けい素を含む Al-Zr 合金の機械的性質と導電率*

荒 木 喬** 小 森 進 一**

Mechanical properties and electric conductivity of Al-Zr alloys containing Si*

(UDC 669.715'296'539.412 : 537.311.3)

ARAKI Takashi** and KOMORI Shinichi**

Al-Zr alloys are qualified as high electric conductors having high heat resistance by their peculiar recrystallization characteristics. However, there are few reports on their manufacturing techniques covering melting, casting, and heat-treatment procedures. The effects of casting temperature, mass of ingots, and heat treatment on recrystallization characteristics of Al-Zr alloys were clear as shown in the previous reports. Preferable casting and heat-treatment procedures were of importance in raising recrystallization temperatures of Al-Zr alloys containing silicon.

In this study, the effects of silicon content on electric conductivity and heat resistance of Al-0.2% Zr-0.1% Fe alloy were investigated. It was also concerned with the effects of two-stepped heat treatment on the above properties.

(Received June 11, 1968)

1. 緒 言

R. H. Harrington¹⁾ の研究以来 Al-Zr 合金は加工硬化した状態で 500°C に加熱しても容易に軟化しないという特異の再結晶特性をもつために、多くの研究者によって調べられてきた。したがって Al-Zr 合金は R. H. Harrington も指摘しているように耐熱性を備えた高導電材料と考えることができる。

これまでにこのような特異の再結晶特性を解明するため、ジルコニウムの添加量と casting 温度を変えて実験したところ、液相線よりも高い温度から鋳込むことがこの合金の再結晶特性に有効であることがわかった²⁾。つぎに鋳塊の質量が大きくなると、鋳塊の外周部と中心部では凝固速度に大きな差異を生ずるため、それぞれの再結晶特性にも差ができていわゆる質量効果現象を生ずるので、これを改善するにはジルコニウムの添加を 0.3% 以下にした方がよいことを提案した³⁾。また 0.3% 以下のジルコニウムを含む合金はその凝固速度にもよるが、加工材を熱処理することによってその再結晶特性は改善された。Al-Zr 合金には本来 300~500°C に時効硬化が認められ⁴⁾、けい素を添加することによって時効硬化は一層顕著となり、けい素を含まないものにくらべて導電率は短時間の熱処理で向上することがわかった⁵⁾。

この研究では Al-0.2% Zr-0.1% Fe 合金の導電率と、

耐熱性におよぼすけい素添加の影響をしらべて実用化の検討を行なった。また導電率と耐熱性におよぼす 2 段階熱処理の影響についてもしらべた。

2. 実験方法

99.9%以上の純アルミニウムおよび 99.83%のアルミニウム (0.07% Si, 0.10% Fe) に Al-3% Zr 母合金と Al-20% Si 母合金を配合して Al-Zr-Si 合金をつくつた。高純度の Al-Zr 合金 1 個のをぞいて他の合金は 0.2% Zr, 0.1% Fe を一定とし、けい素を 0.1~0.5% 添加した合金をアルミナルツボで溶解し、750°C から内容積 50×50×100 mm の鋼製鋳型に鋳造した。鋳塊の断面はほぼプロペルチ連続鋳造法による棒材の断面と同等であ

Table 1 Chemical composition of Al-Zr-Si alloys.

Specimen No.	Composition (wt %)		
	Zr	Si	Fe
1	0.22	0.02	0.02>
2	0.20	0.07	0.11
3	0.18	0.19	0.10
4	0.22	0.19	0.09
5	0.23	0.30	0.11
6	0.20	0.50	0.11

* 本報は軽金属学会第31回秋期大会 (41年11月) にて発表

** 科学技術庁金属材料技術研究所 (東京都) National Research Institute for Metals (Meguro-Ku, Tokyo)

る。分光分析によつて求めたジルコニウム、けい素、鉄の分析値を **Table 1** に示す。0.02~0.50%のけい素を含む合金の鋳塊は冷間圧延によつて2.5 mm厚（加工率95%）にした。さらに導電率の測定には1 mmφの線を冷間で線引した。これらの冷間加工材は300℃で300 hrまでの熱処理を行なつて導電率ならびに常温および高温の機械的性質を求めた。

つぎに Al-0.22% Zr-0.19% Si 合金について2段階熱処理を行なつた。2段階熱処理は圧延の途中で10 mm厚の板について300℃で24 hr、5 mm厚の板について400℃で24 hr行なつた。これらの板は冷間圧延によつて1 mm厚の板を、また線引によつて1 mmφの線をえた。これらの冷間加工材は導電率、常温および高温の機械的性質を250℃保持の時間に対してプロットし、これら性質の連続加熱による変化を検討した。

3. 実験結果

3.1 導電率について

金型に鑄造して圧延、綿引加工された線材から300℃、400℃の熱処理および300℃+400℃の2段階熱処理によつて導電率の向上する様子を **Fig. 1** に示す。**Fig. 1-(a)** は300℃における導電率の上昇を示しており、0.02%のけい素を含む合金とそれ以上のけい素を含む合金では

Fig. 1 Effect of heat treatment on the electrical conductivity of the Al-Zr-Si alloys.

上昇の様子が異なっている。すなわち24 hr以後の上昇率は同じであるが常に3~4%の開きがある。24 hrまでの上昇の勾配は大体けい素含有量の高い合金ほど大きい。**Fig. 1-(b)** は400℃における導電率の上昇を示す。けい素濃度によつて上昇の様子が2群に分れることは、**Fig. 1-(a)** と同様であるが、導電率の上昇は早くなっている。けい素の多い合金群では58%の導電率まで上昇するのに300℃では100 hr以上を必要としたが、400℃では大体24 hrで到達している。0.02%けい素の合金も400℃では長時間になると導電率がけい素の多い合金群に近づいている。**Fig. 1-(c)** は300℃で24 hr熱処理したものをさらに400℃で熱処理したものである。300℃、24 hrに400℃、24 hrを加えて熱処理することにより、導電率は明らかに向上している。0.02%のけい素を含む合金も長時間になると、けい素の多い合金群と同じ導電率になる。けい素の多い合金群の導電率上昇の傾向は、大体60%前後の導電率で鈍化している。

Fig. 1 の (a), (b), (c) を通じて共通していえることは、導電率を効果的に向上するにはけい素を多く含む合金について24 hr程度の熱処理を2段に行なうことがよいと思われる。

Fig. 2 は同じ実験から電気抵抗の変化率と合金に含まれるけい素量との関係を求めたものである。電気抵抗の変化（減少）を大きくするには300℃よりも400℃の方がよいこと、300℃+400℃の効果が認められること、また電気抵抗の変化は0.07%のけい素で大きくなり、それ以上では緩慢な増加であることがわかる。

Fig. 2 Effect of Si on change of electrical resistivity of Al-Zr alloys.

Fig. 3 Ultimate tensile strength of the Al-Zr-Si alloys at elevated temperatures

3.2 高温引張強さについて

引張試験はインストロン式横型の引張試験機で行なった。引張速度は 4 mm/min 応力-ひずみ線図はロードセルと記録紙の組合せによって求めた。2.5 mm 厚の板は圧延のまま、300°C、100 hr および 300°C、300 hr の熱処理を行ない、室温より 350°C までの試験温度で短時間引張試験を行なった。引張強さと試験温度との関係を Fig. 3 に示す。試験温度 300°C までは圧延材が熱処理材よりも強いが、350°C ではその差はなくなる。引張強さ

も導電率と同じように 0.02% のけい素を含む合金とそれ以上のけい素を含む合金群との間には明らかに差が認められる。熱処理材は引張強さ-試験温度曲線の傾斜はゆるく、圧延材を 300°C という高い温度で 300 hr という長い時間熱処理しても高温の強さがあまり低下しないことは連続加熱に対する熱安定性を立証している。Fig. 4 は

Fig. 4 Effect of annealing time at 300°C on ultimate tensile strength at room and elevated temperatures.

Fig. 5 Effects of Si on electrical conductivity and mechanical properties of Al-0.2% Zr alloys.

300°C における熱処理時間に対する常温および高温の引張強さの変化を求めたものである。室温では引張強さが一度低下し、熱処理時間が長くなると多少向上している。これは回復または再結晶の開始から時効硬化に進んでいることを示している。この時効硬化分も高温の引張試験では強さの向上となつてはあらわれない。試験温度が 350°C になると熱処理時間、成分による差はほとんどなくなる。

3.3 導電率と機械的性質

0.02~0.50% のけい素を含む Al-Zr 合金の板材、線材に 300°C, 300 hr の熱処理を行なったときの導電率、常温および高温の機械的性質を Fig. 5 に示す。室温における引張強さ、耐力が 0.2% けい素では低く、0.3% で高くなっているのは Table 1 の No. 3 と No. 5 からわかるようにジルコニウムの量がそれぞれ 0.18% および 0.23% と異なっているためである。0.2% 以上のけい素は導電率を向上し、機械的性質にとつても効果的に作用していることがわかる。

けい素を 0.07% 以上含む合金に対して 300°C, 24 hr と 400°C, 24 hr の 2 段階熱処理を行なえばほぼ 59% の導電率を示すことは、さきの Fig. 1-(c) から明らかである。また Fig. 5 から導電率、機械的性質が共によくな

Fig. 6 Changes of electrical conductivity and mechanical properties of the Al-0.22% Zr-0.19% Si alloy by continuous heating at 250°C.

Fig. 7 Stress rupture curves of Al-Zr alloys at 125°C and 250°C.

るには 0.2% のけい素が必要と思われるので Al-0.22% Zr-0.19% Si 合を溶製し、多段の熱処理を行なった。すなわち、この合金の 10 mm 厚冷間圧延材に対して 300°C, 24 hr, 400°C, 24 hr の 2 段階熱処理を行ない、5 mm 厚まで冷間圧延し、再び 300°C, 24 hr の熱処理を行なって 1 mm 厚および 1 mm ϕ まで最終冷間圧延および線引を行なった。

これらの材料の導電率、常温および高温の機械的性質を 250°C 保持の時間に対してプロットした結果を Fig. 6 に示す。多段の熱処理によつて十分に導電率を上げた材料をさらに 250°C に連続加熱したのは 250°C という温度が過電流によつて電線が昇温する危険があると認められているためである。導電率は 250°C 保持によつて多少向上している。機械的性質は 100 hr の保持で大きく変化することはない。

Al-0.23% Zr 合金 (0.05% Si, 0.06% Fe) の冷間圧延材の試験温度 250°C における応力-破断試験結果を Fig. 7 に示す。4 kg/mm² の応力では 205 hr で破断する。図の上方に示す線は R. H. Harrington¹⁾ による Al-0.35% Zr 合金の冷間圧延材の 125°C における結果である。

4. 結 論

国内で生産される電気用銅線は約 50 万トン、電気用アルミニウムは約 5 万トン (いずれも 1968 年度生産予測) といわれている。Al-Zr 合金耐熱送電線は個別には生産されており、比較的小さい区間の大電流送電線として ACSR の形で取引されているが、その量はおそらく電気用アルミニウム線のうちの数% に過ぎないと思われる。しかし、いずれは電線の中にしめるアルミニウムの利用が伸びるにつれて必然的に遠距離の送電線その他にも大幅に利用されて行くものと思われる。

この研究ではけい素を含む Al-Zr 合金を電線に採用した場合の適否を考慮して、その機械的性質と導電率をしらべた結果つぎのような結論をえた。

(1) けい素を含む Al-0.2% Zr 合金は 750°C から 50 × 50 mm 断面の鋼製鋳型に鋳込む程度の凝固速度で十分な熱処理性能を備えている。

(2) 冷間加工した材料を焼なましした場合、けい素を含む Al-0.2% Zr 合金の導電率はけい素を含まない合金 (0.02% けい素) よりもすみやかに向上する。

(3) Al-Zr-Si 合金の冷間加工材は 300°C に保持してもほとんど軟化しない。冷間加工による格子ひずみとけい素添加によって微細な化合物の析出⁶⁾は、促進されるから導電率はすみやかに向上し、引張性質も再結晶をそ止する析出によつて低下することがない。

(4) 導電率を向上し、同時に常温および高温の引張性質を十分に高く維持するには、0.2%以上のけい素を添加することが望ましい。

(5) けい素を添加した合金の諸性質は250°Cにおける

連続加熱を受けても変化しなかった。

(6) この合金の応力破断強さは250°Cにおいて 4 kg/mm² (205 hr) であった。

参 考 文 献

- 1) R. H. Harrington: Trans. A. S. M., 41 (1949), 443.
- 2) 荒木, 小森: 軽金属¹⁵ (1965), 348.
- 3) 荒木, 小森: 軽金属¹⁵ (1965), 354.
- 4) 荒木, 小森: 軽金属¹⁶ (1966), 59.
- 5) 荒木, 小森: 軽金属¹⁶ (1966), 115.
- 6) 荒木, 小森: 軽金属¹⁸ (1968), 23.

講 演 会 開 催 案 内

軽金属学会名古屋センター

この度安田会長をお招きして下記のように講演会を開催致します。安田会長は最近国際会議に出席して帰って来られましたところで、アルミニウム工業の現状について国際的視野よりお話し頂く予定になっています。

ふるって多数ご参会いただきたくご案内申し上げます。

記

日 時: 昭和43年9月12日 (木) 午後1時半より4時まで

場 所: 名古屋市科学館ホール (名古屋市中区栄2丁目17, (白川公園内地下鉄→伏見・市電
・バス→広小路伏見下車 徒歩約5分) 電話 (201) 4486

講 演: アルミニウム工業の現況について 軽金属学会長 安 田 幾 久 男 氏

映 画 (1) 36階霞ヶ関ビル

(2) 海上コンテナ