

# 微粒子ピーニングと加工熱処理を組み合わせた アルミニウム合金の表面改質

機械・材料技術部 材料物性チーム 中 村 紀 夫  
高 木 眞 一

本研究では微粒子ピーニングによる超強加工と熱処理を組み合わせて、耐熱性向上のための組織制御技術の開発を行った。微粒子ピーニング後に所定の熱処理を施すことにより、573 K にて 100 h 保持後も硬さが低下しない耐熱性（耐軟化性）の良好な金属間化合物の形成に成功した。

キーワード：微粒子ピーニング，アルミニウム合金，疲労強度，加工熱処理，金属間化合物

## 1 はじめに

低炭素社会の構築が急務となる中、輸送機器の軽量化のために、鉄鋼材料より比重の小さいアルミニウム合金等の軽金属が再び注目されている。しかし、アルミニウム合金は比強度に優れるものの、鉄鋼材料に比べて耐熱性や耐摩耗性に劣ることから適用範囲に限界があり、さらなる特性の向上が求められている。

筆者らは、アルミニウム合金に微粒子ピーニングを施すと、粒子の高速での衝突による多段、多方向、非同期の超強加工により、母相のアルミニウム結晶粒径が 100 nm 未満に微細化し、かつ投射粒子の一部が表面に凝着し、練り込まれるようにして数十 nm～数  $\mu\text{m}$  の投射金属が微細に分散した「ナノ複合組織」が表面近傍に形成されることを見出した<sup>1)</sup>。すなわち、微粒子ピーニングは、投射金属の一部を表面近傍に「ナノ複合組織」として微細に分散できることから、新しい合金元素の添加手法としての機能を有する。たとえば、Fe や Ni などアルミニウムと金属間化合物を形成しやすい粒子を投射し、その後に熱処理を加えることで、表面近傍にのみ高い体積率で金属間化合物を分散させることが可能と考えられる。これにより、耐熱性や耐摩耗性の飛躍的な向上が期待される。そこで、本研究では微粒子ピーニングによる超強加工と熱処理を組み合わせ、耐熱性や耐摩耗性向上のための組織制御技術の開発を目的とする。

## 2 実験方法

供試材はアルミニウム合金 A2024-T4（溶体化後自然時効）である。供試材から  $\phi 15 \times 5$  mm の円盤状に切り出し、

表面を耐水研磨紙を用いて #1500 まで研磨したものを試験片とした。

微粒子ピーニングにはエアブラスト式ショットピーニング装置を使用し、投射材に 1.0 %C 炭素鋼、純 Ni および SUS304 の粒子を使用した。いずれの粒径も 53  $\mu\text{m}$  以下である。投射条件重力式による投射圧力 0.4 MPa、投射時間は約 30 s で被覆率は 200 %以上となるように処理した。

微粒子ピーニング後の熱処理は大気炉を使用し、773 K で 24 h 保持後、炉から取出し空冷する処理とした。

各組織の観察には電子線プローブマイクロアナライザー (EPMA: JEOL JXA-8500F) を用いた。また、熱的安定性を評価するため、前述の熱処理後に 573 K で 100 h 保持までの表面の硬さの変化を、断面方向からマイクロビッカース硬度計 (Akashi MVK-H2-V32) を用いて荷重 0.098 N にて測定した。

## 3 結果および考察

### 3. 1 ナノ複合組織と金属間化合物層

図 1 に微粒子ピーニング後に形成されるナノ複合組織とその後熱処理を施した試験片を、断面方向から観察した反射電子像を示す。図 1 の a～c の表面に白いコントラストで観察される粒子が投射材由来の粒子である。またその複合組織内部のアルミニウム母相の結晶粒径は 100 nm 以下に微細化されていることがこれまでに明らかとなっており、この組織を我々はナノ複合組織と呼んでいる<sup>1)</sup>。ナノ複合組織は練り込まれた組織形態であったが、熱処理後には明らかに異なる組織に変化している。炭素鋼および SUS304 を用いた場合の熱処理後には層状の組織となっ

ていることが分かる（図 1 の d と f 参照）。しかしながら、純 Ni を用いた場合には粒状に分布した組織となっており、一部軽元素で構成されると考えられる黒いコントラストの部分が存在する。この純 Ni を用いた場合の熱処理後の組織を、EPMA による元素分布を行った結果を図 2 に示す。反射電子像で黒いコントラストで観察された部分は Mg と O が濃化しており MgO が形成していると考えられる。炭素鋼や SUS304 を用いた場合にはそのような領域が観察されなかったことから、MgO が形成する現象および形成される金属間化合物が一般的な層状ではなく粒状になる現象は純 Ni を用いた場合に特有であると推察される。

これら熱処理後に表面層に形成される組織を EPMA ならびに X 線回折で解析した結果、炭素鋼を用いた場合には Al, Cu, Mg, Fe, O を含有し、また、SUS304 を用いた場合には Al, Cu, Mg, Fe, Cr, Ni, O を含有することが明らかとなった。また、正方晶の  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  型金属間化合物が主たる構成相であると判定されたが、純 Ni を用いた場合には、多数の回折ピークが検出され構成相の同定が困難であった。すなわち、Fe を含む投射材の場合には MgO の形成が抑制されるとともに層状の金属間化合物が形成するが、その生成メカニズムについては更なる検討が必要である。

### 3. 2 金属間化合物の耐軟化性

次に、微粒子ピーニング後に熱処理で形成される金属間化合物の耐軟化性を評価した。573 K で保持後のビッカース硬さの経時変化を図 3 に、573 K-100 h 保持後の金属間化合物層の反射電子像を図 4 に示す。微粒子ピーニング未処理材（以下未処理材と呼ぶ）は保持時間初期段階から硬さが急激に低下し、そのままの硬さで推移している。これは  $\text{Al}_2\text{Cu}$  ( $\theta$  相) の析出によって過時効となり、硬さが低下するためと考えられる。各金属間化合物層を有する試験片では保持初期に硬さが一旦低下するが、その後硬さは増加し、時間経過に伴っての軟化は見られない。図 4 は 100h 経過後の金属間化合物層の様子で、2 相に分離した組織形態を呈している。硬さが低下した 573 K 保持初期においても金属間化合物層はすでに図 4 と同様な 2 相構造になっており、100 h 経過後も大きな変化はなかった。そのため、初期の硬さの低下と組織変化との対応については明らかではなく、更なる検討が必要である。

各投射材の違いによる金属間化合物の硬さの違いでは、 $\text{SUS304} > \text{炭素鋼} > \text{純 Ni}$  の順に高い。SUS304 と炭素鋼では前述のように、形成される金属間化合物の結晶構造は

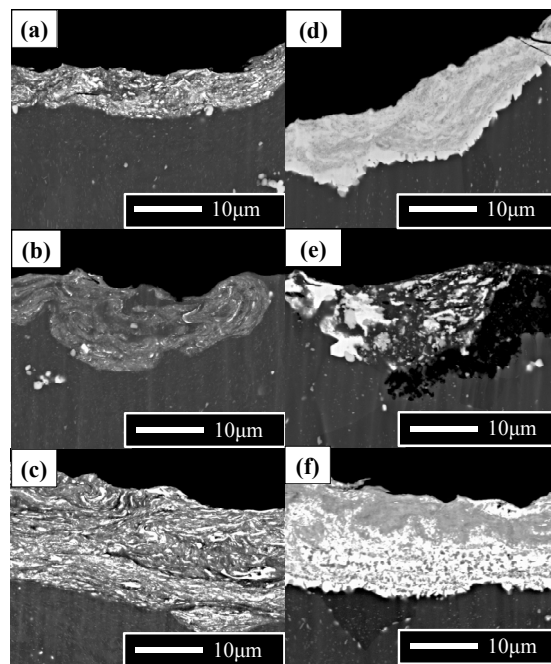


図 1 微粒子ピーニングおよび微粒子ピーニング後に熱処理を施した場合に形成される組織  
(a~c:微粒子ピーニングまま, d~f:熱処理後  
a と d:炭素鋼 b と e:純 Ni c と f:SUS304)

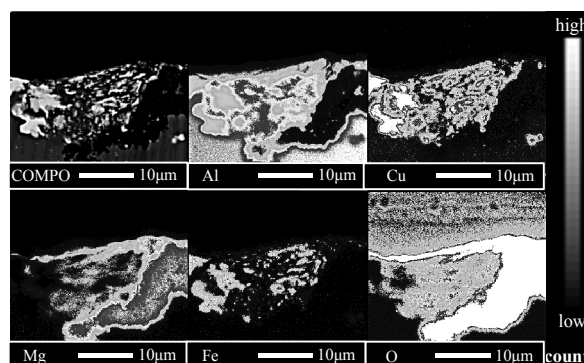


図 2 純 Ni を用いた微粒子ピーニング後の熱処理により形成される金属間化合物の元素分布

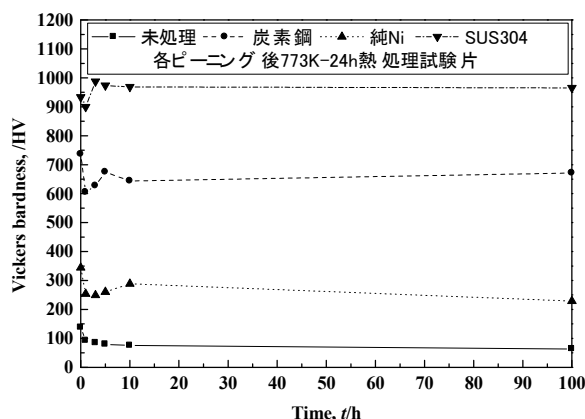


図 3 773 K における熱処理後に形成された金属間化合物層のビッカース硬さの経時変化

同じであるが含まれる成分の違いにより硬さの違いが生じたものと推察される．純 Ni に関しては前述のように MgO が形成するが，密ではなく気孔の多い MgO のために金属間化合物近傍の硬さが低下すること，ならびに粒状に金属間化合物が分布していることから平均硬さが低くなっていると推察される．以上のように，本研究の加工熱処理においては初期の硬さの低下と組織変化との対応については明らかではないが，長時間の保持後にも金属間化合物の組織を有し，高い硬度を維持していることから耐熱性が良好であることが明らかとなった．

## 4 結言

A2024 アルミニウム合金に対して炭素鋼，純 Ni および SUS304 粒子を用いた微粒子ピーニング後に所定の熱処理を施すことにより，573 K にて 100 h 保持後も高い硬度を維持する耐熱性（耐軟化性）の良好な金属間化合物が形成することを見出した．

## 文献

- 1) Norio Nakamura and Shin-ichi Takagi; Mater. Trans, 52,380-385, (2011)

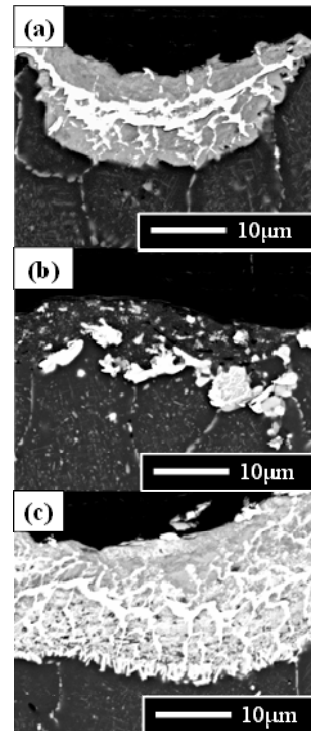


図 4 573 K, 100 h 保持後の金属間化合物層の組織  
(a:炭素鋼 b:純 Ni c:SUS304)