

|         |   |
|---------|---|
| 氏名      | 福井利安<br>ふくいとしやす   |
| 学位の種類   | 工学博士  |
| 学位記番号   | 論工博第840号  |
| 学位授与の日付 | 昭和51年1月23日  |
| 学位授与の要件 | 学位規則第5条第2項該当  |
| 学位論文題目  | <b>Study on Solidified-Structures and Their Properties in Aluminum Alloy Welds</b><br>(アルミニウム合金溶接部の凝固組織とその性質に関する研究) |

論文調査委員 (主査) 教授 水野政夫 教授 高村仁一 教授 尾崎良平

### 論文内容の要旨

本論文は、アルミニウム合金溶接部における機械的性能の改善と溶接欠陥の防止に必要な知見と資料を得るために、基礎的な観点から、溶接凝固金属の組織的特性を明確にし、これらの組織と溶接部の諸性能の関係を解明したもので、5章からなっている。

第1章は構造用アルミニウム合金の溶接に関する金属学的諸問題について、これまでの研究経緯を概括し、問題点を指摘するとともに本研究の目的とその意義を述べたものである。

第2章では、工業用純アルミニウム、Al-Mg系合金およびAl-Zn-Mg系合金を用い、溶接部に形成されるマクロ的およびミクロ的な結晶組織の形態、ならびに溶質分布について調べ、次の点を明らかにしている。

- 1) 溶接部における各種凝固組織の形成は溶接入熱により著しく影響され、入熱の増加とともに微細柱状晶および羽毛状晶は増加し、粗大柱状晶および粒状晶は減少する傾向を示す。この傾向は3次元熱流が可能な時に著しい。溶接部に形成される羽毛状晶は成長双晶であり、この形成量は溶接条件の影響を強く受け、とくに溶接速度が遅いほど多い。ただし、Ti, Zr あるいは Ti-B などの結晶微細化元素を微量添加すると全面微細な粒状晶になる。
- 2) 溶接部の結晶粒度（マクロ的な結晶組織）は溶接入熱の増加とともに幾分大きくなる。これに対し、デンドライトセルサイズ（ミクロ的な結晶組織）は入熱の増加とともに著しく大きくなり、3次元熱流が可能な時は入熱の平方根に比例して、2次元熱流が可能な時は入熱の一次に比例して大きくなる。この現象は凝固時の冷却条件と溶質移動とを考慮した溶接凝固理論によって説明できる。また溶質元素の分布は溶接入熱と深いかわりを持ち、デンドライトセル境界あるいはその近傍での溶質濃度は入熱の増大とともに増加し、逆にセルマトリックス中の溶質濃度は減少する。
- 3) 溶接部には solute band と呼ばれる特異な凝固組織が形成される。Solute band は熱流と直角方向に形成され、金属組織的にはデンドライトセルが粗大化した形となっている。この形成には凝固界面での

成長速度の周期的変化が関与している。

第3章では、工業用純アルミニウム、Al-Mg 系合金および Al-Zn-Mg 系合金を用い、溶接部の機械的性質におよぼす、i) 結晶形態、結晶粒度および組織の影響、ii) 溶質分布の影響、iii) 時効の影響、について調べ、次の点を明らかにしている。

- 1) マクロ的な結晶粒の微細化は溶接部の延性の改善に効果的であるが、強度や靱性の改善にはあまり効果はなく、結晶粒を微細化するために、Ti-B などの添加量が多いと靱性を低下させることもある。
- 2) ミクロ的なデンドライト組織の微細化は強度、靱性および延性のいずれをも著しく改善し、強度とデンドライトセルサイズの間には Petch の式が適用できる。
- 3) 溶接部の機械的性質、とくに延性や靱性は不純物である Fe や Si 量およびその分布状態によって著しく影響される。これは Fe, Si を含むインコヒーレントな第二相、たとえば AlFe(M)Si が亀裂の発生核になったり、亀裂の伝播を助長するためである。
- 4) Al-Zn-Mg 合金のような時効硬化型合金溶接部の靱性、とくに衝撃値は時効硬化とともに双曲線的に低下する。実用的な観点よりすれば、靱性を重視する場合、Al-Mg 系溶加材が最も望ましく、Al-Zn-Mg (Zn>Mg) 系溶加材は好ましくない。
- 5) Solute band や羽毛状晶、とくに羽毛状晶が形成されると溶接部の強度や靱性はかなり低下する。

第4章では、工業用純アルミニウムおよび種々の実用アルミニウム合金を用い、i) 溶接割れ（凝固割れ）におよぼす合金元素および微量添加元素の影響、ii) 溶接部の共晶融解およびマイクロフィッシャー（融解割れ）、ならびに溶接熱影響部のラメラティア（融解割れ）、iii) 構造用の合金厚板の溶接割れ試験方法について調べ、次の点を明らかにしている。

- 1) 今回、新しく開発した重ねすみ肉溶接割れ試験方法は試験の実施が容易で、各材料の溶接割れ感受性を広い範囲で定量的に測定することができ、構造用アルミニウム合金厚板の溶接割れを評価するのに適している。
- 2) 各種の実用合金の溶接割れ感受性を評価するとともに、割れ感受性におよぼす微量添加元素の影響を明らかにした。アルミニウム合金の溶接割れは粒界割れであり、同一合金系の場合、結晶形態や結晶粒度のほか、溶湯の流動性、共晶の形状、水素化物の形成なども影響する。
- 3) 実用的な観点より、構造用 Al-Mg 合金の溶接には微量の Ti-B あるいは Zr を含む Al-Mg 系の溶加材、構造用 Al-Zn-Mg 合金の溶接には微量の Zr を含む Al-Mg-Zn(Mg>Zn) 系の溶加材あるいは Ti-B, Zr を含む Al-Mg 系の溶加材が適している。
- 4) アルミニウム合金の多層溶接部では、先行する溶接部にしばしば微小割れ（マイクロフィッシャー）が形成される。マイクロフィッシャーは局部的な共晶融解部が凝固収縮にともなう応力を受けて発生するもので、典型的な粒界液化割れである。共晶融解やマイクロフィッシャーが生じると溶接継手の性能はかなり低下する。微小割れの防止には、溶加材の選定、溶接入熱、とくに後続パスの入熱、拘束などが重要である。
- 5) 同様な微小割れは溶接熱影響部にも形成され、ラメラティアとなる。上述のマイクロフィッシャーとともに偏析に起因する典型的な粒界液化割れの一種である。

第5章は本研究の総括であり、本研究の結果をまとめるとともに、工学的ならびに実用的意義について述べている。

### 論文審査の結果の要旨

最近、新しい溶接構造用アルミニウム合金が各種大型溶接構造物に用いられるようになり、その溶接部の継手性能の改善と溶接欠陥の防止が重要な課題となっている。

この論文は、アルミニウム合金の溶接性および溶接部の機械的性質を改善する目的で、基礎的な観点より溶接凝固組織の特性を明確にし、溶接部の性能との関係を系統的に研究したもので、その主な成果は次のように要約される。

- 1) アルミニウム合金溶接部に形成される組織の種類と生成量、合金元素の分布、マクロ的な結晶粒度、ミクロ的なデンドライトセルサイズなどを溶接入熱の観点から整理し、これらの関係を冷却速度と溶質移動とを考えた溶接凝固理論を用いて解析している。さらに、溶接部に発生する羽毛状晶は、成長双晶であり、特異な凝固組織として知られている Solute band はデンドライトセルが局部的に粗大化したものであることを明らかにし、これらの形成機構を金属組織学的に論じている。これらの結果は、溶接条件の設定ならびに溶接材料の選定に有効な指針を与えている。
- 2) 溶接部の強度・靱性の改善は、マクロ的な結晶粒の微細化よりもむしろ、ミクロ的なデンドライトセル組織の微細化がより効果的であり、とくに強度とデンドライトセルサイズとの間には Petch の式が適用できることを実証した。さらに、これらの機械的性質と溶質元素の分布ならびに不純物元素の偏析状態との関係から、溶接部の強化機構を金属組織学的に説明している。
- 3) 構造用アルミニウム合金厚板に対する新しい溶接割れ試験法を開発し、そのすぐれた適用性を実証するとともに、多層溶接部に発生するマイクロフィッシャーおよび溶接熱影響部に発生するラメラ・ティアは、溶接入熱が大きいほど著しく、これらは、局部的な共晶融解部が凝固収縮にもなう応力を受けて発生することを明らかにし、入熱制御にもとづいた溶接割れ防止法について提案している。
- 4) 実用アルミニウム合金について、その溶接割れ感受性を系統的に比較検討し、基本合金元素、微量添加元素の種類ならびに不純物量の影響を明らかにした。これらの結果にもとづいて実用合金に対して適切な溶加材組成を見出すとともに、その開発に成功している。

これを要するに、この論文は、アルミニウム合金の溶接凝固組織と溶接部の強度・靱性との関連を系統的かつ詳細に解明し、アルミニウム合金の溶接性および溶接継手性能の改善に対する指針を確立するとともに、溶接構造物へのアルミニウム合金の適用に対して多くの有用な基礎的ならびに工業的知見を与えたもので、学術上、實際上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として価値あるものと認める。