鋼材の摩擦溶接における溶接条件の検討*

塩谷 敏祐** 山田 純一** 葛谷 豊**

Study on Welding Conditions for Steel by Friction Welding*

By Toshisuke Shioya**, Senichi Yamada** and Yutaka Kuzuya**

Abstract

Many reports have recently been made concerning to friction welding, however we seldom find reports about influences which each factor of that welding gives to material. That's why we have conducted how the basic factors of friction welding, which means heating pressure, forging pressure, revolution speed, material diameter, surface circumstance and so on, have an effect on weld joint. Our results are as follows:

(1) When heating pressure and forging pressure are high and their proportion is large, excellent weld joint can be made irrespective of small upset, however such an effect is rather doubtful when the proportion goes over a certain figure.

(2) Revolution speed does not affect so much upon joint, but the speed should be decided, considering production efficiency, as upset speed depends on its material. Influence on weld material diameter, depends on sliding speed as well as revolution speed, and when material diameter is big, revolution speed should be low.

(3) Surface circumstances of material to be welded effect upon early calorification conditions on welding process and the minimum upset becomes bigger, which is not broken on weld interface, on bad surface circumstances.

1. 緒 論

摩擦溶接法は被溶接物の一つを固定し、他の一つに軸方向圧力を加えながら高速回転させ、それにより発生される摩擦熱をもって被溶接物を加熱し、突合せ圧接をおこなう方法である。

摩擦により生じた熱を金属の溶接に利用しようとする考えは新しいものでなく、金属材料の切削加工においてしばしば碎片が工具に付着したり、旋盤の心押台のセンターが加工される品物と圧着したりする現象が見られ、原理的には相当以前から知られていたが、油圧機器の制約からその実用化が見送られてきた。この溶接法は第二次大戦中、ドイツで熱可塑性樹脂の溶接¹⁾に適用されたのが実用化のはじめで、その後1957~1958年頃、ソ連の V.I. Vill²⁾ の指導のもとに All Union Scientific Research Institute for Electric Welding Equipmentにおいて金属にこの溶接法を適用することが研究、開発され、チェコスロヴァキヤ、中共においても工具、電機部品、工作機械部品などに適用されている。アメリカでは1961年訪ソ科学視察団がこの溶接法に注目し、Ameri-

can Machine and Foundry Co., の M.B. Hollander³⁾ を中心とするグループが研究し、報告している。さらに California University の T.H. Hazlett^{4)~6)} がこの溶接法の研究をしており、いずれも静的な引張り強さでは100%の継手効率が得られると報告している。イギリスにおいては British Welding Research Association¹⁾ のもとで試作機が完成され、研究されている。わが国では名古屋工業技術試験所、安藤^{7)~10)} 機械試験所、中村¹¹⁾、金属材料技術試験所、蓮井¹²⁾らの各グループで研究がおこなわれており、2, 3のメーカーでは実用機が完成さ

Photo. 1 Friction welding machine for 10~30 mm diameter works

* 原稿受付 昭和40年1月16日 (溶接学会昭和39年度秋季全国大会にて発表)

** 正員 豊田自動機械製作所 Member, Toyoda Automatic Loom Works, Ltd.,

れ、1963年の中期から実用段階にはいっている。

著者らは、1963年2月から自社で製作した摩擦溶接機を用い、種々の材料の組合せで溶接条件を検討してきた。本報告では加熱圧、圧接圧、回転速度、溶接物の径、溶接物の表面状況などが溶接継手にどのように影響するかについてのべる。

2. 摩擦溶接法の概要および実験方法

摩擦溶接法は前述のように被溶接物の一つを回転側、他方を停止側に固定し、回転しながら軸方向圧力を加える。これを図解すると Fig. 1 のごとくなる。その他、軸方向圧力を加えながら二つの被溶接物を反対回転

Fig. 1 Illustration of friction welding

Fig. 2 Pressure change on friction welding process

させたり、また、二つの長い溶接物のあいだで短い溶接物を回転させ、軸方向圧力を加えたりする種々の方法が考えられているが、実用化されているのは最初にのべた方法が一般的である。摩擦溶接法は回転摩擦により発熱させ、溶接する方法であるため溶接面は円形断面に限定される。角材の溶接はその円接円内では摩擦面の酸化は防止されても他の部分が酸化されることと、停止位置が合致しないことなどで100%の継手効率は得られない。円形断面の溶接では溶接面の凹凸が除去されれば完全に空気と断れるため酸化が起らず Al, Ti などのように他の溶接法では不活性ガス中で溶接されるような材料でも

空気中で容易に溶接できるという非常に大きな利点がある。また、熱可塑性樹脂の溶接も可能で非常に発展性のある溶接法と考えられる。

溶接過程での圧力と時間の関係を Fig. 2 に示した。すなわち、材料を回転しながら接触させ、材料接触とともに圧力を上昇し、一定圧力（加熱圧： P_1 ）である時間（加熱時間： T_1 ）保持し、回転停止とともに回転中と同一、または、さらに大きな圧力（圧接圧： P_2 ）を加えて溶接は終了する。この場合、加熱時間中、材料が接触してから設定された加熱圧に達する時間をスロープ時間とする。このスロープ時間は特別な意味があるものではなく、材料接触時の摩擦トルクのピークを下げるためのもので、モーターの馬力、材料保持力の増大をさける溶接機設計上の問題であり、溶接継手の性質にはほとんど影響しない。

溶接条件の要因としては以上にのべた加熱時間、加熱圧、圧接時間、圧接圧のほか回転数、溶接物の径などが一次的に作用し、溶接面の形状、表面アラサ、汚染などが二次的に作用する。また、溶接物の化学成分、冷間加工の有無など材料の性質によって異なるのは当然であり、摩擦による溶接物の振動はさけなければならない。本実験では溶接物の径により三種類の溶接機を使用した。この溶接機は左側が回転部、右側が非回転クランプ部で、クランプスライド台を油圧機構により推進させ軸圧力をあたえる構造となっている。回転停止は電磁ブレーキでなされ、完全に停止するまでには約0.4秒を要する。

本実験では溶接した継手の機械的性質は引張試験で確認したが、引張試験片は丸棒を突合せ溶接したもの、のばりを除去し、平滑な丸棒として試験をおこなった。

3. 実験結果および考察

3.1 加熱圧および圧接圧について

S45C, 40.0 mm ϕ 材を回転数 1,800 rpm, スロープ時間 0.5 sec, 加熱圧 4.0 kg/mm², 圧接圧 8.0 kg/mm², 加熱時間 40.0 sec で溶接したとき、材料が接触してからの時間の経過による Upset 量の変化を Fig. 3 に示した。材料の接触とともに摩擦熱を発生し、軸圧力に耐えられないほど高温に加熱された部分はばりとしてはみだされる。Upset 量は加熱時間の経過とともに高次曲線的に増大していくが、ある時間以上になると曲線の傾き、いいかえれば単位時間あたりの Upset 量（Upset 速度）はほぼ一定となる。この場合、さらに時間が経過するとばりが大きくなり摩擦面積の増大およびばりの生成による塑性変形抵抗の増大のため曲線の傾きは小さくなるが、Upset 速度がほぼ一定となったとき圧接圧をかけて

Fig. 3 Amount of upset vs., time plot S45C, 40.0 mm dia., 1,800 rpm, P_1 : 4.0 kg/mm², P_2 : 8.0 kg/mm², slope time 2.0 sec, T_1 : 40 sec

Fig. 4 Effect of heating pressure on upset velocity S45C, 40.0 mm dia., 1,800 rpm

溶接を終了するのが一般的である。

20 mmφ 以下の細い材料ではほとんどの場合 Upsetting は短時間で終了するため圧接時間はあまり重要でなく、本実験では 20 mmφ 以下のものについては 4.0 sec 一定とした。20 mmφ をこえる太い径の材料を加熱圧と圧接圧の比の大きな条件で溶接するときは、Upsetting は短時間で終了せずある程度、圧接時間は必要とされる。

S45C, 40.0 mmφ 材を回転数 1,800 rpm. で加熱圧を色々かえて溶接したとき、前にのべた Upset 速度がほぼ一定になった時の Upset 速度と加熱圧の関係を Fig. 4 に示した。Upset 速度は加熱圧が大きくなるとともに高次曲線的に大きくなっている。

SUH3 と SUH31 の 18.0 mmφ 材を旋盤突切りし、

Fig. 5 Test result of tensile strength that change according to the progress of amount of upset SUH3×SUH31, 18.0 mm dia., 1,800 rpm, P_1 : 6.0 kg/mm², P_2 : 12.0 kg/mm², slope time 1.0 sec

回転数 1,800 rpm, スロープ時間 1.0 sec, 加熱圧 6.0 kg/mm², 圧接圧 16.0 kg/mm² と一定にして加熱時間をかえて、すなわち Upset 量を変化させて溶接し、溶接後 1020°C に 30 分保持後油焼入れ、800°C に 60 分保持後空冷の熱処理をおこない引張試験をおこなった結果を Fig. 5 に示した。この結果では Upset 量が 4.0 mm 以上あれば 100% の継手効率があることがわかり、Upset 量は非常に重要な意味があることが知られる。

SUH3 と SUH31 の 8.35 mmφ 材を切断砥石で切断し、回転数 2,750 rpm, スロープ時間 0.5 sec で加熱圧を 4.0, 6.0 および 8.0 kg/mm² とし、圧接圧は加熱圧よりおのおの 2.0 kg/mm² 大きくしたもののおよび加熱圧の 2 倍として溶接し、前述の熱処理をおこなった後引張試験をおこない SUH31 の母材破断となる場合と、溶接面破断となる場合の領域を加熱時間を加熱圧に対応させて Fig. 6 に、また、加熱圧と Upset 量に対応して Fig. 7 に示した。Fig. 6, Fig. 7 から知られるごとく加熱圧が大きくなるほど加熱時間は短かく、Upset 量も小さくて溶接することができる。加熱圧を一定にとれば、圧接圧は大きいほど加熱時間、Upset 量を減少させることができ、また、加熱圧を大きくした場合、圧接圧を大きくすることによる加熱時間および Upset 量の減少の効果は加熱圧が大きくなるとともに小さくなっている。

同様に、SUS27 と S35C の旋盤突切りした 16.0 mmφ 材を回転数 2,750 rpm, スロープ時間 0.5 sec で加熱圧を 4.0, 6.0 kg/mm² とし、圧接圧は 12.0, 15.0 および 18.0 kg/mm² とし、Upset 量を変えて溶接したのち、焼ナラシ (845°C, 60 分保持後空冷) をおこなって引張試験をおこない、SUS27 の母材破断となる場合

Fig. 6 Effects of heating pressure and forging pressure on heating time that is taken to cause base metal failure SUH 3×SUH 31, 8.35 mm dia., 2,750 rpm, slope time 0.5 sec

Fig. 7 Effects of heating pressure and forging pressure on amount of upset that is taken to cause base metal failure SUH 3×SUH 31, 8.35 mm dia., 2,750 rpm, slope time 0.5 sec

Fig. 8 Effects of forging pressure and heating pressure on amount of upset that is taken to cause base metal failure SUS 27×S 35 C, 16.0 mm dia., 1,800 rpm, slope time 1.0 sec

と溶接面破断となる場合の領域を圧接圧と Upset 量に対応させて Fig. 8 に示した。この結果は Fig. 7 と同様の傾向を示し、加熱圧が大きいほど、また、圧接圧が大きいほど Upset 量は小さくなり、加熱圧に対する圧接圧の比がある程度以上になれば、溶接可能領域には圧接圧は影響しないことが認められる。

3.2 回転速度について

S 45 C の 10.0 mmφ 材の旋盤空切りしたものをスロープ時間 0.5 sec, 加熱圧 4.0 kg/mm², 圧接圧 8.0 kg/mm² とし、回転数を 1,000, 1,500, 2,000, 2,500 および 3,000 rpm と変えて溶接したとき Upset 量が 1.0, 3.0, 5.0, 7.0 および 9.0 mm となるために必要な加熱時間を Fig. 9 に示した。Fig. 9 からは同一 Upset 量にするに要する最小加熱時間は点線で示したごとく Upset 量が大きくなるにともなって低速側に移行しているのが認められる。また、回転速度が小さくなるほど Upsetting にはいるまでの潜伏時間が長くなっており、Upsetting がはじまれば単位時間あたりの Upset 量は急激に大きくなる。いっぽう、回転速度が大きくなるほど Upsetting にはいるまでの潜伏時間が短かく、単位時間あたりの Upset 量は小さくなる。

SUH 3 と SUH 31 の 12.3 mmφ 材を切断砥石で切断し、スロープ時間 0.5 sec, 加熱圧 6.0 kg/mm², 圧接圧 12.0 kg/mm² とし、回転数を 1,500, 2,000, 2,500 および 3,000 rpm と変えて溶接したとき Upset 量が 4.0, 6.0 および 8.0 mm となるために必要な加熱時間を Fig. 10 に示した。ここでは前にのべた関係は明らかでなくむしろ逆の傾向が若干認められる。

同一鋼種の溶接の場合については同様の報告が V.I. Vill²⁾ によってなされているが、異種材料の溶接の場合には何らふれられていない。Fig. 9 と Fig. 10 を比較した場合かなり異なった傾向を示しているが、異種金属の溶接ではそれぞれの物理的、機械的性質などが異なり一般的に論ずることはできないのではなかろうか。

SUH 3 と SUH 31 の 12.3 mmφ 材の旋盤突切りしたものおよび切断砥石で切断したものをそれぞれ前にのべたのと同じ条件で Upset 量をかえて溶接し、溶接後 1,020°C 30 分保持後油焼入れ、800°C に 60 分保持後空冷の熱処理をおこない、引張り試験をした結果を Fig. 11 に示した。

回転速度の継手におよぼす影響としては、低回転速度では母材破断となる場合と溶接面破断となる場合の不安定な Upset 量の範囲が大きく、高速回転ではそれが小さくなっており、ある程度以上の回転速度があったほうが信頼性の大きな継手が得られることがわかる。旋盤突切りしたものは高速回転では母材破断となるために必要

Fig. 9 Effect of revolution velocity on heating time that is taken to get same amount of upset
S 45 C, 10.0 mm dia., slope time 0.5 sec,
 P_1 : 6.0 kg/mm², P_2 : 12.0 kg/mm²

Fig. 10 Effect of revolution velocity on heating time that is taken to get same amount of upset SUH 3 x SUH 31, 12.3 mm dia., slope time 0.5 sec, P_1 : 6.0 kg/mm², P_2 : 12.0 kg/mm²

な Upset 量は小さくなっており、溶接面の仕上げが良好なほど溶接されやすいことを示している。

3.3 溶接物の径について

SUH 3 と SUH 31 の 7.2, 9.4, 12.3 および 18.0 mm φ 材の旋盤突切りしたものを回転数 2,750 rpm, スロープ時間 0.5 sec, 加熱圧 8.0 kg/mm² 圧接圧 16.0 kg/mm²

Fig. 11 Effect of revolution velocity on broken place by tensile test
SUH 3 x SUH 31, 12.3 mm dia., slope time 0.5 sec, P_1 : 6.0 kg/mm², P_2 : 12.0 kg/mm²

で Upset 量をかえて溶接し溶接後前述の熱処理をして引張り試験をおこない SUH 31 の母材破断となるために必要な Upset 量を溶接物の径に対応させて Fig. 12 に示した。また、同一 Upset 量となるに必要な加熱時間と溶接物の径の関係を Fig. 13 に示した。母材破断となる最小 Upset 量はこの溶接条件では約 4.0 mm 以上の Upset 量があればいずれも母材破断となっている。Fig. 13 からは溶接物の径が大きくなるともなると同一 Upset 量にするに要する加熱時間は高次曲線的に大きくなっている。

3.4 溶接面の表面状況について

溶接面の表面状況が溶接継手に影響するものは溶接面の形状、表面アラサ、表面汚染などが考えられる。

S 45 C, 40 mm φ 材を機械加工により溶接面を ∇ , $\square$, $\square$ の形状で 1° の角度をつけたものおよび $\cap$ の形状のものの表面アラサを約 5.40 および 50 μ に加工し、回転数 1,800 rpm, スロープ時間 2.0 sec, 加熱圧, 圧接圧はともに 4.0 kg/mm², 加熱時間 25 sec で溶接したときのばりの高さを各形状での表面アラサに対応させて Fig. 14 に示した。この図からは周辺の出っばりがあるほど、また、表面アラサの小さいほどばりが大きくなっているのが認められる。

Fig. 12 Effect of specimen diameter on amount of upset that is taken to cause base metal failure

SUH3×SUH31, 2,750 rpm, slope time 0.5 sec, P_1 : 8.0 kg/mm², P_2 : 16.0 kg/mm²

Fig. 13 Effect of specimen diameter on heating time that is taken to get same amount of upset

SUH3×SUH31, 2,750 rpm, slope time 0.5 sec, P_1 : 8.0 kg/mm², P_2 : 16.0 kg/mm²

S 45 C, 40.0 mm ϕ 材に油, サビを付着させたものおよびエーテルで洗滌したものを同一溶接条件で加熱時間を15, 25および30 secとして溶接したときのばりの高さを Fig. 15 に示した。この結果からは清浄なものを溶接したものに比較して、サビの付着したものはばりが大きく、油の付着したものはばりが小さくなっている。この現象は摩擦係数がサビ、油の付着することによって変化

Fig. 14 Effects of surface roughness and shape on flash height

S 45 C, 40.0 mm dia., 1,800 rpm, slope time 2.0 sec, T_1 : 25 sec, $P_1=P_2$: 4.0 kg/mm²

Fig. 15 Effect of surface contamination on flash height

S 45 C, 40.0 mm dia., 1,800 rpm, slope time 2.0 sec, $P_1=P_2$: 4.0 kg/mm²

し、溶接過程での初期段階の発熱、つまり溶接面が赤熱されるまでの過程が変化するためと思われる。この現象は Fig. 15 において各加熱時間による表面汚染のばりの高サへの影響として、初期段階をすぎればほぼ同じ傾向

を示していることからうづけられる。

溶接面の表面状況の継手におよぼす影響として Fig. 11 から明らかなごとく、表面状況不良のものは若干 Upset 量を大きくとれば問題ないものと思われる。したがって溶接面の表面状況は溶接の初期段階においてのみ影響し、定常的な発熱段階になれば影響がなく、定常的な発熱段階にいたる時間が変化するのでこれを考慮した Upset 量で溶接すれば溶接継手としての性質は変化がない。

4. 総 括

以上のごとく S 45 C×S 45 C, SUH 3×SUH 31 および SUS 27×S 35 C について加熱圧, 圧接圧, 回転速度, 溶接物の径, 溶接面の表面状況などの溶接条件について検討した結果を要約すると以下のごとなる。

種々の溶接条件のうちでも Upset 量はとくに大きな意味をもち、ある値以上になれば、他の条件を適当に選定すれば母材破断となる。母材破断となるために必要な最小 Upset 量を決定する要因としては

- (a) 大きく影響する要因
加熱時間, 加熱圧, 圧接圧
- (b) 中程度に影響する要因
回転速度, 表面状況
- (c) ほとんど影響しない要因
圧接時間, 溶接物の径

がある。

加熱圧は Upset 速度に大きく影響し、加熱圧が大きいほど短時間で溶接が終了する。継手への影響としては加熱圧, 圧接圧ともに大きく、また、圧接圧は加熱圧より大きければ大きいほど Upset 量が小さくても母材破断となる。しかしながらある比以上の値をとればその効果は顕著でない。

回転速度は加熱圧, 圧接圧ほど継手への影響は大きくないが、低回転速度では溶接面破断となる場合と母材破断となる Upset 量の範囲のバラツキが大きいので、あ

る程度回転速度を大きくとったほうが Upset 量が小さくても安定した溶接継手が得られる。しかしながら、回転速度が大きいと Upset 速度が小さくなる場合があるので生産性を考慮し、回転速度を選定する必要がある。

溶接物の径が継手におよぼす影響は、旋盤突切りのごとく溶接面の良好なものでは母材破断を生じるに必要な Upset 量の大きさにはほとんど影響しない。また、溶接物の径が大きくなるにともなって同一 Upset 量にするに要する加熱時間は高次曲線的に増大する。溶接面の表面状況、表面汚染は溶接過程の初期の発熱条件に影響し、表面状況不良のもの、表面が汚染されたものなどは母材破断となるために必要な最小 Upset 量は大きくとる必要がある。

参 考 文 献

- 1) "Friction Welding," Automobile Engineer (1963), January, 34
- 2) V.I. Vill, "Friction Welding of Metal"
- 3) M. B. Hollander, C. J. Cheng, J. C. Wyman "Friction Welding Parameter Analysis" W.J., Vol. 42 (1963), No. 11, 495 s
- 4) T. H. Hazlett, "Property of Friction Welded Plain Carbon and Alloy Steel," W.J., Vol. 41 (1952), No. 4 49 s
- 5) T. H. Hazlett, "Property of Friction Welding between Dissimilar Metal," W.J., Vol. 41 (1952), No. 10, 448 s
- 6) T. H. Hazlett, K. K. Gupta, "Friction Welding of High Strength Structural Aluminum Alloys," W.J. Vol., 42 (1963), No. 11, 490 s
- 7) 安藤国輔, 田崎義男, 平井幸男, "摩擦溶接の研究(第1報), 予備実験", 名古屋工業技術試験所報告, Vol. 11 (1962), No. 10, 603
- 8) 安藤国輔, 田崎義男, 平井幸男, "摩擦溶接の研究(第2報), 軟鋼(S10C)の溶接", 名古屋工業技術試験所報告, Vol. 11(1962), No. 10, 603
- 9) 安藤国輔, 田崎義男, 平井幸男, "摩擦溶接の研究(第3報)軟鋼(S20C)の溶接", 名古屋工業技術試験所報告, Vol. 12 (1963), No. 7, 323
- 10) 安藤国輔, 田崎義男, 平井幸男, 杉山順彦, "摩擦溶接の研究(第4報)AlとCuの溶接", 名古屋工業技術試験所報告, Vol. 12 (1963), No. 10, 463
- 11) 中村康一, 青野進, "摩擦圧接法の研究一試作したプログラム制御摩擦圧接機の特性と二,三の実験", 日本金属学会講演概要, (1963一名古屋), 37
- 12) 蓮井淳, 福島貞夫, "摩擦溶接に関する研究", 溶接会誌, Vol. 32 (1933), No. 9, 911