間後のクリープ速度について考察している。残留応力が消去されるものとすればクリープ試験開始後 1 時間内に大部分消去されると考えられるから本実験結果におよぼす残留応力の影響は少いであろう。

2) 本実験における最大予歪に対する引張試片のクビレ部最小断面の直径は大体 9mm 程度で、この試片から平行部直径 5mm の中実丸棒振りクリープ試片を採取するのであるから、残留応力はクリープ試験前に大部分除去された状態にあると考えられる。

したがって引張予歪を与えた材料のクリープ特性に対する残留応力の影響は無視しても差支えない程度のものであると考えられる。

6 結 論

本研究は焼準耐熱鋼のクリープ特性におよぼす常温引張予歪の影響を調査したもので、次の諸点が認められた。

1. 予歪量が増大し、最大荷重点に相当する予歪点に達するとクリープ速度は急激に増加し、クリープ速度は約 2 倍となる。しかしこの点の前後においてクリープ速度はほぼ一定の値を保つと考えられる。換言すれば予歪に対するクリープ速度増大の遷移現象が認められ、材料は加工度に応じ大、小 2 種のクリープ速度を有する。

2. 上記大、小 2 種のクリープ速度に関して次のごとき一般式を考える。

$$\dot{\gamma} = KP^n$$

$$P = \tau \cdot e^{-Q/RT}$$

$\dot{\gamma}$: クリープ速度, τ : 前断応力, T : 絶対温度, Q : 活性化エネルギー, R : ガス常数, K および n : 常数

温度一定なる場合上式は本実験範囲内で成立し、大、小 2 種のクリープ速度の比は応力に無関係に一定となる。

3. 上式を温度の函数として考える場合には 300°C と 450°C, 600°C との 2 群に分れて成立し、各群において予歪に関する大、小 2 種のクリープ速度の比がパラメーターに無関係にほぼ一定に保たれることとなる。これは恐らく常温加工後の焼鈍ないしクリープ変形中の材質変化に基づくものと考えられ、これらの点についてはさらに調査の上報告の予定である。本研究は昭和 28 年度関西電力高温高压蒸汽管研究会の援助によるものである。記して謝意を表す。

文 献

- 1) 渡辺, 合田, 山田, 「過歪状態における金属の挙動一振り予歪軟鋼材の振りクリープ特性について」, 熔接学会誌, 昭和 31 年 2 月
- 2) 本式は引張試験に関し C. Zener らによって提案された応力, 歪速度および温度に関する式と類似している。C. Zener and H. Hollomon, J. App. Phys., Vol. 15, Jan. (1944).
- 3) 本式はいわゆる unit of flow の概念からクリープ式として導かれている。E.U. Condon, Trans. A.I. M.E., Vol. 131, p. 410. (1938); W. Kauzmann, Trans. A.I.M.E., Vol. 143, p. 67 (1941); S. Dushman, L.W. Dunbar and Huthsteiner, J. App. Phys., Vol. 15, Feb., p. 108 (1944); C. Zener and J.H. Hollomon, J. App. Phys., Vol. 17, Feb, p. 78 (1946).

耐食性アルミニウム合金 ANP 板の消耗電極式

アルゴンアーク熔接の研究* (第 1 報)

— 熔け込みと黒粉の発生について —

鈴木 春 義** 村瀬 勉***

Tests on Inert-Gas Metal-Arc Welding of Corrosion Resisting Aluminum Alloy "Anp" Plates (Report 1)

Welding Conditions, Penetration and Black Powder

By H. Suzuki** and T. Murase***

Abstract

* 原稿受付 昭和 31 年 6 月 11 日 (昭和 30 年度熔接学会秋季学術講演会において発表)

** 正員 運輸技術研究所 Member Transportation Technical Research Institute

*** 正員 川崎重工工業株式会社 Member Kawasaki Heavy Industries & Co.

Various tests on the inert-gas metal-arc welding of a corrosion resisting aluminum-magnesium-manganese alloy "ANP", have been performed with ANP-O and ANP- $\frac{1}{4}$ H plates, $\frac{1}{4}$ in. in thickness, and various consumable electrode wires, 2S, 52S, A54S, 56S and ANP. The tests consisted of, (1) effect of welding condition on penetration and bead shape, (2) influence of surface treatment, welding condition and technique on occurrence of black powder around bead and porosities in weld metal, (3) cracking properties versus filler wires, (4) mechanical properties of butt welded joint, (5) ductility and mode of fracture in tensile test, (6) hardness distribution and weld thermal cycle in welded joint, (7) effect of weld porosities on mechanical properties of butt joint, (8) microstructure, and (9) corrosion of welded joint.

The present report Part 1 includes the tests (1) and a half of (2). The penetration characteristics, electrode melting rate and the effects of welding conditions, filler wires, surface treatments, and torch angle on the occurrence of black powder are discussed.

1 緒 言

アルゴンアーク溶接の普及に伴って最近では耐食性アルミニウム合金が船舶、化学工業、車輛、耐食容器、建築などに盛に使用されるようになり、材料面でも従来使用されていた 52S, 56S などの耐食性 Al-Mg 合金に少量の Mn を添加して機械的性質の向上を図った英国の NP5/6 や米国の 5083, 5086 などの新しい耐食性 Al-Mg-Mn 合金^{1,2)}が造られている。英米ではこれらの新合金の強度、耐食性はもちろん溶接性も良好なことが実証され、各方面に実用化されている。わが国においても1954年、海上保安庁の内火艇あらかぜ³⁾に NP5/6 を試用して成功を収めているが、それには非消耗式アルゴンアーク溶接が使用された。今回防衛庁艦艇用として NP5/6 に類似の防衛庁規格の ANP 材が試作され、その工作法基準作製のために軽金属協会の船舶用軽金属委員会において色々な実験が研究所、造船所、アルミメーカーにより行われた。以下に述べる研究は筆者等がこの委員会の研究を分担して行ったもので、新しい消耗電極式アルゴンアーク溶接の実用化に関して耐食性 Al-Mg-Mn 合金、ANP 材の溶接に関する種々の実験を行った結果である。

最近わが国においてもアルミニウム合金その他に消耗電極式アルゴンアーク溶接法が採用されつつあるが、この方法はタングステン電極を用いる従来の非消耗式に比べて極めて高能率で、とくに約 3mm 以上の厚板に対して適当で経済性も溶接操作の容易さの点より、また熔性割れを防ぐ点からみて極めて優れた溶接法と考えられている。しかしこの方法は非消耗式に比べてアークの機構が根本的に異なることはもちろん、溶接速度が非常に大きく、従って熔融金属の凝固が速すぎて充分にガスを放出するひまがなく、このため気孔を発生しやすい欠点がある。それゆえ溶接前の板および電極線（ワイヤ）の表面状態（水分、油脂、厚い酸化膜、その他の汚物）はもちろん、溶接条件もかなり敏感に溶接結果に影響し、ビード両側の黒粉、溶接金属内の気孔、酸化物のまき込みなどの欠点を生じやすく慎重な溶接施工が必要とされている。

すでに米英では消耗式アルゴンアーク溶接について数多くの研究⁴⁻⁷⁾がなされており、わが国でも最近実験結果^{8,9)}が発表され始めているが、それらは溶接部の機械的性質が主で上述の諸欠陥に関する具体的な研究結果は比較的少ない現状であり、本溶接法の実用化にあたりこれらの問題を解明することは重要と思われ、下記のような諸実験を行った。

- (1) 溶接条件と溶込み試験
- (2) 黒粉と溶接条件
- (3) 気孔と溶接施工条件
- (4) 溶接金属割れ試験
- (5) 溶接継手の機械的性質
- (6) 溶接部の延性と引張破壊様式
- (7) 溶接部の硬度と温度分布
- (8) 溶接部の気孔と機械的性質との関連
- (9) 顕微鏡組織
- (10) 腐食試験

この中第 1 報は溶接条件と溶込みおよび黒粉の発生に関するものである。

2 実験装置

溶接装置はリンデ社製 SMW-2 型半自動溶接トーチ (350 A) を使用し、溶接機はブラウンボveri 直流溶接機 (垂下特性) を用いた。溶接条件をできるだけ一様に保つために溶接トーチはレール上を駆動される電動台車 (BBC の Uniweld の台車を利用) に取付けて自動送りとした。実験はすべて下向溶接で行った。

またアークの発生を容易にするためアークスタート時に高周波発生装置を併用した。これらの実験装置の外観を写真 1 に示す。

Photo. 1 Experimentol apparatus

3 供 試 材

供試機は Table 1 に示すように耐食性アルミニウム合金 ANP(英国 NP5/6 相当の Al-Mg-Mn 合金) 6mm 板厚の 0 および 5 種の電極線 (ワイヤ) ANP, 52S, A54 S, 56S および 43S を使用した。また一部に純アルミ電極線 2S を併用した。実験の結果判明したところでは供試 0 材は完全な 0 材でなく、幾分加工硬化されていた。

4 試験結果

(1) 熔接条件と熔込み試験

まず熔接施工にあたって必要な熔接条件のデータを得るために ANP-O (焼鈍材) 6mm 板と ANP ワイヤ (1/16in. 径) を次の化学処理:

5%苛性ソーダ液に 60°C で 30~60 秒浸漬後常温にて 50%硝酸液に約 5 分浸漬し、水洗後熱湯にて洗滌し乾燥させるにて清浄にし、ビード熔接を行って電流、電圧および速度と熔込み、ビード巾および補強盛りの高さとの関係を調べた。なおアーク電圧としては便宜上コントロールボックスから熔接トーチまでの導線の電圧降下を台めて測定された値を用いたので、実際のアーク電圧は本報告の値よりも 2~3 ボルト値となる。

Photo 1 には熔接条件を変えてビード熔接を行った場合の熔込みの状態を示す。同一のアーク電流に対しては、アーク電圧の増加 (すなわちアーク長の増大) と共に熔込みが減少し同時にビード幅が増加している。また同一のアーク電圧の下では、アーク電流の増加に伴って熔込みとビード幅が同時に増加している。

Fig. 1 には熔接速度を一定とした場合について熔接電流、電圧と熔込みとの関係を示す。

これによれば電流の増加に比例して熔込みは大きくな

Table 1 Chemical Analysis and Mechanical Properties of Test Plate and Consumable Electrodes

		Filler wire (Electrode)					Plate
Trade name		52 S	A 54 S	56 S	NP5/6	43 S	NP5/6
Japanese name		A 2 P1	—	A 2 P2	ANP	—	ANP
Chemical composition (%)	Cu	<0.10		<0.10	0.011	<0.30	0.06
	Fe	Fe+Si	Fe+Si	<0.40	0.20	<0.80	0.14
	Si	<0.45	<0.45	<0.30	0.10	4.5 ~6.0	0.08
	Mn	<0.10	<0.10	0.05 ~0.20	0.47	<0.05	0.84
	Mg	2.2 ~2.8	3.1 ~3.9	4.9 ~5.6	4.01	<0.05	4.55
	Zn	<0.10	<0.20	<0.10	0.008	<0.10	—
	Cr	0.15 ~0.35	0.15 ~0.35	0.05 ~0.02	0.18	—	0.18
	Ti	—	<0.20	—	0.090	<0.20	—
	Al	BAL	BAL	BAL	BAL	BAL	BAL
Mechanical properties	O	Y.P	—	—	—	—	22.9
		T.S.	—	—	—	—	32.9
		δ(2)"	—	—	—	—	19.1
	1/4 H	Y.P.	—	—	—	—	27.0
		T.S.	—	—	—	—	36.0
		δ(2)"	—	—	—	—	13.1

Photo. 2 Effects of arc current and voltage on weld shape in consumable argon arc welding of ANP 6mm plate with 1/16in. ANP wire at a constant speed, 25ipm.

り、反対にアーク電圧の増加と共に減少しており、被覆金属アーク熔接の場合に比べてアーク電圧の影響がかなり大きい。Fig. 2 には熔接電流、電圧を一定にして熔接速度と熔込みの関係を示す。

Fig. 1 Penetration vs. welding current and voltage with welding speed held constant

Fig. 2 Penetration vs. welding speed with current and voltage held constant

Fig. 3 Effect of welding condition on penetration in bead weld of Anp 6mm plate with $\frac{1}{16}$ in wire

ルゴンアーク熔接の熔込みは実験式；

$$p = 0.16 \sqrt[3]{I^3 / E^2 V} - 4.4 (\text{mm})$$

たゞし I (Amp), E (Volt), V (in/min)

で与えられる。

Fig. 4 には電流と電圧を変えた場合のビード巾と補強盛りの高さを示す。

Fig. 4 Bead width and reinforcement vs. welding current and voltage under constant welding speed

ビード巾は電流や電圧の増加と共に増大し、補強盛りの高さは電流の増加や電圧の減少と共に僅かに増大している。

各種電極線の熔融速度を Fig. 5 に示す。電極線は 43S

Fig. 5 Filler wire melting rate vs. welding current with voltage held constant

また Fig. 3 は熔込みと熔接電流 (I), 電圧 (V), 速度 (v) の関係を一括して整理したものであるが、被覆金属アーク熔接の熔込みに従来よく用いられている変数 $I/\sqrt{v}$ で整理するよりも、むしろ潜弧熔接の熔込みに対する Jackson¹⁰⁾ の変数 $\sqrt[3]{I^3/E^2V}$ を用いたほうが、測定値がよく揃うようである。消耗式アルゴンアーク熔接では潜弧熔接の場合には類似する高電流密度を用いていることを考えれば当然の結果であろう。Fig. 3 によると板厚 6mm の ANP 材に、 $\frac{1}{16}$ in 径の共金ワイヤを用いた場合の消耗式ア

52S, A54S, ANP, 56S の 5 種につき、線径を $\frac{1}{16}$ in および $\frac{3}{32}$ in のものにつき、アーク電圧を一定にして各電流に対する熔融速度 (in/min) を測定した。これによれば 43S はもっとも熔融速度が小さく、また 52S, A54S, ANP, 56S の順にマグネシウムの含有量が増加するにつれて熔融速度が増大している。これはマグネシウムが多いものほど融点が高いことに関連するものかも知れない。

被覆金属アーク溶接棒では熔融速度として単位時間の熔融重量で (gr/min) 比較すると棒径が異っても同一アーク電流に対しては同一の熔融重量速度が得られるものである¹⁰⁾。これに対して Fig. 5 の場合には、同一アーク電流に対して大きい線径 ($\frac{3}{8}$ in) のほうが小さい線径 ($\frac{1}{8}$ in) よりも熔融重量がかなり小さい (約 $\frac{1}{3}$) ことが認められる。すなわち同一アーク電流に対しては小さい電極線径の方が溶接が高能率であることがわかる。

(2) 黒粉と溶接条件

消耗電極式アルゴンアーク溶接ではたとえビード自身が美麗あってもそのビード両側に Photo 3 に示すように灰

Photo. 3 Black powder arrpund the bead.
(200A, 25V, 20ipm, ANP $\frac{1}{8}$ in wire)

黒色粉状の化合物を生じ、溶接部の強度や耐食性に直接の悪影響がない場合でも外観上汚く、また多層溶接の場合にその除去の要不要が問題になる。実際には後で示すように黒粉の発生が多いほど、溶接金属に気孔を生じ易いから、黒粉は少ないほど望ましいと考えてよい。黒粉の発生機構は Muller 等⁴⁾ によるとアーク中で蒸発したアルミニウムがアルゴンシールドの外側の空气中で燃えて発生するといっている。しかし以下の諸実験結果からみると、アルゴンシールドが何かの原因で不完全となって混入した窒素や酸素がアーク中のアルミニウムの蒸気と反応して窒化物や酸化物を形成して、これが熔着金属および母材表面に吹きつけられて生ずるもののようである。実際に筆者が那須アルミニウム工業株式会社研究課大鷹技師に黒粉の分析を依頼した結果では、黒粉はアルミニウムの窒化物および酸化物であることが確かめられた。そこで本実験では黒粉の発生量を少なくする方法を見出すために、その発生原因と考えられる次の7つの項目について実験した。

- 1) 板および電極線の表面状態
- 2) 電極線の種類
- 3) アークの安定度 (主としてアーク電圧)
- 4) 溶接入熱 (溶接電流と速度)
- 5) アルゴン流量
- 6) 溶接トーチの角度
- 7) 溶接雰囲気 (空気またはアルゴン気中)

1) 板および電極線の表面状態と黒粉

表面処理を脱脂のみ、および化学処理を行った2種の状態でビード溶接を行ってその外観を比較した。

この場合に電極線の合金元素としてマグネシウムが含まれると、マグネシウムが溶接中に燃えてスパッタが多く、この

ためアルゴンシールドが乱れて黒粉の発生が比較的多くなるので、この影響を除くためにマグネシウムを含有しない純アルミニウムの電極線2Sを使用した。試験一例は Photo 4 に示すとおりで、これから次のことが判明した。すな

Photo. 4 Black powder vs. surface leanning
of electrode (2S) $\times \frac{1}{4}$

わち電極線を化学処理によってクリーニングすれば板の表面クリーニングが多少悪くても黒粉の発生が少なかったが、これと反対に電極線を脱脂したままの不完全クリーニングのものでは、板の表面を化学処理 (完全クリーニング) した場合でも黒粉の発生が比較的著しかった。すなわち板よりも電極線の表面のクリーニングの不充分さが黒粉の発生により敏感に影響すると考えられる。

2) 電極線の種類と黒粉

黒粉の発生状態は電極線の合金成分としてのマグネシウムの含有量によってかなり異なることを Photo 5 に示す。すなわち 2S や 43S 電極線のようにマグネシウムを含有しないものではアークが極めて静かであり、また適正アーク電圧で表面を充分清浄に (化学処理) して溶接す

Photo. 5 Black powder vs. electrode material $\times \frac{1}{4}$

れば黒粉の発生はほとんどないか、あるいはあってもきわめて少ない (たゞしアークスタート部を除く)。しかしマグネシウムを含有するものではその含有量の増す順に 52S, A54S, ANP, 56S と次第に黒粉が巾広く多量に発生している。この原因としてはマグネシウムを含む電極線ではアーク中でマグネシウムが燃えてパチパチと音をたててスパッ

タが多く、このためアークのシールドが乱されてアークの周囲の金属蒸気が空気にふれる可能性が多くなると考えられる。

3) アークの安定度(主としてアーク電圧)と黒粉。

アーク電圧の黒粉に対する影響はかなり顕著である。アーク電圧が極めて低い場合にはアーク電圧のオッシログラフ写真で確められるように、溶滴によって電極線と板との間に瞬間的な短絡が生じてスパッタが多くなり、またこれと反対にアーク電圧が高い場合にはアークが不安定となっていずれの場合にもアルゴンシールドを乱すので黒粉の発生が多くなるのが認められた。特にアーク電圧の著しく大きい場合には黒粉がビード両側はもちろん、ビード表面にまで拡がり、粒状になって強く附着しブラシをかけても除去できない場合がある。

4) 熔接入熱(熔接電流、速度)と黒粉

電流が大きいほど、熔接速度が小さいほど、すなわち熔接入熱が大きい場合ほど黒粉の発生は減少する傾向が認められた。このように熔接入熱が大きい場合には一旦生じた黒粉が大きい熔接熱により一部が燃えて消滅するのが実際に熔接直後肉眼で認められた。

5) アルゴン流量と黒粉。

2S 電極線によるビード熔接ではアルゴン流量が 25cfh 以上ではほとんど差は見られないが、流量を減じて 20cfh にすると黒粉がやゝ多くなり、15cfh ではビード両側はもちろん、ビード表面にも点々として黒粉が発生した。アルゴン流量が標準値(板厚 6mm に対しては 35cfh)よりも著しく増すとビード表面はかえって汚くなり、アークも不安定になった。

6) 熔接トーチの角度と黒粉。

熔接トーチと板の垂線との角度は黒粉の発生に著しく影響することが認められた。たとえば ANP 電極線に対しては板の垂線とトーチの間の角度、すなわちトーチ角度が -10° , 0° , 15° , 20° , 30° と次第に増すほど、すなわちノズルの先端が先行するほど黒粉が著しく減少した。これにより ANP 電極線を用いる場合のトーチの角度は 20° 附近が適当と考えられる。しかしマグネシウムを含まない 2S や 43S 電極線に対してはトーチ角度はそれほど大きくとる必要はなく、わずかに 5° ぐらいで充分であった。

7) 熔接雰囲気(空気またはアルゴン気中)と黒粉

上述したいずれの実験の場合にもアークスタート部には黒粉の発生が多いが、これは瞬間的なアークスタートによってアルゴンシールドが乱されて空気を巻き込むためと思われる。この現象を確認するために箱 ($15 \times 40 \times 40 \text{cm}^3$) の中にあらかじめアルゴンを充填させその中でビード熔接を行ったが、アークスタートにより大部分のアルゴンが吹き飛ばされて好結果が得られなかったが、空気中でアークスタートさせたものよりやゝスタート部の黒粉が少ない程度であった。

5 結 論

以上の Al-Mg-Mn 合金 ANP 板の消耗電極式アルゴンアーク熔接の熔接条件と熔込みおよび黒粉の発生についての試験結果を要約すると次のようである。

(1) アーク電流が増加するにつれ、熔込みとビード巾がともに増加し、またアーク電圧が増加(アーク長の増加)するにつれて熔込みは減少するがビード巾は増加する。

(2) 消耗式アルゴンアーク熔接の熔込みは、 $I/V^{1/2}$ よりも溶弧熔接と同一のパラメーター $(I/E^2V)^{1/3}$ でよく整理できる。

(3) 電極線の熔融速度はアーク電流と共に増加し、同一のアーク電流に対しては細径のほうが熔融重量速度が大きくて熔着が高効率である。

(4) ビード両側に生ずる黒粉は主としてアルゴンシールドが部分的に不完全となった結果、金属蒸気が窒化または酸化されて生ずるものと考えられる。

(5) 黒粉の防止には電極線を化学的にクリーニングする必要があり、板の表面のクリーニングはさほど影響しない。

(6) 電極線のマグネシウム含有量が多いほどアークが不安定になって黒粉が増加する。2S ではほとんど黒粉を発生しないて熔接できる。

(7) 黒粉の減少にはアーク長さを適当に保つことが有効で、これが長すぎても短かすぎても黒粉は増加する。

(8) アルゴンの流量不足は黒粉を増加する。

(9) 熔接入熱が高いと黒粉が少なくなる。

(10) Al-Mg-Mn 合金にはトーチの角度を 20° 程度にとると黒粉の発生が少なくなり、これに対し 2S では 5° でよい。

最後に船舶用軽金属委員会、東大木原教授、市川熔接部長の御指導に深謝し、また実験に協力された川名、田中、加藤、佐伯の諸君に衷心より感謝する。

文 献

- 1) L.A. Cook, S.L. Channon, A.R. Hard; W.J., 1955 (2), 112-127.
- 2) 船舶用軽金属委員会; 同委員会第5回報告, 1954, 183-187
- 3) 三菱造船下関造船所; 船舶用軽金属委員会第5回報告, 1955, 121-128.
- 4) A. Muller, G.J. Gibson, E.H. Roper; W.J., 1950 (6), 458-482.
- 5) F.G. Nelson, Jr., F.M. Howell; W.J., 1952 (9), 397s-402s.
- 6) W.R. Apblett, Jr., C.R. Felmley, W.S. Pellini; W.J., 1952 (12), 596s-606s.
- 7) C.T. Gayley, J.R. Cirini, W.H. Wooding; W.J., 1953 (4), 179s-190s.
- 8) 山口, 山本; 軽金属, 1955 (8), 160-167.
- 9) 船舶用軽金属委員会第6回報告(1955), 三菱造船, 大阪変圧器, 磨磨造船, 運輸技研, 東大生研, 264-296.
- 10) C.E. Jackson, A.E. Shrubbsall; W.J., 1953 (4), 172s-178s.