構造用 Al-Zn-Mg 系合金の研究

馬場 義雄* 杉山 禎彦*

Study of structural alloys belonging to the Al-Zn-Mg system

(UDC 669.715'5721-12)

BABA Yoshio* SUGIYAMA Yoshihiko*

Experiments were carried out to study the welding crack sensitivity, strength and resistance to stress corrosion cracking of Al-Zn-Mg system containing 4~8% Zn, 0.6~3.0 % Mg and a small amount of Cr or Zr when welded with three kinds of filler metals (Al-5% Zn-2% Mg-2% Si-0.1 % Ti, 5056 and same alloy).

The findings are as follows:

- (1) Among the three, the products welded by a filler metal of 5056 alloy show the minimum tendency of zone cracking affected by welding heat. Regardless of the filler metals, the welding cracks increase in inverse proportion to the decrease of Mg content in the parent metals, but are not influenced by Zn content in the above mentioned range. Welds of Al-Zn-Mg alloy in the range of higher content of Zn and Mg are apt to crack by a bending test.
- (2) All of the welded products can make almost the maximum recovery of strength in 90 days of the natural aging after welding. The recovery of strength of the products welded by the filler metal of Al-Zn-Mg-Si-Ti alloy is, it is true, generally inferior but that of those welded by the same alloy is most excellent of the three filler metals, except the parent metals containing 0.6%Mg. The maximum recovery of the tensile strength of welds to the parent metals is 85% for Al-4.5~6%Zn-1.2%Mg base alloy and 80% for Al-4.5~6% Zn-1.8%Mg base alloy, and then the tensile strength of the welds is 35~40 kg/mm².
- (3) The resistance to stress corrosion cracking of the welds in the alloy containing both 0.17%Cr and 0.10%Zr is rather superior to that of 0.2% Cr alone. There is no fear to see any stress corrosion cracking occur in the alloy containing 4~4.5%Zn and 0.6~1.2Mg, but otherwise in Al-5~6%Zn-1.2~1.8%Mg alloy even though containing both Cr and Zr, if under a severe condition. It seems that the resistance to the stress corrosion cracking of the welds is inferior to that of the parent metals. Therefore, more thorough investigation is greatly required.

(Received Aug. 3, 1964)

1. 緒 言

Al-Zn-Mg 系合金はすぐれた強度とかなりの耐食性を有するので、従来からも多く使用されてきたが、一般に溶接性が劣るために Al-Mg 系の非熱処理合金による溶接構造化が普及しているわりに、この種合金の溶接構造化材としての利用は少ない。最近、欧州方面で Al-Zn-Mg 系合金が溶接後室温放置で著しく強度が回復するのに着目して、車輛、橋梁など大型の構築物に利用して、かなり成功しているとの P.Brenner¹⁾ による報告があり、これを機会に溶接構造化材として注目されるようになり、米国、カナダでも Reynolds×7002, Kaiser×7039, Alcan 74S などの合金として試作研究されている。従来の構造用 Al-Zn-Mg 系合金に関する研究としては、H.Hug²⁾

の熱処理、時効に関する詳細な報告、その他溶接割れ感受性³⁾⁴⁾および溶加材⁵⁾⁶⁾などの研究報告がある。著者達は、Al-Zn-Mg 系合金の高力合金としての特性を失わずにしかも溶接性のすぐれた材料の開発を目的として、まず本研究では、亜鉛 4 ~ 8 %, マグネシウム 0.6 ~ 3.0 % および微量の Cr 〇 Zr を含有した Al-Zn-Mg 系合金について、溶接割れ感受性、母材および溶接材の時効硬化性、強度回復ならびに耐応力腐食割れ性などを調査した。

2. 実験方法

2.1 試 料

99.5%純度の Al 地金に Zn 4.0, 4.5, 5.0, 6.0 および 8.0% と Mg 0.6, 1.2, 1.8 および 3.0% を同時に添加

* 住友軽金属工業株式会社研究部

Research Members of Sumitomo Light Metal Industries, Ltd., Tech.Dept.

Table 1 Chemical composition of test specimens.

Number of samples	Chemical compositions %								
	Zn	Mg	Cr	Zr	Fe	Si	Cu	Mn	Ti
1	4.15	0.55	0.19	—	0.29	0.13	0.02	0.01	0.01
2	4.52	0.56	0.20	—	0.30	0.14	0.02	0.01	0.01
3	5.16	0.59	0.21	—	0.27	0.13	0.02	0.02	0.01
4	6.21	0.57	0.19	—	0.30	0.15	0.03	0.02	0.01
5	8.22	0.55	0.20	—	0.29	0.15	0.03	0.02	0.01
6	4.03	1.19	0.19	—	0.28	0.13	0.01	0.01	0.01
7	4.51	1.21	0.20	—	0.29	0.12	0.01	0.01	0.01
8	5.29	1.20	0.20	—	0.30	0.14	0.02	0.01	0.01
9	6.10	1.19	0.20	—	0.29	0.14	0.02	0.01	0.01
10	8.12	1.19	0.19	—	0.29	0.14	0.02	0.01	0.01
11	4.14	1.78	0.21	—	0.28	0.12	0.02	0.01	0.01
12	4.52	1.81	0.20	—	0.29	0.12	0.02	0.01	0.01
13	5.28	1.79	0.20	—	0.29	0.13	0.02	0.02	0.01
14	6.21	1.81	0.20	—	0.29	0.15	0.03	0.02	0.01
15	8.45	1.82	0.12	—	0.29	0.15	0.02	0.02	0.01
16	4.25	3.08	0.20	—	0.28	0.14	0.01	0.01	0.01
17	4.60	3.08	0.20	—	0.28	0.14	0.02	0.02	0.01
18	5.25	3.04	0.19	—	0.30	0.14	0.02	0.01	0.01
19	5.93	2.94	0.20	—	0.29	0.16	0.02	0.02	0.01
20	8.44	3.09	0.21	—	0.29	0.15	0.02	0.01	0.01
21	4.02	0.55	0.15	0.11	0.27	0.13	0.02	0.01	0.01
22	4.48	0.59	0.16	0.11	0.28	0.14	0.02	0.01	0.01
23	5.00	0.55	0.16	0.09	0.29	0.13	0.03	0.01	0.01
24	6.09	0.56	0.15	0.11	0.29	0.15	0.03	0.01	0.01
25	7.88	0.62	0.17	0.10	0.30	0.15	0.03	0.01	0.01
26	4.15	1.29	0.15	0.11	0.30	0.13	0.02	0.01	0.01
27	4.45	1.27	0.16	0.11	0.30	0.13	0.02	0.01	0.01
28	4.94	1.19	0.17	0.11	0.29	0.13	0.02	0.01	0.01
29	6.24	1.27	0.16	0.10	0.29	0.14	0.02	0.01	0.01
30	8.14	1.26	0.17	0.10	0.29	0.14	0.02	0.01	0.01
31	4.15	1.86	0.17	0.11	0.28	0.12	0.01	0.01	0.01
32	4.57	1.90	0.16	0.11	0.29	0.12	0.02	0.01	0.01
33	5.03	1.83	0.15	0.11	0.29	0.13	0.02	0.02	0.01
34	6.00	1.90	0.17	0.11	0.28	0.15	0.02	0.02	0.01
35	7.94	1.90	0.17	0.10	0.30	0.15	0.02	0.02	0.01
36	4.18	3.08	0.18	0.10	0.28	0.13	0.02	0.01	0.01
37	4.53	2.94	0.16	0.11	0.28	0.15	0.02	0.01	0.01
38	5.09	3.12	0.16	0.11	0.29	0.14	0.03	0.01	0.01
39	5.92	3.14	0.17	0.10	0.30	0.16	0.02	0.02	0.01
40	8.30	3.12	0.18	0.11	0.29	0.15	0.03	0.02	0.01

Table 2 Melting and casting conditions of ingots.

Melting temperature (°C)	Chlorination temperature (°C)	Casting temperature (°C)	Dimension of mold (mm)	Temperature of mold (°C)
760	730	720	30×180×180	100

Table 3 Chemical composition of filler wires.

Alloys	Chemical composition %								
	Zn	Mg	Cr	Zr	Fe	Si	Cu	Mn	Ti
Al-Zn-Mg-Si-Ti	5.23	2.06	0.01	—	0.29	2.09	0.03	0.02	0.12
5056	0.03	5.00	0.10	—	0.22	0.13	0.04	0.11	0.01

Fig. 1 Dimension of test piece for fish-bone crack tests in Al-Zn-Mg alloy sheet (2mm thickness).

し、さらに応力腐食割れ防止元素として、Cr 0.2%添加したものならびに Cr0.17%と Zr0.10%を同時に添加した合金、計40種類の3kg板用鋳塊を作成した。Cr0.17%とZr0.10%の添加はこの種合金鋳塊に発生するCr系巨大化合物を防止し、しかも耐応力腐食割れ性改良に著しい効果を有することが著者の1人の研究⁷⁾により確かめられている。各合金の成分および鑄造条件を **Table 1** および **Table 2** に示した。鋳塊表面を皮剥き後、420℃で6mmまで熱間圧延を行ない、焼鈍後冷間圧延により2mm厚板に製作した。溶接に用いる溶加材としては、一般的な5056合金および溶接割れを防止するためにSiを添加したAl-Zn-Mg-Si-Ti合金⁵⁾の直径3mmの線および各合金板から切出した断面2×2.5mmの共金条を使用した。5056およびAl-Zn-Mg-Si-Ti合金の化学成分を **Table 3** に示した。

2.2 熱処理

代表的にAl-4.5%Zn-1.2%MgおよびAl-6.0%Zn-1.8%Mg系合金について、時効過程を調査し、溶接母材の熱処理としては、すべて硝石炉中で465℃×3hrsの溶体化処理後7日間常温に放置し、しかる後空気炉中で120℃×48hrsの焼戻しを行なった。溶接後の熱処理としては、30、90および180日間の常温時効あるいは溶接直後および7日間常温時効後120℃×24hrsの焼戻し処理

である。

2.3 溶接

2mm厚板の突合せ溶接は、全材質について各4組TIGで行ない、溶加材は共金を含めて上記の3種類で、溶接条件は、溶接電流150Amp. ルート間隔0~1mmアルゴン流量10l/min, 溶接速度12~16cm/minである。溶接後、溶接割れ長さおよびX線透過による欠陥の有無を調査した。X線透過試験は、溶接長手方向に中心、両端各50mmについて行ない3ヶ所の平均値を結果とした溶接ビード除去、成形後、溶接部の曲げ試験(曲げ半径6.25t, 12.5t)ならびに機械的性質、応力腐食割れ性を調査した。また、これらと併行して、**Fig. 1**に示した試験片を用いてFish-bone割れ試験⁴⁾により溶接部の割れの発生程度と母材および溶加材成分との関係を調べた。

2.4 腐食試験

溶接後曲げ半径12.5tで曲げた試料を3%食塩水中に浸漬し、100日間の応力腐食試験を行なった。一部の試料については耐力の75%の引張応力をかけて腐食試験を行なった。なお一般腐食試験としては50℃の水道水中で3日間および住友軽金属構内で1ヶ年間の大気腐食試験を行なった。

3. 実験結果

3.1 母材の機械的性質

Fig.2はAl-4.5%Zn-1.2%Mg系合金の時効硬化曲線である。Cr 0.2%およびCr 0.17%とZr0.10%を含有した合金とともに、465℃から水冷後直ちに120℃で高温時効したものよりも、水冷後7日間常温に放置し、しかる後高温時効した方が強度がすぐれている。**Fig. 3**はAl-6.0%Zn-1.8%Mg系合金の時効硬化曲線である。この場合、常温放置の影響(いわゆるSplit agingの効果)は認められない。120℃では48~96hrsの時効でほぼ最高の強度に近ざいたものと思われる。**Fig.4**はAl-4.5%Zn-1.2%MgおよびAl-6.0%Zn-1.8%Mg系合金の硬度測定による120℃の時効硬化曲線である。前者は明らかに

Fig. 2 Aging curves for Al-4.5%Zn-1.2%Mg alloys, solution-treated at 465°C, water quenched and then immediately (○, △) or after exposure for 7 days at room temperature (●, ▲).

Split aging の効果が認められるが、後者は時効時間が48 hrs 以上になるとこの効果が認められなくなる。**Fig.5**は Zn および Mg 含有量の異なった40種類の合金板を 465 °C で溶体化処理後120°Cで48hrs高温時効を行なった場合の引張試験結果である。Cr 0.2% および Cr0.17%と Zr 0.10%を含有した各種合金間にはほとんど機械的性質の差は認められない。

3.2 溶接割れ感受性

Fig. 6 は各種合金板各4組を3種類の溶加材で溶接したさいの肉眼的割れ発生状態とその平均長さを測定した結果である。溶加材に Al-Zn-Mg-Si-Ti 合金および5056合金を使用したものは高 (Zn+Mg) 域に割れが発生している。一方共金で溶接したものは前二者の溶加材に比して割れ発生の傾向が大きく、Mg 0.6%含有のすべての合金およびZn8.0%含有のすべての合金に割れが発生している。溶接割れに対する Zr の影響はほとんど認められない。**Fig. 7** はX線透過による溶接部のピンホールなど

の欠陥発生状態の調査結果である。結果は JIS (Japanese Industrial Standard 日本工業規格) による判定基準を採用している。これによると全般に Zr を添加した方が欠陥が少ないようである。**Fig. 8** は溶接材を常温で3日間放置後に曲げ試験した結果である。いずれも高 Zn, 高 Mg 域で顕著な割れ発生傾向が認められる。**Fig. 9** は、Fish-bone 割れ試験による各種溶接材の割れ程度を比較した結果である。これによると溶加材3種類のうちではいずれの母材に対しても5056を使用した場合にもつとも割れの発生が少なく、またいずれの溶加材を用いてもMg 含有量の多い程割れの発生は少なくなる傾向がある。ただ母材にZrを含有したものはMg3.0%で端割れの傾向が強い。Znの含有量は4~8%間では母材中のZrの有無にかかわらず割れに対してほとんど影響しない。

3.3 溶接後の機械的性質

Fig.10 Fig.11 および **Fig.12** は溶加材に Al-Zn-Mg-Si-Ti 合金、共金および5056合金を用いて溶接した Al-

Fig. 3 Aging curves for Al-6.0%Zn-1.8%Mg alloys, solution-treated at 465°C, water quenched and then immediately (○, △) or after exposure for 7 days at room temperature (●, ▲).

4.5%Zn-1.2%Mg 系合金とAl-6.0%Zn-1.2%Mg 系合金の溶接後の時効と機械的性質の関係である。いずれの材料も溶接後90日間の常温時効で引張強さの回復はほぼ最高の域に達するが、溶加材により回復速度に若干の差がみられる。溶接後120°Cの高温時効を行なったものは、常温時効のままのものに比べて総体的に強度が劣っているが、溶加材に共金および5056合金を使用したAl-6.0%Zn-1.8%Mg 系合金の耐力のみ著しい回復を示している。溶接による伸びの低下は顕著であり、溶接後の常温時効および高温時効によってもほとんど回復しない。3種の溶加材ではAl-Zn-Mg-Si-Ti 合金使用のさいの低下がもつとも大きい。Al-4.5%Zn-1.2%Mg 系合金よりもAl-6.0%Zn-1.8%Mg 系合金の方が伸びの低下が大きい、例外として共金で溶接したAl-6.0%Zn-1.8%Mg 系合金のみ、溶接後90日および180日の常温時効でかなりの回復を示している。**Fig.13~Fig.14** はAl-4.5

Zn-1.2%Mg 系合金およびAl-6.0%Zn-1.8%Mg 系合金の溶接部のビッカース硬さ測定結果である。溶接熱影響部はいずれの溶加材使用の場合も中心両側各25mm程度である。Al-4.5%Zn-1.2%Mg 系合金は90~180日の常温時効で溶接部の硬さは、ほぼ元の母材の硬さにまで回復しているが、120°Cの高温時効による回復率は低い。一方Al-6.0%Zn-1.8%Mg 系合金の高温時効による回復はよく、特に溶加材に5056合金を使用した場合溶接部中心を除いて特に高い回復率を示している。溶加材に共金を使用したものは、溶接部全般にわたって硬さのパラツキは少なく、いずれの場合も180日の常温時効ではほぼ元の母材の硬さにまで回復しているが、Al-6.0%Zn-1.8%Mg 系合金はAl-4.5%Zn-1.2%Mg 系合金に比して若干回復率が劣っている。なお溶接部の硬さの分布ならびに回復状況はCr0.2%のみおよびCr0.17%とZr0.10%を含有したものの中には差が認められない。

Fig. 4 Hardness aging curves for Al-4.5%Zn-1.2%Mg and Al-6.0%Zn-1.8%Mg alloys, solution-treated at 465°C, water quenched and then immediately (○, △) or after exposure for 7 days at room temperature (●, ▲).

Fig.15~Fig.18 は母材引張強さに対する溶接材引張強さの最高の回復率と Zn, Mg 含有量および溶加材の関係である。Mg 含有量 0.6%材 (**Fig.15**) では Zn 6%までは Zn 含有量が増加するにつれ急激に回復率が減少するが、溶加材に Al-Zn-Mg-Si-Ti および 5056 合金を使用した Zn 4~4.5%含有試料は約100%以上の回復率を示している。Mg 含有量 1.2%材 (**Fig. 16**) および Mg 含有量 1.8%材 (**Fig.17**) は溶加材に共金を使用した場合の回復率が最も高く、Zn 6%が以下では 85~80%の回復率を示している。溶加材に 5056 合金を使用した場合の回復率は共金使用の場合より低く、溶加材に Al-Zn-Mg-Si-Ti 合金使用の場合の低下はさらに大きい。これら回復率の差は Zn 含有量が 6%以上で著しく現われている。Mg 含有量 3.0%材 (**Fig. 18**) の強度回復率はいずれも 80%以下であり、Zn 8%含有試料の低下が特に顕著である。Mg 3.0%含有試料では Cr0.2%添加のみのものよりも Cr0.17%と Zr 0.10%を添加した方が若干回復率のすぐれた傾向を示している。**Fig.19** には Mg1.2%含有した Al-Zn-Mg

系合金の母材、共金溶接の直後および最高強度を示した。溶接後の最高引張強さは Zn4.5%で約30kg/mm², Zn5.0%で約35kg/mm²である。**Fig.20** には Mg1.8%含有した Al-Zn-Mg 系合金の母材、共金溶接の直後および最高強度を示した。溶接後の最高引張強さは Zn4.5%で約37kg/mm², Zn5.0%で約40kg/mm²である。

3.4 耐食性

Fig.21~Fig.23 は溶加材に Al-Zn-Mg-Si-Ti 合金、共金および 5056 合金を使用して溶接した各種金属溶接材の曲げによる応力腐食試験結果 (100 日間) である。Cr 0.2%のみ添加したものは Zn+Mg<6%の範囲内では応力腐食割れは認められない。例外として 5056 合金溶加材で溶接した Al-4.0%Zn-1.8% Mg 合金に一部応力腐食割れが認められたが、これは後述のごとく、溶加材による溶接部の Mg 含有量の著しい増大によるものと考えられる。Cr 0.17%と Zr0.10%の添加材は Cr0.2%添加材に比して若干耐応力腐食割れ性のすぐれている傾向を有しており、溶加材の如何にかかわらず Zn+Mg<6%

Fig. 5 Effects of zinc and magnesium contents on the tensile properties of the Al-Zn-Mg alloys containing 0.2% Cr or 0.17% Cr, 0.10%Zr, precipitated at 120°C for 48 hrs after solution heat treatment at 465°C.

Upper figure: Proof stress, kg/mm²

Middle figure: Tensile strength, kg/mm²

Lower figure: Elongation, %

Fig. 6 Welding crack and it's average length (mm) of welds of Al-Zn-Mg alloy welded with various filler wire

Fig. 7 Weld defects in Al-Zn-Mg alloy welded with various filler wire by X-ray investigation. The figure are shown in a grade of JIS (Japanese Industrial Standard)

Grade of JIS	1	2	3	4	5	6
Number of defects in 10 × 50mm	0	<2	<4	<8	<12	>12

Fig. 8 Bending test of welds of Al-Zn-Mg alloy welded with various filler wire.

○ (no crack) ● (crack) : Bending radius $r=12.5 t$, 180°

△ (no crack) ▲ (crack) : Bending radius $r=6.25 t$, 180°

Fig. 9 Results of the fish-bone crack tests in Al-Zn-Mg alloy welded with various filler wire.

の範囲および Al-6.0%Zn-0.6%Mg 合金では応力腐食割れは認められない。Photo.1 および Photo.2 は Al-4.5% Zn-1.2% Mg 系合金および Al-6.0% Zn-1.8%Mg 系合金の工場地帯における大気腐食試験後の外観状況である。12ヶ月後の最大ピット深さは無添加材は 0.04～0.06mm, Cr 添加材は 0.02～0.04mm, Cr と Zr 添加材は 0.02～0.03 mm で Al-6.0% Zn-1.8% Mg 系合金の方が少し深い傾向にあるが、いずれも強度の低下は認められない。また焼入焼戻し処理 (T6) および焼鈍処理 (O) による腐食程度の差ははっきりと認められ

ないが、一方 Photo. 3 に示した50℃水道水中における簡易腐食試験の結果では溶接中心部よりもむしろ熱影響部の腐食が著しい傾向が認められる。いずれにしても本系合金の一般の耐食性は 6061 程度と考えられ、Cr と Zr の微量添加によりかなり改善される。Photo. 4 および Photo.5 は Al-6.0%Zn-1.8%Mg 合金の共金添加材による溶接部の肉眼組織および顕微鏡組織である。Cr 0.17%と Zr0.10%の添加材は Cr0.2%添加材に比して肉眼組織は微細であるが顕微鏡組織はこの両者にほとんど差は認められない。Photo. 6 は Al-6.0%Zn-1.8%

Fig.10 Effect of aging on the tensile properties of welds of Al-4.5Zn-1.2Mg and Al-6.0Zn-1.8Mg alloy welded with filler wire of Al-Zn-Mg-Si-Ti alloy.
P.M.: Parent material A.A.: Artificial aging at 120°C for 24 hr after natural aging

Fig.11 Effect of aging on the tensile properties of welds of Al-4.5Zn-1.2Mg and Al-6.0Zn-1.8Mg alloy welded with filler wire of same alloy.
P.M.: Parent material A.A.: Artificial aging at 120°C for 24 hr after natural aging

Fig.12 Effect of aging on the tensile properties of welds of Al-4.5Zn-1.2Mg and Al-6.0Zn-1.8Mg alloy welded with filler wire of 5056 alloy.
P.M.: Parent material A.A.: Artificial aging at 120°C for 24 hr after natural aging.

None	Cr 0.2%	Cr 0.17% Zr 0.10%	None	Cr 0.2%	Cr 0.17% Zr 0.10%
------	---------	----------------------	------	---------	----------------------

Photo. 1 General appearance of Al-4.5% Zn-1.2% Mg alloy after exposure at an industrial region.

Photo. 2 General appearance of Al-6.0% Zn-1.8% Mg alloy after exposure at an industrial region.

Photo. 3 General corrosion of welds in Al-6.0% Zn-1.8% Mg alloy welded with the filler wire of same alloy. Dipped into 50°C tap water for 3 days.

Cr 0.2%

Cr 0.17%+Zr 0.10%

Photo. 4 Macro structures of welds in Al-6.0% Zn-1.8% Mg alloy welded with the filler wire of same alloy. ($\times 20$)

Cr 0.2%

Cr 0.17%+Zr 0.10%

Photo. 5 Micro structures of weld in Al-6.0% Zn-1.8% Mg alloy welded with the filler wire of same alloy. ($\times 100$)

Photo. 6 Stress-corrosion cracking of welds in Al-6.0% Zn-1.8% Mg-0.2% Cr alloy. ($100\times$)

Mg-0.2%Cr 合金の応力腐食割れ部の組織である。割れは溶接部境界で結晶粒界に沿って発生進行している。

4. 考 察

溶接割れ感受性については、W.Patterson, S.Eagler の Al-Zn-Mg 3 元合金の熱間割れに関する輪状金型試験³⁾があり、これによると Zn 7 %前後、Mg 0.5~1 %含有量の範囲で最も割れ傾向が大きく、Znの減少、Mgの増加に従って割れ傾向が小さくなっている。われわれの溶接試験結果でも溶加材に共金を使用した場合、Mg 0.6% および Zn 8.0% のものにのみ割れが発生しており、かなり類似した結果を示している。溶加材に Al-Zn-Mg-Si-Ti および 5056 合金を使用した場合は **Table 4** に示したごとく、溶接部の Zn, Mg 含有量が母材のそれと異なり従って溶接割れの傾向も共金の場合と全然異なっている。しかし Fish-bone 割れ試験では共金以外の溶加材を用いた場合もやはり Mg 含有量増加に従って割れ発生の傾向が少なく現われており、結局、溶接割れ感受性の面からは Mg 1 %以下では好ましくない。一方 Mg 3 %以

Fig.13 Distribution of hardness for welds of Al-4.5Zn-1.2Mg-Cr alloy.

- As-welded
- 30 days after welding
- △—△ 90 days after welding
- ▲—▲ 180 days after welding
- ×—× Artificial aging at 120°C for 24 hr after welding
- — — Parent material

Fig.14 Distribution of hardness for welds of Al-6.0Zn-1.8Mg-Cr-Zr alloy.

- — ○ As-welded
- — ● 30 days after welding
- △ — △ 90 days after welding
- ▲ — ▲ 180 days after welding
- × — × Artificial aging at 120°C for 24 hr after welding
- — — Parent material

Fig.15 Maximum recovery of the tensile strength of welds in Al-Zn-Mg alloy containing 0.6% magnesium.

Fig.16 Maximum recovery of the tensile strength of welds in Al-Zn-Mg alloy containing 1.2% magnesium.

Fig.17 Maximum recovery of the tensile strength of welds in Al-Zn-Mg alloy containing 1.8% magnesium.

Fig.18 Maximum recovery of the tensile strength of welds in Al-Zn-Mg alloy containing 3.0% magnesium.

Fig.19 Tensile strength of welds in Al-Zn-Mg alloy containing 1.2% magnesium. Welded with filler wire of same alloy.

Fig.20 Tensile strength of welds in Al-Zn-Mg alloy containing 1.8% magnesium. Welded with filler wire of same alloy.

Fig.21 Stress corrosion cracking test of the welds in Al-Zn-Mg alloy welded with filler wire of Al-Zn-Mg-Si-Ti alloy.

Test specimens (2 mm t) were dipped in 3% brine water for 100 days with the bending radius of 12.5 t.

Fig.22 Stress corrosion cracking test of the welds in Al-Zn-Mg alloy welded with filler wire of same alloy.

Test specimens (2 mm t) were dipped in 3% brine water for 100 days with the bending radius of 12.5t.

上では溶接部の曲げ性および耐応力腐食割れ性の点から好ましくないとされる。次に耐応力腐食割れ性を改良するために添加する Cr などは焼入性を悪くする (Cr, Mn などを含む Al-Zn-Mg 系合金は溶体化処理後の焼入速度が遅い場合、時効硬化能力が減退する) といわれており⁸⁾、従つてこれが溶接後の強度回復に影響することが考えられる。たとえば Al-4.5% Zn-1.2% Mg 合金は 465℃水焼入後 120℃ で48 hrs 焼戻しすれば耐力

30.0 kg/mm²、引張強さ 35.3 kg/mm² であるが、30分間かけて 150℃ まで炉冷し、その後水冷、そして直ちに焼戻し処理したものは耐力26.6kg/mm²、引張強さ33.5kg/mm² の強度を有する。すなわち465℃水焼入材に比して耐力、引張強さそれぞれ89%、95%を示している。一方これに Cr0.2%添加したものは上記30分間炉冷材は耐力 22.8kg/mm² (75%)、引張強さ30.5kg/mm² (86%) と水焼入材に比して一層強度低下が著しくなる。また **Fig.24**

Fig.23 Stress corrosion cracking test of the welds in Al-Zn-Mg alloy welded with filler wire of 5056 alloy. Test specimens (2 mm) were dipped in 3% brine water for 100 days with the bending radius of 12.5 t.

Table 4 Chemical composition of parent material and welded region of Al-Zn-Mg alloy welded with various filler wire.

Number of samples	Parent material		Welded region					
			AlZnMgSiTi filler		Same alloy filler		5056 filler	
	Zn %	Mg %	Zn %	Mg %	Zn %	Mg %	Zn %	Mg %
2	4.52	0.56	4.45	1.16	—	—	2.65	2.19
4	6.21	0.57	5.47	1.18	—	—	3.43	2.16
7	4.51	1.21	4.40	1.12	4.38	1.11	2.83	2.28
9	6.10	1.19	5.34	1.16	—	—	3.53	2.27
12	4.52	1.81	4.57	1.72	—	—	2.96	2.73
14	6.21	1.81	5.07	1.72	5.95	1.77	3.63	2.99
17	4.60	3.08	4.48	2.54	—	—	2.80	3.98
19	5.93	2.94	5.04	2.50	—	—	3.45	3.94
27	4.45	1.27	4.58	1.45	4.43	1.18	2.77	2.63
34	6.00	1.90	5.27	2.63	5.72	1.81	3.88	2.73

は16φ×100/mm 試片のジョミニーテストによるAl-4.5 %Zn-1.2%Mg, Al-6.0%Zn-1.2%Mg および Al-6.0 %Zn-1.8%Mg 合金の焼入性に対する Cr および Zr 添加の影響である。Cr0.2%およびCr0.17%とZr0.10%の添加が Zn および Mg 含有量に応じて Al-Zn-Mg 系合金の焼入性に悪影響を与え、これがまた溶接部の強度および硬さの回復低下率に対してある程度比例的関係を有しており、明らかに溶接強度低下の一因をなしていることが考えられるので、さらに焼入性をあまり阻害することなく耐応力腐食割れ性を改善する添加元素の開発が望まれる。最後に溶接材の耐応力腐食割れ性に関しては、

先に示したごとく、Cr 0.17%と Zr0.10%の添加材でも Al-6.0%Zn-1.8%Mg 合金溶接部は、いずれの溶接材を使用した場合も応力腐食割れを示したが、追加試験として行なった耐力の75%の引張応力をかけた応力腐食試験でも割れを生じた。一方母材自体は引張応力腐食試験結果では割れを生じなかった。このように溶接部の耐応力腐食割れ性が母材に比して劣る理由については、**Table 4** にも示したように合金元素の偏析、Cr Zr などの添加元素の偏析あるいは組織の不均一など材料の不均一性というものが大きな要因をなしているものと思われる。

Fig.24 Hardenability for Al-Zn-Mg alloy by Jominy end-quench test of $16\phi \times 100$ mm bar.

5. 結 言

Zn 4 ~ 8 %, Mg 0.6 ~ 3.0% および微量の Cr と Zr を含有する Al-Zn-Mg 系合金を 3 種類の溶加材 (Al-5 Zn-2 Mg-2Si-0.1Ti, 5056 合金および共金合金) を用いて溶接した場合の溶接割れ感受性および溶接材の強度, 耐応力腐食割れ性などについて検討した結果

(1) 溶加材 3 種類の中では, いずれの母材に対しても 5056 合金を使用した場合に最も割れの発生が少ない。溶加材のいかにかわらず, 母材の Mg 含有量が少ないほど割れ発生が多くなる傾向があり, Zn 含有量は上記範囲内では割れに対してほとんど影響しない。溶接部の曲げ試験では, 高 Zn 高 Mg 域の材料が割れの傾向が強い。

(2) 溶接材は各種合金共に溶接後 90 日間の常温時効でほぼ最高の強度にまで回復する。Mg 0.6% 含有材を除いては, 3 種の溶加材のうちで Al-Zn-Mg-Si-Ti 合金を使用したものが全般に強度の回復率が悪く, 共金を使用した場合の回復率が最もすぐれている。母材に対する溶接材の最高の強度回復率は Mg 1.2%, Zn 4.5 ~ 6% 系合金で 8.5% および Mg 1.8%, Zn 4.5 ~ 6% 系合金で 80% 前後であり溶接材の引張強さは $35 \sim 40 \text{ kg/mm}^2$ である。

(3) 溶接部の耐応力腐食割れ性については, 母材に Cr 0.17% と Zr 0.10% を同時に含有した方が Cr 0.2% のものよりも若干すぐれている。Mg 0.6 ~ 1.2%, Zn 4 ~ 4.5% の範囲では応力腐食割れの心配は全然ないが, Mg 1.2 ~ 1.8%, Zn 5 ~ 6% の範囲では Cr と Zr を同時に含有したものでも苛酷な条件下では割れる危険がある。溶接部の耐応力腐食割れ性は母材に比較して劣っているようであり, 今後とも大いに検討する必要がある。

参 考 文 献

- 1) P.Brenner: Aluminium **37** (1961) 633
- 2) H.Hug: Aluminium Suisse No.2 (1963) 49
- 3) W.Patterson, S.Engler: Aluminium **35** (1959) 124
- 4) P.T.Houldcroft: British Welding Journal (1955) 471
- 5) P.T. Houldcroft: British Welding Journal (1961) 360
- 6) P.T.Houldcroft, F.Fidgeon: British Welding Journal (1958) 319
- 7) 馬場, 寺井: 日本金属学会誌, **28** (1964) 102
- 8) 河内: 扶桑金属, **2** (1950) 81