の完全に白くなった部分と, その両側の薄く白化した部分の2領域に区分できる. このうち完全に白くなった領域は, オーステナイト化温度以上に達した後急冷されたためマルテンサイトとなっており, ビッカース硬さが500以上に達している. 薄く白化した部分は, オーステナイト化温度以下までしか加熱されず母材の焼戻しが進行していることが観察された. その結果, 母材の硬さ約300よりも20程度軟化している部分もあった. 特に完全に白化した領域は硬さ分布測定によっても顕著に区分できるので, 3.3節においてはこの領域の幅を熱影響部の幅として測定した.

3.2 P_1 と P_2 が異なる場合の摩擦寄り挙動および継手熱影響部形状におよぼす回転減速状態の影響

一般のブレーキ式と同様に, 一定時間摩擦後制動開始と同時に P_1 より大きな P_2 を付加した. そして回転を急停止する $P_b=60 \text{ kgf/cm}^2$ の場合と, 回転をイナーシャ式的に減速する $P_b=0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合の摩擦寄り挙動および断面マクロ組織を比較した.

Fig. 9 は左端の条件で摩擦後, 上欄に示すアプセット圧力 (P_b) を付加した場合の断面マクロ組織観察結果である. 左端の斜めの欄は $P_1=P_2$ の結果である. Fig. 9(A)の一番上の欄は $P_1=5 \text{ kgf/mm}^2$ で摩擦後, 右の行くほど大きな P_2 が付加されるものだが, P_2 増加に伴ないバリの増加とともに熱影響部も狭くなる. また接合面外周部の欠陥も消滅する. 縦欄は P_1 が変化するが, P_2 は同じものである. 右端の縦欄より, P_2 が同じでも P_1 が大きくなるほど熱影響部は狭くなる. すなわち $P_b=60 \text{ kgf}$

Fig. 8 (A) $P=5 \text{ kgf/mm}^2$

Fig. 8 (B) $P=15 \text{ kgf/mm}^2$.

Fig. 8 Effect of the friction time and deceleration condition on the macrostructure of friction welds.

Fig. 9 (A) Rapid deceleration. ($P_b = 60$ kgf/cm²)

Fig. 9 (B) Slow deceleration. ($P_b = 0$ kgf/cm²).

Fig. 9 Effect of the combination of P_1 and P_2 on the macrostructure of friction welds.

/cm² と回転が急停止する場合は、熱影響部形状は P_1 , P_2 両者に依存する。

Fig. 9(B)のイナーシャ式的な回転減速の結果でも、 P_1 を一定とし P_2 を増加させると、熱影響部は Fig. 9(A)と同様に狭くなる。しかし P_2 を一定とし P_1 を変化した縦欄の継手は、 $P_2 = 15$ kgf/mm² の場合は P_1 にかかわらず熱影響部形状はほぼ同様であり、 $P_2 = 10$ kgf/mm² の場合も $P_1 = 5$ kgf/mm² の方が $P_1 = 10$ kgf/mm² に比べてその幅が少し広いだけで、ほぼ同様の形状となる。このようにイナーシャ式的に回転を減速した場合は、 P_2 が大きければ P_1 にかかわらず熱影響部の形状がほぼ同様となることが他の実験結果からも確かめられた。

このような P_1 と P_2 が異なる場合の継手形成について、寄り代変化から検討した。Fig. 10 は左端の圧接条

Fig. 10 Burn-off behaviour at each friction welding condition.

件で摩擦圧接した場合の寄り代の変化を示したものである。(A)に対して大きな P_2 を付加した(B)は、 P_2 付加と同時に寄り代が急激に増加後一定となる。その変化は(C)に示すような回転減速に伴う連続的な増加挙動と異なる。(D)は(B)のように圧力を増加させるとともにイナーシャ式的に回転を減速させたものである。 P_2 付加時に(B)と同様に急激に寄り代が増加した後、(C)の減速中の寄り代変化と同様な挙動を示す。すなわち(D)の継手は、Fig. 9(A)の $P_1 = P_2 = 5$ kgf/mm² の継手の状態で回転が減速開始後、まず P_2 付加によって軸方向に圧縮変形し $P_1 = 5$ kgf/mm², $P_2 = 15$ kgf/mm² の継手の状態となる。その後、回転減速に伴ない Fig. 9(B)の $P_1 = 5$ kgf/mm², $P_2 = 15$ kgf/mm² の継手の状態になってゆくものとおもわれる。

最近ブレーキ式の摩擦圧接において、回転の制動開始時期とアプセット圧力付加時期との時間のずれ (Δt) の継手への影響が問題となっている⁷⁾。そこで ($P_1 = 5$ kgf/mm², $P_2 = 15$ kgf/mm²) の組合せについて、熱影響部形状へのタイムラグ Δt の影響を調べた。

Fig. 11 は $\Delta t = -0.2, 0, 0.2$ sec の継手のマクロ組織観察結果である。 $P_b = 0$ kgf/cm² の場合は、 Δt にかかわらずほぼ同一の継手形状、および熱影響部形状となっている。しかし回転を急停止する $P_b = 60$ kgf/cm² の場合の結果は、 Δt の影響がみられる。すなわち $\Delta t = 0.2$ sec の回転制動後 P_2 を付加したものは、 $\Delta t = 0$ sec の結果に

Fig. 11 Effect of the time-lag between pressure change and start of deceleration on the macrostructure of friction welds.

較べてバリは小さく熱影響部の幅が広い。それに対して $\Delta t = -0.2$ sec の回転制動開始前に P_2 を付加したものは、他よりもバリが大きくなり熱影響部も凹レンズ型で狭いものになる。そして Δt を負に大きくしてゆく実験を行ったところ、 $P_1 = P_2 = 15$ kgf/mm²、 $P_b = 60$ kgf/cm² の継手の熱影響部形状に近づくこと、またそのさいの最終的な寄り速度も $P_1 = 15$ kgf/mm² の場合の値に近づくことを確認した。

一般にブレーキ式においては、Fig. 1 に示したように圧接過程で加圧力および回転状態を強制的に変化させる。その結果、ここに示したブレーキ制動油圧 (P_b)、タイムラグ (Δt)、またここでは述べなかったが P_1 から P_2 への圧力の増加状態などのパラメータが継手に影響をおよぼすものと考えられる。これは装置個々において特性が異なっているので、これまでブレーキ式における制御パラメータとされていた、 P_1 、 P_2 、 N 、 t を一致させて摩擦圧接を行っても、装置により接合結果が異なる原因となるものである。

3.1 節および 3.2 節の結果は、イナーシャ式的な回転減速方式で P_2 が大きければ、 P_1 、 t および Δt によらず、またバリの大きさによらず、 P_2 の大きさのみで熱影響部の形状が決定されることを意味していると考えられる。

3.3 アプセット圧力付加による寄り代増加とイナーシャ式的な回転減速中に現われる寄り代増加の差異について

ブレーキ式の摩擦圧接では回転を急停止させると同時に付加するアプセット圧力によって寄り代が増加するが、イナーシャ式では加圧力が一定でも回転が減速中に寄り代が増加する。アプセット圧力によって寄り代が増

加するのは、低い摩擦圧力では押し出されない高温域の部分が、軸方向に高い圧縮力を受けて押し出されるためである。また回転減速中の寄り代の増加は、摩擦面では発熱しつつ、圧縮とねじりの組合せ応力が摩擦面近傍で発生するため、局部的に外周部へバリが押し出されやすくなったためと考えられる⁶⁾。

この2つの摩擦圧接方式の最終工程は、ともに寄り代を急増させる効果を持っている。そして福島等は両方式の寄り代増分をほぼ同一とした継手を作り、両者がほぼ同一の効果を持つことを報告している⁶⁾。しかし、広範囲には検討していないし、寄り代の形成機構も異なるので条件によっては差が現われるものとおもわれる。そこで Fig. 12 に示すように、一定摩擦時間の間同一条件で

Fig. 12 Characteristics of the burn-off behaviour of brake type and inertia type friction welding.

摩擦後、一方は回転急停止とともにアプセット圧力を付加して得られる寄り代増分 (U_u) を調べ、他方は一定圧力のままで P_b を変化させることにより得られる寄り代増分 (U_d) を調べた。そして得られた各継手について、Fig. 13 の継手断面マクロ組織概略図に示す熱影響部の

Fig. 13 Schematic diagram of the heat affected zone of friction weld and dimensions to be measured.

回転中心部の幅 (W_d)、および部材表面から 1 mm 内側の幅 (W_s) を測定した。また接合面の直径 (d) も調べ、それと部材の径 (d_0) との比をとった。これらの値と先ほどの寄り代増分との関係を調べた結果を Fig. 14 および Fig. 15 に示す。 $P_1 = 5, 10, 15$ kgf/mm² とした場合

Fig. 14 Relation between the width of HAZ and the added burn-off at final stage of each friction welding method.

の結果である。 U_u の増加はアプセット圧力の増加に対応し、 U_d の増加は減速時間の増加に対応している。

Fig. 14 は寄り代増分と熱影響部の幅との関係を示すものである。 $P_1=5 \text{ kgf/mm}^2$ で寄り代増分が小さい場合は、 W_s , W_d ともに大きくほぼ同様の値であり、熱影響部が幅の広い平板型であることを示している。 U_d が増

Fig. 15 Relation between d/d_0 and the added burn-off at final stage of each friction welding method.

加しても W_s , W_d ともそれほど減少しないのに対し、 U_d が増加すると W_s と W_d は同程度の幅の状態で急激に減少する。

$P_1=10 \text{ kgf/mm}^2$ で寄り代増分が小さい場合、 W_d より W_s はかなり大きく、凹レンズ型の熱影響部形状であることを意味している。 U_d が増加すると W_s , W_d とも減少するが、 W_d の減少度が大きいため凹レンズ型形状の傾向が強くなっていることを示す。それに対し、 U_u が増加すると W_s , W_d とも減少するがその両者の減少度はほとんど変わらない。

$P_1=15 \text{ kgf/mm}^2$ の場合は、小さな寄り代増分においても、熱影響部は狭く凹レンズ型をしている。 U_d を増加させた場合 W_s はほとんど変化しないのに対し、 W_d のみが減少し極端な凹レンズ型の熱影響部となる。それに対し U_u を増加させると、 W_s , W_d ともに減少するが、外周部の方が P_2 付加前の幅が大きいため W_s の減少度の方が大きい。

このように U_u の増加は熱影響部全体の圧縮と対応している。それに対し U_d の増加は、低加圧力の場合は熱影響部全体の幅を少し狭くすることに対応しているが、高加圧力の場合は特に W_d が減少して熱影響部が凹レンズ型の傾向が強くなることと対応している。後者については、回転減速中の寄り速度の増加が凹レンズ型形状の傾向を強くするものと考えられる。

Fig. 15 は、寄り代増分と、接合面の直径と継手径との比 (d/d_0) との関係を示すものである。この場合 $d/d_0 < 1$ は、接合面外周部に非接合欠陥があるものである。図より $P_1=10 \text{ kgf/mm}^2$ の場合の d/d_0 と寄り代増分との関係は、 U_u , U_d の両者とも同等で、増分が増加するほど大きくなる。 $P_1=5 \text{ kgf/mm}^2$ の場合、 U_d が増加してもそれほど d/d_0 は増加しないのに対し、 U_u の増加は d/d_0 の急激な増加と対応している。逆に $P_1=15 \text{ kgf/mm}^2$ については、 U_u が増加してもほとんど d/d_0 は増加しないのに対し、 U_d の増加は d/d_0 の増加と対応している。

U_u は、摩擦圧力 P_1 で摩擦中に存在する高温域を、より高いアプセット圧力 P_2 で圧縮変形させた量に相当する。最初の高温変形可能領域が広いほど、圧縮のさいに領域全体が外周に押し出される状態となり、接合面積の増加、すなわち d/d_0 の増加が起こりやすいと考えられる。このことは、摩擦中に高温域が広い小さな P_1 の方が、 U_u の増加に伴ない d/d_0 の増加が著しいことと対応している。

減速時間が長く U_d が大きなほど d/d_0 が大きくなるのは、高温域が外周部から回転中心部へむかってくさび型となり、そのくさび型の面へ推力が加わることによ

て高温軟化部を外周方向へ押し出すような分力が生じるためと考えられる。

以上のように、アプセット圧力による寄り代増分と回転減速による寄り代増分とは、熱影響部形状や接合面と異なる関係を持つことが明らかになった。

4. 結 言

ブレーキ式とイナーシャ式の摩擦圧接方式の差異を調べるため、回転減速状態のおよぼす継手熱影響部形状および摩擦寄り挙動への影響を検討した。

得られた結果は以下のとおりである。

1) 回転減速中は、回転速度の低下とともに摩擦寄り速度が増加する。そのさいの寄り代増分は回転減速時間に比例して増加する。

2) 加圧力および回転減速時間の増加に伴ない、熱影響部は狭くなり凹レンズ型形状の傾向は強くなる。

3) 回転を急停止した場合の継手の熱影響部形状は、摩擦圧力、アプセット圧力、回転制動開始とアプセット圧力付加のタイムラグに依存する。しかし、充分回転減速時間が長くなれば、その形状はほぼアプセット圧力のみに依存する。

4) 回転減速中の寄り代増分の増加は、継手熱影響部

の回転中心部の幅が狭くなり凹レンズ型形状の傾向が強くなることと、特に高加圧力の場合の接合面積の増加とに対応している。

それに対し、アプセット圧力による寄り代増分の増加は、熱影響部全体が圧縮されて狭くなることと、特に低摩擦圧力の場合の接合面積の増加とに対応している。

参 考 文 献

- 1) J. A. Miller and J. J. O'Conner, Inertia and Electron Beam Welded Power Shaft, Weld. J., Vol. 59-7(1980), 17-22
- 2) C. G. Nessler, D. A. Rutz, R. D. Eng, and P. A. Vozzella, Friction Welding of Titanium Alloys, Weld. J. Vol. 50-9 (1971), 379s-385s
- 3) J. R. Doyle, P. A. Vozzella, F. J. Walance and H. B. Dunthorne, Comparison of Inertia Bonded and Electron Beam Welded Joints in a Nickel-Base Superalloy, Weld. J. Vol. 48-11 (1969), 514s-520s
- 4) Ellis, C. R. G., Continuous drive friction welding of mild steel, Weld. J. Vol. 51-4 (1972), 183s-197s
- 5) F. D. Duffin and A. S. Bahrani, Friction welding of mild steel: The effects of varying the value of deceleration, Met. Const. and B. Weld. J. Vol. 5-4 (1973), 125-132
- 6) 福島, 蓮井, 摩擦圧接の加熱過程について, 本誌, Vol. 41-9 (1972), 1074-1084
- 7) 沖田, 有年, 岸本, オーステナイト系ステンレス鋼の摩擦圧接に関する研究 (5), 溶接学会講演概要, 第27集 (1980), No. 446

同径丸棒継手の摩擦圧接における 摩擦面の熱収支について*

沖田 耕三**, 有年 雅敏**, 平 博仁***

Effect of Heat Balance at Interface on Friction Welding of Equi-Diameter Bar Joints*

by Kozo Okita**, Masatoshi Aritoshi** and Hirohito Hira***

The authors have been studying the friction welding phenomena of same diameter bars and of different diameter bars of SUS304 austenitic stainless steel by brake type friction welding equipment. In any case, friction torque, burn-off rate and temperature of friction surface are close to the constant value, while constant axial pressure and friction speed are maintained. This may mean that equisai steady state arises at the friction surface. And, these three constant values might signify the thermal balance.

In this study, following relationship of thermal balance were assumed.

*原稿受付 昭和56年 8 月31日

**正 員 兵庫県立工業試験場 Member, Industrial Research Institute of Hyogo Prefecture

***正 員 川崎重工業(株) Member, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.