論 説

UDC 621.791.016:621.791.753.93

MAG溶接**の溶接作業性と継手性能に及ぼす シールドガス組成の影響

竹内 宥公*, 洞 田 亮*

Influence of Gas Composition of Metal Active Gas Arc Welding on Operative Weldability and Mechanical Properties of Weld Metal

Yuuko Takeuchi and Akira Horata

Synopsis

CO₂ welding has been used more and more because of the properties of saving energy and obtaining higher efficiency, but now there grow requirements for further reduction of spatter, improvement of bead appearance, increase of welding speed and elevation of quality of weld metal. MIG welding seems to be suitable for these purposes, but it has fatal demerit that blowholes generate so often.

It was thought that these requirements can be satisfied by combining of CO₂ and MIG welding (MAG welding), so that an investigation was made about the effects of Ar-CO₂ mixed gas welding on the usability and properties of weld.

The results obtained are as follows:

- 1) Generation of spatter becomes fewer when spray transfer occurs in MAG welding.
- 2) Spray transfer occurs when ratio of Ar in shielding gas is more than 70%.
- 3) It is necessary to make the ratio of Ar in shielding gas less than 85% so as to inhibit the generation of blowholes.
- 4) Frequency of short circuit increases according to increase of ratio of Ar, but as the ratio of Ar becomes over 85%, it decreases.
- 5) Appearance of bead and mechanical properties of weld metal become better according to increase of Ar ratio in shielding gas.

By these results, it was concluded that Ar-20%CO₂ mixed gas was the best for MAG welding. And it was understood that Ar-20%CO₂ MAG welding had merits of CO₂ and MIG welding and furthermore, it had special features better than those two welding.

Also, the electrode wires DD50A and DD50S were developed for MAG welding.

昭和54年8月15日 受付

*大同特殊鋼(株)研究開発本部中央研究所

**MAG溶接法とは Metal Active Gas arc
welding の略であり, Ar+CO₂ または O₂ な

どの活性ガスをシールドガスとして用いる溶
接法をいう^{1)~7)}。

1. 緒 言

ガスシールドアーク溶接の一つである CO_2 ガス溶接は高能率半自動(自動)溶接法として、各種の機械産業分野でよく用いられており、全溶接用材料中のその使用量は昭和45年の7%から昭和53年には23%へ増加し、今後もこの傾向がさらに進むものと予測されている。

しかし、近年ロボットによる溶接法の無人化、溶接の高能率化などその応用分野をさらに拡大させるために、スパッタ、ビード形状、溶接継手性能に関して、より改良されたガスシールドアーク溶接法が要望されるようになった。スパッタの少ない溶接法としては、 $\text{Ar}+2\sim5\%\text{O}_2$ ガスを用いる溶接法(一般的には MIG 溶接法に分類されてきた)が存在するが、この溶接法は Ar ガスが高価であったこととブロホールが発生しやすいことが重大な欠点であり、低合金鋼には用いられる機会が少なかった。

しかし、 Ar ガスは LNG の実用化にともない、その気化潜熱を利用して大量に製造され、比較的安価に入手できる状況に変化してきた。また、 O_2 を CO_2 に置きかえることによって、MIG 溶接と CO_2 ガス溶接の両長所(高能率・無気孔)をあわせ持つ溶接法を開発できると考えられた。そこで、これを具体化するために最適なシールドガス組成の検討と溶接ワイヤの開発とを行った。本論文ではシールドガス組成がスパッタ、ブロホール、機械的性質など溶接部の特性に及ぼす影響について調べた。

2. 実験方法

2.1 実験の主眼点

ガスシールドアーク溶接の滴の移行方式には、短絡移行、グロービュラー移行、スプレー移行の3種類ある。これを図に表わすと Fig. 1 (a)~(c) のようである。(a)は小電流域で得られ、(b)は CO_2 ガス被包中大電流域で得られ、(c)は Ar ガス被包中大電流域で得られる。

(a)の短絡移行は、ワイヤ先端の滴がアーク中を飛び出す以前に母材側に短絡し、短絡をくりかえしながら、各短絡毎に溶滴が移行する移行形態である(滴の移行回数は30~150c/s)。短絡回数が多いほど滴が細くなり作業性が優れ、きれいな溶

(a) short circuiting transfer, (b) globular transfer, (c) spray transfer, dotted lines: routes of current.

Fig. 1. Schematic diagrams of each transfer type.

接ができることが知られているが、MAG 溶接用ガス中では、滴のくびれ現象が起るため、小滴時に短絡し、短絡回数が増加する可能性がある。従って、MAG 溶接の方が、 CO_2 単独や Ar 単独より細かい滴での移行が期待される。このためガス組成と短絡回数増加傾向との関係について試験した。

(b)・(c)は大電流域で得られ、(b)は CO_2 で、(c)は Ar 中で得られる。前者は直径が約 1.2mm 以上の球滴、後者は極めて小滴となる。 Ar と CO_2 の混合ガスの場合、混合率と電流値によっては(b)、(c)いずれの現象が得られるか明確ではない。また、 Ar 溶接はスプレー移行になる長所があるが、ブロホールが発生する欠点がある。逆に、炭酸ガスはブロホールは発生しないが、グロービュラー移行しか得られずスパッタが多い欠点がある。この両者の欠点を消去し、長所を活かす手段が MAG 溶接の中に見いだせないかどうか検討する。スパッタの多少は、滴の移行形態に関係が深く、スパッタの大小、多少は主として、滴の大小に依存するといわれ、スパッタはスプレー移行のとき最少となることが知られている。従って、MAG 溶接では、スプレー移行時に生ずる低スパッタ性を利用しようとしているものである。

本研究では無スパッタにするための条件、ブロホールを防止するための条件を、主にシールドガス組成をパラメータとして究明し、併せて MAG ($\text{Ar}-\text{CO}_2$) 溶接のその他の特性についても

調査した。

2.2 実験方法

実験に用いたシールドガスは、CO₂ ガスは JIS K 1106 の第 3 種の溶接用液化炭酸（純度 99.5% 以上）を、Ar ガスは JIS K 1105 の溶接用 Ar ガス（純度 99.9% 以上）を用いた。MAG 溶接では CO₂ ガスと Ar ガスを精度 ±1% で混合し、その混合比は Ar : 0, 25, 50, 70, 80, 90% とし、必要に応じて 75, 85, 95% を追加した。これは、Ar リッチ側の小幅変動によって、アーク現象が大きく変化することが予想されたからである。また、比較のため MIG 溶接用シールドガスとしては、Ar-2%O₂ および Ar-5%O₂ のボンベ詰めガスを用いた。

実験に用いたワイヤとその組成を Table 1 に示す。ワイヤ組成は、実験の目標を Ar リッチ側に決めたため、CO₂ 溶接用ワイヤよりも Si, Mn, Ti=脱酸元素の含有量が少い。小電流域では DD 50A を、大電流域では DD 50S を主として用い、両者にまたがる場合は、DD 50A を用い、これらのワイヤの直径はすべて φ1.2 のものを用いた。

溶接機は通常の CO₂ 溶接用の全自動アーク溶接機で、電流電圧を単独に変化させることのできるもの（電源は大阪変圧器製の型式 CPMG-500）を用い、溶接条件については、溶接電流は 150A ~ 350A ~ 400A と変化させ、アーク電圧はそのシールドガスに適した最適アーク電圧を選んだ。最適アーク電圧の選定基準は、ビード形状が良好となる場合——すなわち、小電流域では短絡時間率が一定値（例えば 200A では 20%）となる場合とし、大電流域では余盛りと溶込みの比が一定（1 : 1）になる場合とした。なお、小電流域の代表として 180A-18V を、大電流域の代表として 350A-34V を選んだ。

次に各特性値の測定法について以下略記する。

(1) スパッタの測定：ノズルに付着したスパッタが、シールドガスの流れを妨害し、あるいは無人

溶接の問題となっていることから、ここではノズル付着のスパッタを測定した。6t ~ 12t × 50W × 350ℓ の母材上に 30cm/min の溶接速度で 1min 間の bead on plate 溶接を行い、その時銅製の内径 φ22, 外径 φ27 の水冷タイプのノズルに付着したスパッタ量を計量、これを 5 回繰り返して平均し、1min 間当りのスパッタ・ピック・アップ量とした。

(2) アーク現象：6t ~ 12t × 50W × 350ℓ の母材へ bead on plate 溶接を行い、その時の移行形態を光学レンズ系を用いて 5 倍に拡大して観察、必要に応じて高速度撮影も行った。

(3) 短絡回数、短絡時間率：独自に開発⁸⁾したデジタル計測器を用い、アーク電圧が 5V 以下になった時を短絡とし、その回数と時間を 1sec 間毎にカウントし、アーク電圧、溶接電流とともに記録計に記録させ、数分間の平均をとった。

(4) ブロホール：12t × 50W × 350ℓ の母材に bead on plate 溶接を行い、余盛りを機械削除し、X線撮影を行った。像の分解能は φ0.1 とした。小電流域ではブロホールは発生しないので、溶接電流は大電流域の代表である 350A を選んだ。

(5) 溶着鋼の機械的性質：溶接部の機械的性質は、全溶着鋼試験法により引張試験（JIS A 1 号試験片）と、衝撃試験（JIS A 4 号試験片）とを行った。前者は室温、後者は -45℃ または必要に応じて -50 ~ 0℃ の範囲で試験を行った。

3. 実験結果

3.1 溶滴移行形態

溶滴の移行形態に及ぼすシールドガス中の Ar 混合率と溶接電流の影響を調べた結果を Fig. 2 に示す。

溶滴の移行形態間には遷移域があり、ある程度の幅をもって表示された。スプレー移行を生じさせるためには、少なくとも Ar が 70% 以上必要なのがわかる。スプレー化に必要な溶接電流（遷移電流）は Ar 混合率によって決まり、70% Ar では約 400A とかなり高いが、80% Ar では約 300A と急激に低下し、それ以上の Ar 混合率ではややゆるやかな遷移電流の低下を示した。Fig. 3 に 80% Ar での遷移電流近傍でアーク電圧が溶滴の移行形態に及ぼす影響を調べた結果を示す。スプレー化の起る電流範囲においても、アーク電圧を高

Table 1. Chemical compositions of steel electrode wires. (wt %)

	C	Si	Mn	P	S	Ti	N
DD 50A	0.07	0.70	1.31	0.015	0.017	< 0.02	0.006
DD 50S	0.04	0.49	1.28	0.009	0.012	0.05	0.006

Fig. 2. Map of each transfer region.

Fig. 3. Effects of welding current and arc voltage on spray transfer.

める(300Aならば34V以上)とグロービュラー移行へと再び変化する現象がみられ、同時にスパッタが増加した。逆に、アーク電圧を極端に下げた場合、アークが母材表面下にもぐり短絡を生じ、スパッタが増加した。つまり、スプレー化域は微小スパッタの発生はあるが、グロービュラー移行または短絡が生じた場合、スパッタは増加する。

安定したスプレー移行を生じさせるためには、図中の斜線で囲んだ範囲内に電流、電圧を設定する必要がある。一方、Ar-O₂系では30% O₂までO₂を増しても、スプレー移行がくずれず、安定なスプレー移行であった。

短絡移行は Fig. 2 に示されているように、全

Ar-CO₂ シールドガス組成で生じ、その上限電流は約250Aで、Ar 混合率の増加とともに比較的ゆるやかに低下する。

次に、短絡移行溶接での作業性のバロメータとして、短絡回数が及ぼす Ar 混合率の影響を調べた結果を Fig. 4 に示す。Ar の混合率を増加するにつれ、短絡回数が増加する現象が見られた。しかし、この効果は約80% Ar で最高になり、これ以上の Ar ガスの混合は逆にアークを不安定にし、短絡回数の低下をもたらすことがわかった。

3.2 プロホール

Fig. 5 は Ar-O₂ 系混合ガスについて、O₂ 混合率がプロホールの発生に及ぼす影響を示す。プロホール数は始端と終端を除いた長さ 25cm のビードに発生した数で表示してある。O₂ が2%の安定スプレー移行の場合、220個ときわめて多くのプロホールの発生が見られる。O₂ を増すことによりブ

Fig. 4. Influence of shielding gas on short circuit frequency.

Fig. 5. Effect of O₂ in shielding gas on porosity.

Fig. 6. Influence of shielding gas on porosity.

ロホールが減少してくる傾向が見られるが、その効果は5～10% O_2 で最大となり、それ以上に O_2 を増してもブロホールを皆無にすることはできない。

Ar- CO_2 系混合ガスを用いた場合のブロホールの発生傾向がFig. 6に示される。Ar- CO_2 系においてもArリッチの場合にはブロホールの発生が見られるが、 CO_2 量が増すとともにブロホールは減少し、 CO_2 混合率を15%以上にすればこれも皆無にできる。 CO_2 が30%以下の場合、ブロホールの発生にはアーク電圧の影響が認められ、アーク電圧が高いほどブロホールが減少する。 CO_2 がさらに多くなるとアーク電圧の影響は見られなくなる。Ar- O_2 系、Ar- CO_2 系ともにブロホールは融合線（母材と溶接金属との境界）上にあり、溶接金属の中央部分にはほとんど認められない。

なお、ブロホールの発生には、溶接ワイヤの組成の影響も認められ、Tiを少量添加することにより、ブロホールの発生傾向は低くすることができた。

3.3 溶接作業性

3.3.1 スパッタ

滴を微細化できれば、スパッタを少なくできる。そこで、各種シールドガス組成に対して、滴の大きさとスパッタの量を測定した（Fig. 7）。350Aの場合、 CO_2 リッチで生ずるグローブuler移行域では、約0.8g/minもの多量の付着が認められたが、Ar混合率が70%を越えてスプレー移行領域になると、スパッタの発生量は著しく減少し、ノ

Fig. 7. Influence of shielding gas on spatter.

ズルへの付着量も約0.08g/minと1/10に減少した。180Aでは、Arの混合率によらず短絡移行形態をとるため、350Aの場合のような急激な変化はみられなかったが、Ar混合率が増すにつれて滴が細くなるため付着量が若干減少する傾向がみられた。なお、ノズルへのスパッタの付着は、一般的には、全発生量の約 $\frac{1}{4}$ ～ $\frac{1}{3}$ であることも確かめた。

スパッタの大きさについては、Ar混合率が増加するに従って、350Aおよび180Aの両電流とともに小さくなる傾向が見られた。母材へのスパッタの付着も、ノズルへの付着と同様の減少傾向を示した。つまり、完全スプレー域では母材への付着は殆んどなく、ノズルおよび母材からのスパッタの除去性は、Ar混合率の高い側で良好である。

3.3.2 ビード外観

ビード外観に及ぼすシールドガス組成の影響をPhoto. 1に示す。80% Arでは小滴移行が起因して、ビード表面の波目が細かく整っている。また、表面の酸化の程度が低く、ビード断面は円弧の一部のような山形であった。Ar混合率が減少するに従って、ビード断面形状は三角形に近づき、また表面の凹凸が大きくなり、一部にはオーバ・ラップも見られるようになる。すなわち、Arリッチの小滴移行時程ビード外観は良好であり、表面積が小さくなる傾向がある。

水平すみ肉溶接では、Ar混合率の高いMAG溶接の方が、ビード表面が小さくならうとし、等脚長が得られやすい。同一脚長の場合、溶着鋼が少なくて済むことが判った。

Photo. 1. Bead appearance of MAG and CO₂ welding (a) Ar-20%CO₂, (b) Ar-50%CO₂, (c) Ar-25%CO₂, (d) CO₂ welding current: 180A.

Photo. 2. Comparison of shapes of cross section of horizontal fillet weld, (a) MAG welding, (b) CO₂ welding.

Fig. 8. Suitable welding condition for butt welding of thin plates (1.0t) by CO₂ and MAG welding.

代表的写真を **Photo. 2** に示す。

3.3.3 薄板溶接のし易さ

Fig. 8 にCO₂溶接とAr-20%CO₂溶接 (MAG溶接) で1.0 t 薄板の突合せ裏波溶接可能条件範囲を示す。CO₂ 溶接に比べて MAG 溶接では、溶接速度も高く、また溶接速度の変動に対する許容度も大きい。半自動の溶接の場合、溶接トーチを動かすのは溶接作業者であり、溶接速度の変動が大きいことが想像される。この変動に対し、図に示したように MAG 溶接は許容範囲が広いが、CO₂ 溶接は狭い。

3.4 MAG 溶接部の機械的性質

3.4.1 ガス組成と冶金反応

シールドガス中の CO₂ は、アーク近傍では下式 (1) の右へと解離し、CO₂ 混合率が増加すると酸素濃度が増す。従って、熔融金属中の Si, Mn 等の酸化されやすい元素は酸化消耗する。

Fig. 9 に350Aでの種々のシールドガスにおける Si, Mn の移行率 (溶接時におけるワイヤ中元素の残留率) を示す。Si, Mn 共に Ar 混合率が増加するに従って移行率は高くなり、Ar-20%CO₂ では CO₂ 溶接に比べて Si, Mn 移行率は共に15% 向上している。また、同図上方に Ar-20%CO₂ 系と純 CO₂ の場合の各元素の移行率表を添付した。

Fig. 9. Influence of shielding gas on transfer efficiency of Si and Mn. Table shows transfer efficiency of each element by Ar-20%CO₂ and CO₂ welding.

Fig. 10. Influence of shielding gas on oxygen pick up to weld metal.

これによると、Cはシールドガスからの浸炭が認められ、Ar-20%CO₂系ではその平衡値は0.08%前後であり、CO₂では0.09~0.12%であった⁹⁾。TiはSi、Mnに比べて著しく酸化消耗し、N、P、Sは無反応の傾向が見られる。

また、溶着鋼の酸素量は、Fig. 10のようにCO₂混合率が増加するに従って、直線的に増加し、350Aと180Aの場合では大きな差は見られなかった。

3.4.2 ガス成分と機械的性質

シールドガス組成を変えた場合の溶着鋼の引張強さ、伸びをFig. 11に示す。Ar混合率が増加するに従って、引張強さは増加し伸びは減少する。

Fig. 11. Influence of shielding gas on ultimate tensile strength and elongation of weld metal.

Fig. 12. Influence of shielding gas on weld metal impact properties at -45°C.

一方、-45°Cでの2mmVノッチCharpy衝撃試験の結果をFig. 12に示す。Ar混合率を増加させると衝撃値は向上する傾向が認められる。

3.4.3 溶着鋼の組成と機械的性質

溶着鋼の機械的性質、特に衝撃値に及ぼす合金元素の影響を調べた結果、影響の大きかったものはO、N、Sであった。O、N、Sが増加すると衝撃値はいずれも低下した。OについてはFig. 12、NについてはFig. 13、SについてはFig. 14に示す。なお、これらの元素含有量の変化は、Oはシールドガス中のCO₂量変化、NはAr-20%CO₂混合ガスにN₂量を0.25~1%添加することにより、またSについてはワイヤ中の含有量を変

Fig. 13. Influence of N content in weld metal on impact properties at -45°C .

Fig. 14. Influence of S content in weld metal on impact properties at -45°C .

化させることにより得た。

Ar-20%CO₂ シールドガスを用いた場合その他の元素の衝撃値への影響をワイヤ中の含有量であらわすと、Si は0.5~1.20%の範囲で含有量は少ない程良く、Mn は0.95~1.70%の範囲で影響は認められなかった。Ti は衝撃値を向上するが、0.1%以上添加した場合、ばらつきを大きくする傾向があった。

4. 考 察

MAG 溶接で得られる諸長所は主にそのアーク現象に起因する滴の細かさによると考えられる。MAG 溶接においてスプレー化現象が得られ滴が細くなる理由については種々説明されているが^{(10)~(12)}、主にアーク雰囲気下のシールドガスの電気伝導度と熱伝導度によると考えられる。Ar ガス

の場合、電気伝導が良く、熱伝導が悪いため、Fig. 1 (c)のようにアークが広がり、ピンチ力が溶滴を離出するように作用するため、スプレー移行となる。CO₂ ガスの場合、熱伝導が良く電気伝導が悪いため、アークがしぼられ Fig. 1 (b)のようにアークは溶滴の下部に集中し、ピンチ力は溶滴の離出を妨げる方向に作用し、このため溶滴は成長して大きくなり、グロービュラー移行となる。グロービュラーになると、溶滴の跳ねかえりが多く、さらに滴自身溶融池内に移行せず、溶融池以外に移行するものが増す。これもスパッタとなる。これに対し、スプレー移行では跳ねかえりがなく、溶滴が確実に溶融池内に移行するため、極めてスパッタが少ない。

Ar と CO₂ との混合ガスの場合、その混合率によってスプレー、グロービュラー移行またはその中間段階となる。300 A 以上の大電流溶接を行う場合、Ar 混合率が70~80%以上でスプレー移行となる。従って、スパッタも著しく減少する。

Fig. 3 でのアーク電圧を上げた場合の異常は、アーク長が大きくなったためアークがそれ自身収縮しようとし、細くなりアーク点が溶滴下に集中したものと思われる。現象的にはグロービュラー移行に変化したものと思われる。

一方、プロホールの発生は、完全スプレー化現象に関係していると推測される。Fig. 2, 3 と 6 を比較してみると、スプレー移行域とプロホールの発生域は傾向としてよい一致を示す。プロホールは Ar リッチのスプレー安定域に多発している。また、スプレーの安定な Ar-O₂ 系は溶滴が極めて小さい完全なスプレー移行でありプロホールも多発した。また Ar-CO₂ 系では CO₂ 含有量が増加する程、溶滴は大きくなって来て、グロービュラー移行に近づき、15%以上でプロホールの発生はなくなる。すなわち、完全スプレーから遠ざかる程、プロホールの発生は減少する。

Ar-CO₂ 系でのスパッタの減少(75% Ar 以上)とプロホールの減少(85% Ar 以下)とは組成的には相反する関係にあるが、その両者に属する80% Ar 近傍は溶滴がやや大きく、かつ、スプレーの領域でスパッタは少なくプロホールの発生もなくなる、いわゆる境界領域であり、MAG 溶接の特長を最大限に発揮できる領域である。

溶着鋼の靱性を考えてみると、含 Ti, 低 O, N,

Sでかつ、Si が0.35%位が良好であった。これをもとに各元素の移行率を考慮に入れ、更に、ワイヤの含 Ti, 低 Si 化によって、プロホールの減少もみられることから、スプレー移行用 MAG 溶接用ワイヤとしては、Table 1 に示した DD50 S が最良と考えた。このワイヤはその溶着鋼の低温特性が良好で、プロホールが発生しない。

一方、短絡移行溶接作業性を重視すると、高 Si, 無 Ti ワイヤが良好と解され、MAG 溶接用ワイヤ DD50 A も開発した。このワイヤでは極めて美しいビードが得られ、作業性も良好であった。

5. ま と め

MAG 溶接において、シールドガス組成がアーク現象や溶接部の諸特性に及ぼす影響について調査した結果、次のことがわかった。

- (1) 溶滴の移行形態はシールドガス組成によって決まり、スプレー移行は Ar が70%以上の場合生ずる。
- (2) スパッタは、スプレー移行化によって急激に減少する (75% Ar 以上で、グロービュラーの約 1/10)。
- (3) プロホールは、スプレー移行の安定化によって急激に増加する (85% Ar 以上で多発)。
- (4) スパッタが少なく、プロホールの出ない溶接は、Ar-20%CO₂ 近傍の混合ガスと含 Ti, 低 Si ワイヤを用いることによって得られる。
- (5) ビード外観、薄板溶接性は、Ar が80~90%まで増加することにより良好になる。90%を越えるとアークは不安定となり、溶接にはあまり適さない。
- (6) MAG 溶接に DD50 S を用いると、低 O, N, S で、かつ、微量 Ti の溶着鋼が得られ、衝撃特性が良好であった。

おわりに本研究の遂行に当り、ご協力をいただいた大同特殊鋼㈱および岩谷産業㈱の関係各位に心から謝意を表します。

(文 献)

- 1) A.P.Elicratov : Svarochnoe Proizvodstvo, (1973) 6, 19 (ソ連)
- 2) H. U. Pomaska : Der Praktiker (1973) 9, 138
- 3) H. U. Pomaska : Australian Welding Journal (1976) 7, 29
- 4) H. U. Pomaska : IIW-1976-MTC-16-2
- 5) W. E. W. Ruckdeschel : IIW Doc. XII-B-174-74
- 6) P. Scheibner : Z I S-Mitteilungen (1976) 6, 546
- 7) K. Schöbel : Schweisstechnik, 31 (1977) 3, 35
- 8) 洞田, 宇津野, 潮, 雪吹 : 実願昭54-24904
- 9) A. A. Smith, G. R. Slater : British Welding Journal 11 (1964), 222
- 10) U. Diltthey : Schwei ß en und Schneiden, 26 (1974), 7, 254
- 11) R. T. Breymeier : Welding Journal, 31 (1952), 393S
- 12) A. Lesnewich : Welding Journal, 37 (1958), 343S