1×10^6 近くの繰返し数で破断した試験片の断面写真である。Photo. 1 (a), (b) の -20°C , 20°C では疲れき裂はナゲット近くの熱影響部で発生し、板厚方向に直角よりややナゲット側に傾斜した方向に進行し、その後板表面に達している。しかし、Photo. 1 (c) の 100°C の場合にはナゲットからかなり離れた熱影響部の外側の母材で発生し、発生直後は板厚方向に直角よりむしろナゲット側と反対に傾斜した方向に進行している。この現象について、十分な検討は行っていないが、この結果から温度環境が疲れき裂の発生と進展にも影響を与える場合があることがわかる。

4. おわりに

本研究で得られた主な結論をまとめると次の通りである。

- 1) スポット溶接継手の引張せん断強さは、すべての鋼種とも温度の上昇とともに低下する。その傾向は母材の引張強さの温度依存性とよく似ている。
- 2) スポット溶接継手の疲れ強さは、すべての鋼種とも温度の上昇とともに低下する。しかし、その低下度は母材のそれと比較して小さい。これはスポット溶接継手が形状的にみてかなり鋭い切欠きをもつ構造であること

が原因と考えられる。すなわち、スポット溶接継手の疲れ強さは大部分がこの切欠きによって支配されており、そのため温度変化の影響が顕著に現われなかったものと推察される。

3) 本実験の温度範囲では、室温の場合と同様、母材の引張強さが変わってもスポット溶接継手の疲れ強さはほとんど変わらない。

4) スポット溶接継手の疲れ強さの温度依存性はスポット溶接継手の引張せん断強さの温度依存性に一番よく似ており、その次に母材の引張強さの温度依存性に似ている。

5) 軟鋼で 100°C の場合、疲れ強さの発生とその進行方向が他の条件の場合と異っており、温度環境が疲れき裂の発生とその進行にも影響を与える場合がある。

参考文献

- 1) “自動車構造の軽量化とスポット溶接に関する最近の諸問題シンポジウム”，自動車技術会，疲労信頼性部門委員会資料，p. 62~66 (1982.6)
- 2) 田海他，“高強度薄鋼板スポット溶接部の疲労および衝撃特性”，溶接学会・低溶研RW-79-75, (1975)
- 3) B. Pollard et al., “Spot Weldability of Dual-Phase Steel”, Society of Automotive Engineers, (1979)
- 4) 佐藤，片山，森井，“多点スポット溶接継手の疲労強度の評価方法について”，溶接学会誌，第50巻，第5号，(1981)

狭開先 MAG 溶接における溶込み形状の観察*

小野 英彦**，小幡 鍊***，寺本 富彦**，松田 隆博**

Observation of Penetration Shapes in Narrow-gap MAG Welding*

by Hidehiko Ono**, Ren Obata***, Tomihiko Teramoto** and Takahiro Matsuda**

In this paper, the cross-sectional shape of I-groove weld beads in DC electrode negative and in DC electrode positive (shielding gas composition: 30%Ar+70%CO₂) MAG welding were studied, and the penetration angle (θ) of the side wall, the contact angle (α) of beads and the wetting height (h) were measured.

Special attention was focussed on clarifying the cause of undercut by direct observation of the flow of molten metal using high speed photography.

The results are as follows:

- 1) Mechanism of origination of under-cut

Dry under-cut

*原稿受付 昭和57年6月21日 (昭和51年度秋季全国大会にて発表)

**正員 日本車輛製造(株) Member, Nippon Sharyo Seizo Kaisha, Ltd.

*** 日本車輛製造(株) Nippon Sharyo Seizo Kaisha, Ltd.

The arc moves around in I-groove rapidly and gouges the side walls of the base metal above the molten pool, exposing fresh solid surface. Moreover, owing to the mild flow of molten metal on the side walls, the solid surface exposed by the arc is not covered by molten metal, and under-cut of toe originates.

Wet under-cut

The arc ignites towards the groove bottom mainly, and gouges the side walls of the base metal below the surface of the molten pool. Moreover, the flow of molten metal on the side walls is strong and melts the side walls above the molten pool, covering the lower portion of the side walls already gouged by the arc. But on account of the side walls being melted too high, the molten metal on the side wall flows down and under-cut of toe originates.

2) Cross-sectional shape of beads

In cases where under-cut does not originate, $(\alpha + \theta)$ becomes, with a little dispersion, a constant value unrelated to welding conditions and h becomes higher with increasing θ .

The bead surface shape has been discussed using surface tensional theory applied to the two dimensional model.

1. ま え が き

ガスマタルアーク狭開先溶接で生じる主な欠陥は、溶込みの断面形状が不適当な場合に生じるルート部の溶込み不足および溶接金属の熱間割れ（いわゆる梨形ビード割れ）、シールド不良によって生じるブロー・ホール、溶接アークの偏りによって生じる開先側壁の溶込み不足、溶融金属がアークより先行した場合に生じるビード底部の融合不良、そしてビード止端部に生じたアンダーカットが、次層の溶接で溶かされずに残る連続した欠陥などがある。

本報では、電源極性を直流棒プラス（DCEP）と直流棒マイナス（DCEN）とし、I 開先を用いてストレートビード溶接し、その溶込み形状を比較観察した。また、ビード止端部に発生するアンダーカットの形態を明らかにするため、溶融池内の溶融金属流を直接高速度カメラで観察すると共に、溶込み形状を観察してその生成機構を明らかにした。そして、狭開先溶接のビード表面形状を表面張力論で考察することを試みた。

2. 供試材料と試験片形状

実験には 2 種類の試験片を用いた。Fig. 1 a に示す試験片（標準型試験片）は、母材の溶込み形状とビード表面形状を観察するためのものであり、Fig. 1 b に示す試験片（片壁型試験片）は、側壁の溶融状態と溶融金属の流動状況を観察するためのものである。材質はいずれも SM 50 A で、開先内面は機械切削した。

用いた溶接ワイヤは、50 kgf/mm² 級高張力鋼用ソリッドワイヤで直径 1.6 mm である。シールドガス組成は 30% Ar+70% CO₂ で、流量は 30 l/min とした。溶接機は三相全波整流定電圧型炭酸ガス溶接機を用いた。

3. 実験方法

溶接は下向姿勢で、トーチを固定し、試験片を移動す

Fig. 1 Shapes and dimensions of test pieces

る自動溶接で行った。チップ-母材間距離は 30 mm で、溶接電流を 280~490 Amp, アーク電圧を 24~42 volt, 溶接速度を 10~45 cm/min の範囲で変化して、ストレートビード溶接を行った。標準型試験片を用いて高速度写真撮影（2000 駒/秒）し、開先内アークを観察する場合は、バックライト用投光器（カーボンアーク）-溶接アーク-高速度カメラの光軸を直線上に合せ、溶接アークの陰画を撮影した。この時、溶接進行方向前から排煙用のガスをアークのシールドが破壊されない程度に吹き付け、さらにアーク後方で吸引して、溶接アークの撮影に邪魔な溶接ヒュームを開先内から排除するよう配慮した（Fig. 2）。

片壁型試験片を用いて溶融池を高速度写真撮影し、溶融金属の流動状況を観察する場合、Fig. 3 a に示す様に、片壁型試験片と水冷銅ブロックでルート間隔 10 mm の I 形開先を構成した。ワイヤ中心位置は開先中心線上で、水冷銅ブロック端から 5 mm 開先内に入った位置とし、アークの発生を開先内で行うと共に溶融池の観察

を容易にした。溶接に際しては、高速度カメラ、投光器、溶接トーチ、水冷銅ブロックを固定し、移動定盤上の片壁型試験片のみ移動する自動溶接法とした (Fig.3)。

Fig. 2 Schematic explanation of experimental apparatus

Fig. 3 Photographing method of molten pool

4. 実験結果および考察

4.1 溶込み断面形状の観察

Fig. 1a に示す標準型試験片を用いてストレートビード溶接し、ビード横断面の溶込み形状を観察した。電源極性の違いによって生じる溶込み断面形状の定性的な変化傾向を Fig. 4 に示す。

DCEP の場合、溶接電流が高くなるか、あるいはアーク電圧が低くなるにつれてアーク直下への溶込みが深くなり、全体に縦長のビード断面形状となる。溶接電流が

Fig. 4 Qualitative change of penetration shapes with changing arc voltage and welding current (current: 280-360A, voltage: 40V, speed: 30 cm/min.)

低くなると、溶着金属量が減少しビード止端部にアンダーカットが発生するが側壁へのぬれは良く、凝固した溶接金属で覆われたアンダーカット (ぬれたアンダーカット) となる。アーク電圧を高くすると側壁への溶込みが増加し、摺鉢状の溶込み形状になり、溶接電流が低い場合と同様ぬれたアンダーカットが発生する。

DCEN の場合、溶接電流が高くなればアーク直下への溶込みが深くなるが、DCEP の場合の様にアーク直下だけ深くなるのではなく、開先底部全体に深くなる傾向がある。溶接電流が低くなると溶着金属量が減少し、ビード止端部に固体表面が露出したアンダーカット (かわいたアンダーカット) が発生する。

溶込み断面形状の観察により、アンダーカットはぬれたアンダーカットとかわいたアンダーカットの二形態があることがわかった。そこで、これらアンダーカットの発生形態の相違を明らかにするため、Fig. 2 あるいは Fig. 3 に示す方法で、高速度カメラにより、開先内アークの発生状況と溶融池内の溶融金属流を観察した。

4.2 高速度カメラによる開先内アークの発生状況と溶融池内の溶融金属流の観察

a) 標準型試験片によるアーク前方からの観察結果

Fig. 2 に示す方法でアンダーカットが発生する場合のアーク発生状況を観察した。高速度写真 (2000 駒/秒) の一例を Fig. 5 に示す。これを見ると、DCEP の場合は、アークは開先底部に集中し、側壁の上部にはほとんど発生しないことがわかる。そして背光によって影絵となって見える溶融池表面 (画面中でかなり激しく動く事により凝固した溶着金属表面ではないと思われる) は大きく凹み、両側壁との接点はアークが発生する位置よりかなり上方にある。

一方, DCEN の場合は, アークは開先内を激しく動き廻り, 開先底部のみならず溶融池表面よりかなり上方にまで開先の両側壁にそってはい上がる現象が見られた. 又, 溶融池表面は DCEP に比べてゆるい凹みであり, 両側壁との接点はアークが発生する位置より下方である.

Fig. 5 High speed photographs of burning arc in narrow gap (current: 320A, voltage: 40V, speed: 30 cm/min., 2000 frames per sec.)

b) 片壁型試験片による溶融池内の溶融金属流の観察

Fig. 3 に示す方法で溶融池内の溶融金属流を観察した. Fig. 6 に高速度写真 (500 駒/秒) の一例 (Fig. 6 I) と高速度写真により観察した溶融池の形状および溶融金属流の模式図 (Fig. 6 II), 断面マクロ写真 (Fig. 6 III) を示す^{*1)}.

DCEN の場合, 4.2 a 項で観察した様に, アークは開先内を激しく動き廻り, 側壁を直接えぐっている様子がうかがえる. Fig. 6 a II の模式図において, 右端のハッチを施した部分は水冷銅ブロックおよびワイヤであり, 側壁上のワイヤ真横位置は, 溶接進行方向の斜後方 40° から観察している関係上矢印 A になる. これを見ると, 溶融池上縁 BE には小さな凹凸があり, B 点において急激に曲る. A 点 (ワイヤ真横位置) で最高点に達し E 点 (溶融池終端) で固体露出面が認められた. 溶融池表面の溶融金属流は B 点附近から溶融池の底へ斜下方に向っている弱い流れ C と溶融池の底を後方へ流れる強い流れ D が認められた. さらに断面マクロ写真 (Fig. 6 a III) を見ると側壁に固体露出面が認められ, かわいたアンダー

カットが発生している. なお Fig. 6 a III に破線でワイヤと水冷銅ブロックの位置を示した.

一方 DCEP の場合, アークは開先底部に集中し, アークが側壁を直接えぐる様子は見られなかった. 側壁上のワイヤ真横位置は Fig. 6 b II の模式図において矢印 A' であり, 溶融池上縁 B' E' はなめらかな曲線となり, A' 点後方で最高点に達している. 溶融金属流は溶融池前方から溶融池上縁 B' E' にそって側壁を溶融池後方へ流れる強い流れ C' と溶融池底部を前方から後方へ流れる強い流れ D' が認められた. 溶融池の表面は DCEN に比べて全体になめらかであり, かつ, その長さも長い. 断面マクロ写真 (Fig. 6 b III) を見ると側壁上部の深い溶込み (溶融金属流 C' による溶込み; 二次溶込み) と開先底の深い溶込み (アークによる溶込み; 一次溶込み) が認められ, 側壁にはぬれたアンダーカットが発生している^{1,2)}.

Fig. 6 Melting characteristics of the side wall in narrow gap MAG welding (current: 320A, voltage: 40V, speed: 30 cm/min, 500 frames per sec.)

これらの観察結果から, ぬれたアンダーカットとかわいたアンダーカットの発生形態の相違は次の様に考えられる.

【かわいたアンダーカットの発生形態】

アークが側壁上部にまではい上り, 大きな一次溶込み

*1) 側壁の材質が互いに異なるため, アークの発生形態が鋼側壁の場合と異なる事が考えられる. 実際アーク前方から観察すると鋼側壁に比べて鋼側壁へアークが発生する頻度が高く, 溶融池表面も鋼側壁側が高くなる. その結果 Fig. 5 III の断面マクロに示す様に, 開先底の溶込みは鋼側壁側へ多少偏っている. したがって, 本報による観察結果は両側壁共に鋼の場合と全く同じとは言えないが, しかし電源極性による諸現象の違いは十分あらわしているものと思われる.

を形成する。しかし、側壁上の溶融金属流が弱いため二次溶込みが小さく、一次溶込みを二次溶込みで覆いきれない場合、側壁上に一次溶込み起因する固体露出面が残り、かわいたアンダーカットとなる。この種のアンダーカットは DCEN で高電圧、低電流の場合に発生し易い。

〔ぬれたアンダーカットの発生形態〕

アークの側壁上部へのはい上りが低いので、側壁上に形成される一次溶込みが小さく、二次溶込みによって完全に覆われる。しかし、側壁上の溶融金属流が強く、余りに側壁上部にまで二次溶込みが及び、側壁上部の溶融金属を表面張力で支えきれず、釣合の位置まですべり落ちて凝固した結果、ぬれたアンダーカットとなる。この種のアンダーカットは、DCEP で高電圧、低電流の場合に発生し易い。

5. 表面張力論によるビード表面形状の一考察

ルート間隔 10 mm の I 開先の場合について、側壁上のビード止端からビード表面の水平位置までの高さ (ぬれ高さ; Fig. 7a の h^{*2}) を測定し、アーク電圧と溶接電流との関係で整理すると、それぞれ Fig. 7a, Fig. 7b に示すとおりである。ここで示した h はビード表面形状を表わす指標量であり、 h は開先底からの側壁の溶融高さ (H) と溶着量を独立して変化できるものとして考えた場合、開先内に供給される溶着量とビード表面の熱源の分布形状によって決まる。しかし I 開先の場合、溶着量と H は互いに密接な関係があり、Fig. 8 に示すように溶接速度が遅くなると溶着量が増せば H も大きくなる。そしてアンダーカットが発生しない場合、 h はほぼ一定である。これはビード表面の熱源の分布形状が一定のまま溶着量が増すと溶融池表面が上昇し、それにつれてワイヤ先端のアーク発生点も上昇し、その結果 H も高くなったものと思われる。したがって溶着量はビード表面形状に直接的な影響を及ぼさないものとして、本報ではこれを無視した。Fig. 7 を見ると DCEN, DCEP 共にアーク電圧あるいは溶接電流が増加するとそれにつれてぬれ高さ h が高くなる事がわかる。一方、側壁への溶込み角 (θ) を、アーク電圧、溶接電流との関係で整理したのが Fig. 9 である。これらを見ると θ もまた h と同様アーク電圧あるいは溶接電流が増すと大きくなる傾向がある事がわかる。Fig. 7 と Fig. 9 を見比べると、 θ

と h との間に何らかの相関関係が存在する様に思われる。そこでビード表面形状を表面張力論により、以下に若干考察する。

Fig. 7 Relationships between welding conditions and wetting height (except the wet under-cut)

Fig. 8 Relationships between welding speed and dimensions of cross-sectional shapes of weld beads in DCEP (current: 360A, voltage: 32V)

*2) h 及び θ の測定に際しては、断面マクロ写真を5倍に拡大し、脚注図のごとく測定した。

Fig. 9 Relationships between welding conditions and penetration angle (θ)

I 開先におけるビード表面形状を Fig. 10 のごとく模式化する。Fig. 10 において座標原点をビードの止端にとり、 y 軸を一方の側壁にとり、これと直交して x 軸をとる。曲線 OA をビード表面、曲線 OB を溶融ボンド線とする。曲線 OA の 0 点における接線 OD と y 軸とのなす角を α 、曲線 OB の 0 点における接線 OC と y 軸とのなす角を θ とする。このような溶接ビード表面の凹み形状が、接線 OD の方向に働く溶融金属の表面張力によるものと考え、壁面から任意の距離 x にお

Fig. 10 Two dimensional model of molten pool in I-groove

ける表面張力によって溶融金属表面の引上げられる高さ y を求めるには(1)式に示す西口らの関係式²⁾が適用できる。

$$\frac{-1}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} = \frac{\rho g}{2\sigma} y^2 - \frac{y}{R_0} - \sin \alpha \quad \dots\dots(1)$$

ここに σ : 溶融金属の表面張力, ρ : 溶融金属の密度
 g : 重力加速度, R_0 : 曲線 OA の 0 点における曲率半径

一方、種々の溶接条件で溶接し、ぬれたアンダーカットの発生しない場合の $\alpha + \theta$ (α はビード止端部の側壁との接触角) を測定した結果を入熱量との関係で示したのが Fig. 11 である。これを見るとバラツキは大きい ($\alpha + \theta$) はほぼ 80° 一定とみなせることがわかる³⁾。多少強引ではあるが(1)式の α の代りに $(80 - \theta)$ を代入し、(1)式を母材の溶込み角 (θ) との関係で示すと(2)式となる。

$$\frac{-1}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} = \frac{\rho g}{2\sigma} y^2 - \frac{y}{R_0} - \sin (80 - \theta) \quad \dots\dots(2)$$

Fig. 11 Relationships between $(\alpha + \theta)$ and heat input

これに毛管定数 $\sqrt{2\sigma/\rho g} = 5.4 \text{ mm}$ として, $x = 5 \text{ mm}$ (ルート間隔 10 mm の場合の原点からビード中央までの距離) における y の値, すなわちぬれ高さ ($-h$) と母材の溶込み角 (θ) との関係を計算して図示したのが Fig. 12 に示す実線である. Fig. 12 には, ルート間隔 10 mm の I 開先におけるぬれたアンダーカットが発生しない場合の母材の溶込み角 (θ) に対するぬれ高さ (h) の実測値を示す. これを見ると計算値と実測値は良く一致しており, θ が大きくなるにつれて h が高くなる事がわかる.

Fig. 12 Relationships between penetration angle (θ) and wetting height (h)

6. 水による液面形状の観察

前項において, 開先広さが一定でぬれたアンダーカットが発生しない場合は, $(\alpha + \theta)$ がほぼ一定になり, その結果 θ が大きくなると h が高くなる事を示した. 溶接におけるビード表面形状は, 湯流れやアーク力にも影響されると考えられる. そこでこれらの影響を除き純粋に表面張力によってのみ釣合った液面形状にも, 前項と同様な傾向が見られるかどうか確認する実験を行った. 実験方法は, Fig. 13 c に示す中央に開先と溶込み断面を模したくり抜きのあるワックス型 (表面をエナメル系黒色ペイントで塗布した) を Fig. 13 a, b に示す様に墨

Fig. 13 Observation method of beads surface shapes with water

Fig. 14 Photographs of bead surface shapes modelled using water

汁で着色した水中に浸し, 表面張力で凹面になった液面を観察した.

その結果の一例が Fig. 14 である. 図中白い破線でワックス型の輪郭 (溶込み線に相当) を示した. 液面に見られる縞模様は, バックスクリーンが反射して見られるものである. 写真はそれぞれの溶込み角 (θ) で観察された, 最も高いぬれ高さ (h) の場合を示しており, Fig. 15 には θ と h の関係を示した. また, Fig. 15 には $\alpha + \theta$ (α は側壁への液の接触角) をも示した. これを見るとパラツキは大きい, 水の場合もやはり $(\alpha + \theta)$ は一定となり, θ が大きくなると h が高くなる事がわかる.

Fig. 15 Relationships between θ and dimensions of cross-sectional shapes of water

7. ま と め

狭開先溶接において多層盛り溶接をした場合, ルート部にスラグ巻込みが発生する場合がある. 本報では, このスラグ巻込みが発生する一因であるビード止端部のアンダーカット発生状況とビード表面形状を観察し, 次の点を明らかにした.

a) 狭開先溶接 (I 開先) におけるアンダーカット発

生形態

〔かわいたアンダーカット〕

アークが側壁上部にまではい上り, 大きな一次溶込みを形成する。しかし, 側壁上の熔融金属流が弱くて二次溶込みが小さく, 一次溶込みを二次溶込みで覆いきれない場合, 側壁上に一次溶込みに起因する固体露出面が残る, かわいたアンダーカットとなる。

〔ぬれたアンダーカット〕

アークの側壁上部へのはい上りが低いので, 側壁上に形成される一次溶込みが小さく, 二次溶込みによって完全に覆われる。しかし, 側壁上の熔融金属流が強く, 余りに側壁上部にまで二次溶込みが及び, 側壁上部の熔融金属を表面張力で支えきれず, 釣合の位置まですべり落ちて凝固した結果, ぬれたアンダーカットとなる。

b) 側壁への溶込み角 (θ) とビード表面形状

アンダーカットが発生しない場合, パラツキは大きい $\alpha + \theta$ (α は熔融金属の側壁への接触角) が溶接条件に無関係に一定となる事を実験的に明らかにした。そして θ が大きくなると h (ビードのぬれ高さ) が高くなる事を示すと共に, 表面張力論 (二次元モデル) による計算結果と実測値が良く一致する事を示した。

参 考 文 献

- 1) 西口, 黄地, 平岡: *ノン・ガスシールド・アーク溶接におけるビード形成現象* 本誌, Vol. 44 (1975), No. 10
- 2) 西口, 黄地, 松井: *肉盛および隅肉溶接現象に関する基礎的研究 (第2報)*, 本誌, Vol. 45 (1976), No. 2
- 3) 石崎, 熊谷, 牧野: *アーク溶接現象に関する界面張力理論 (第8章)* 本誌, Vol. 34 (1965), No. 2

鋼のCO₂ アークスポット溶接(第2報)*

—アーク熱による母板の動的変形挙動—

小野 英彦**, 小幡 鍊***, 寺本 富彦**, 松田 隆博**

CO₂ Arc Spot Welding in Steel (Rept II)*

—Dynamic Deformation Characteristics of Base Plate—

by Hidehiko Ono**, Ren Obata***, Tomihiko Teramoto** and Takahiro Matsuda**

The dynamic deformation occurring on the welded plate during arc spot welding was investigated. As a result, it was observed that the welded plate deformed to the plus side of the plate (welding side) at about the same time as arc ignition and the deformation reached a maximum soon after. When the deformation reached the maximum, it reversed itself, reached zero, and then proceeded towards a maximum at the minus side (back side) of the plate.

In terms of arc time, in mild steel (plate thickness < 8 mm), the deformation toward the plus side reached its maximum value in less than 50% of arc time and returned to zero before the arc was extinguished (i.e. within the arc time).

However, these characteristics changed with the material welded, as has been shown by similar experiments on stainless steel and aluminium alloy plate.

1. ま え が き

比較的薄い板を重ね合せて溶接するアークスポット溶

接は, 母材が片面から点状に加熱溶融されるので, 溶接部近傍で局部的な変形が発生する。また, 本溶接法は, 溶接時の重ね板間の加圧力が弱いので, 上下板の密着が悪い上に溶接中に母材が熱変形し, 溶接部の板間隙が拡大する事も考えられる。そして, この拡大した間隙へ熔融金属が流出して凝固し, これが挟雑物となって継手部の板の密着を悪くし, 結果的に継手強度のばらつきに

*原稿受付 昭和57年6月21日 (昭和55年度秋季全国大会にて発表)

**正 員 日本車輛製造(株) Member, Nippon Sharyo Seizo Kaisha, Ltd.

*** 日本車輛製造(株) Nippon Sharyo Seizo Kaisha, Ltd.