

## 無電鍍鎳／鍍鋁表面處理之 Fe-Mn-Al 合金鋼 800°C 高溫氧化行爲研究

李志偉<sup>1,\*</sup>、王朝正<sup>2</sup>、王政一<sup>1</sup>、楊鵬宇<sup>1</sup>

### Oxidation Behaviors of Fe-Mn-Al Alloys With Electroless Nickel/Aluminizing Coatings at 800°C

J. W. Lee<sup>1,\*</sup>, C. J. Wang<sup>2</sup>, J. Y. Wang<sup>1</sup>, and P. Y. Yiang<sup>1</sup>

#### 摘 要

本研究選用沃斯田鐵相之 Fe-30.6% Mn-5.9% Al-0.9% C (wt%) 合金鋼試片，於表面分別披覆無電鍍鎳、鋁與無電鍍鎳/鋁等三種改質層，並在 800°C 靜態空氣氣氛進行 1~49 小時之氧化試驗。氧化試驗之後的各試片表面改質層與基材之間的微觀結構與相變化亦將做進一步的觀察與探討；本研究發現只披覆無電鍍鎳無法改善試片之抗氧化能力，反而造成性能劣化，不過直接固體滲鋁與先披覆無電鍍鎳再滲鋁試片表面於 800°C 靜態空氣環境中生成保護性的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 相，使試片之 800°C 氧化增重數值大幅下降，其抗氧化性能明顯獲得提升。先披覆無電鍍鎳再滲鋁試片的表面改質層與基材之間生成尖釘狀析出物，可有效改善表面改質層與基材的附著性。

關鍵詞：無電鍍鎳；固體滲鋁；鐵錳鋁合金鋼；高溫氧化。

#### ABSTRACT

Austenitic Fe-30.6% Mn-5.9% Al-0.9% C (wt%) alloys were chosen to deposit electroless nickel, aluminum and electroless nickel/aluminum coatings on the surfaces. Oxidation tests at 800 °C in static air from 1 to 49 hours were conducted. Cross sectional microstructures and phase transformations of oxidized specimens were investigated. It's found that the oxidation resistance of electroless nickel coated specimens was not sufficient and even worse than the untreated matrix. Aluminum oxide was formed on the surfaces of the aluminized and electroless nickel/aluminum specimens after 800°C oxidation tests. The weight data of these specimens were reduced tremendously and the oxidation resistances were greatly improved. The adhesion of surface layers was enhanced by the formation of spiky precipitates in the interfaces between matrix and surface layer for the electroless nickel/aluminum specimens.

Keywords: electroless nickel; aluminization; Fe-Mn-Al alloy; high temperature oxidation.

---

<sup>1</sup>東南技術學院機械工程系

Department of Mechanical Engineering, Tung Nan Institute of Technology.

<sup>2</sup>國立台灣科技大學機械工程研究所

Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University of Science and Technology.

\* 連絡作者 (TEL:02-8662-5916 ext.77)

## 一、前言

表面改質處理是將原材表面披覆一層異質材料，以改善其性能，延長使用壽命的一種技術。在高溫環境中使用的合金材料通常會實施絕熱塗層<sup>[1]</sup>、滲鋁<sup>[2]</sup>、滲矽<sup>[3]</sup>、滲鎢<sup>[4]</sup>與氣相沉積薄膜<sup>[5]</sup>等表面改質處理，達到延長使用壽命的功效。

在材料表面滲鋁處理的方法包括固體滲鋁<sup>[2]</sup>、熱浸鋁<sup>[6]</sup>與電鍍鋁<sup>[7]</sup>等等，由於滲鋁處理可在試片表面形成高鋁含量之合金化層，高溫氧化之後會立即生成緻密性佳，附著性良好的 $Al_2O_3$ 層，保護基材不受外界環境侵蝕，因此實施滲鋁處理的材料極適於高溫氧化與熱腐蝕環境中使用。

鐵錳鋁合金鋼具有比重較低、韌性高的特點，該合金鋼系統在高溫氧化的應用曾廣受許多學者專家的注意與研究<sup>[8,9]</sup>，本研究將針對鐵錳鋁合金鋼實施滲鋁並與無電鍍鎳法結合，探討不同表面改質處理的合金材料於 $800^\circ C$ 的高溫抗氧化性能表現及其機制。

## 二、實驗方法

### 2.1 試片備製

本試驗所採用的鐵錳鋁合金鋼素材以30Kg高週波熔解爐於空氣中冶煉，鋼錠經 $1100^\circ C$ ，4小時均質化後熱鍛成扁鋼胚，接著於 $1100^\circ C$ 進行1小時均質退火，再將表面銹皮刨除，冷軋至厚度2.2mm之薄板。最後以水冷式砂輪切割機切成 $15 \times 15 \times 2.2$ mm之適當尺寸。鐵錳鋁合金鋼的化學成分為Fe-30.6% Mn-5.9% Al-0.9% C (wt%)。

上述切割妥當的鐵錳鋁合金鋼試片表面以SiC砂紙加水逐步研磨至#1200，各試片並浸入酒精以超音波清洗震盪後烘乾備用。

### 2.2 表面改質處理

上述試片分別進行三種不同方式之表面改質處

理，包括(1)無電鍍鎳、(2)固體滲鋁以及(3)無電鍍鎳加固體滲鋁。各表面處理之方法如下：

#### 2.2.1 無電鍍鎳：

無電鍍鎳之化學溶液配方為27g/l之 $NaH_2PO_2 \cdot H_2O$ ，16g/l之 $Na_2C_4H_4O_4 \cdot 6H_2O$ ，20g/l之 $NiSO_4 \cdot 6H_2O$ 。溶液之酸鹼度為4.6，鍍液溫度維持 $84^\circ C$ ，各試片實施無電鍍鎳之前以10%硫酸水溶液酸洗10秒鐘，試片進行無電鍍鎳之時間為1小時。

#### 2.2.2 固體滲鋁

固體滲鋁所使用之設備與方法和固體滲鎢法<sup>[4]</sup>相同，採用30% Fe-Al粉-3%  $NH_4Cl$ -67%  $Al_2O_3$ 粉(wt%)之滲鋁劑；其中Fe-Al粉之成分為Fe-51.24wt% Al。表面研磨之鐵錳鋁合金鋼試片埋入滲鋁劑之中，並以304不銹鋼罐裝填，置於310不銹鋼製成之方形套筒，放入高溫箱型爐進行 $800^\circ C$ ，1小時之滲鋁處理。試驗過程於滲鋁套筒中通入氫氣，以避免鐵鋁粉氧化。

滲鋁處理完畢之試片空冷後自不銹鋼罐中取出，浸入丙酮以超音波清洗震盪後烘乾。

#### 2.2.3 無電鍍鎳加固體滲鋁

將上述披覆無電鍍鎳之鐵錳鋁合金鋼試片置入滲鋁劑中，同樣進行 $800^\circ C$ ，1小時之滲鋁處理。無電鍍鎳加固體滲鋁之試片空冷後自不銹鋼罐中取出，浸入丙酮以超音波清洗震盪後烘乾。

上述三種表面改質處理之鐵錳鋁合金鋼試片以掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察其截面顯微結構，並以X光繞射儀分析其表面改質層的結晶相。

### 2.3 高溫氧化試驗

上述三種不同表面改質處理之試片與未處理之鐵錳鋁合金鋼原材分別置於氧化鋁坩堝，放到高溫箱型爐進行 $800^\circ C$ ，靜態空氣之氧化實驗，高溫氧化試驗時間分別為1、9、25與49小時。各試片試驗前後的重量以精密電子天秤測量，並計算其氧化增重速率。

高溫氧化後的試片立刻進行 X 光繞射分析以探討各試片氧化生成物之結晶相，並利用 SEM 與電子微探儀 (EPMA) 觀察其截面顯微結構與定性、定量成分分析。

### 三、結果與討論

#### 3.1 腐蝕動力學

圖 1 為鐵錳鋁合金鋼原材與三種不同表面改質處理之試片於 800°C 靜態空氣氧化 1 至 49 小時的腐蝕增重，各試片均大致符合拋物線率之變化。由圖中之增重數據顯示，經過固體滲鋁的鐵錳鋁合金鋼試片與先經無電鍍鎳，再做固體滲鋁的試片，二者的高溫氧化增重數值分別是鐵錳鋁合金鋼原材的 0.037 及 0.057 倍，對於抵抗 800°C 靜態空氣氧化的能力顯著提昇。

比較鐵錳鋁合金鋼原材與披覆無電鍍鎳試片之高溫氧化增重曲線發現，在 800°C 氧化 1 至 9 小時的階段，鐵錳鋁合金鋼原材的氧化增重值高於披覆無電鍍鎳試片者，然而當氧化時間增長至 9 小時，兩者的氧化增重值幾乎相當；氧化時間拉長至 9 小時以上至 49 小時，披覆無電鍍鎳試片的氧化情形就比原材來得嚴重，而其相對應之高溫氧化行為會在下一節探討，因此基本上來說，無電鍍鎳披覆層並不適於 800°C 之高溫環境使用。

#### 3.2 高溫氧化型態

##### 3.2.1 未處理之鐵錳鋁合金鋼原材

圖 2 為未實施任何表面處理之鐵錳鋁合金鋼原材於 800°C 氧化 49 小時之截面金相，基材表面有部分氧化物附著，其餘大部分之氧化物均已剝落，靠近表面之基材已產生相變化，係由高溫氧化導致基材沃斯田鐵相 ( $\gamma$ ) 相變化生成之肥粒鐵相 ( $\alpha$ )。以 X-光繞射分析結果來看，原材於 1 至 9 小時之高溫氧化生成物主要為  $(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{O}_4$ ，少量之  $\text{MnAl}_2\text{O}_4$  與  $\text{MnO}$ ，以及肥粒鐵相。當氧化時間增長至 25 小時，

乃至 49 小時之後，其氧化生成物主要為  $(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{O}_4$  與肥粒鐵相， $\text{MnAl}_2\text{O}_4$  與  $\text{MnO}$  則幾乎偵測不到。由於本研究所採用之鐵錳鋁合金鋼的鋁含量僅 5.9 wt%，因此無法生成緻密之氧化鋁銹皮，只能生成結構鬆散，與基材附著性不佳之  $(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{O}_4$  相，因此未處理之鐵錳鋁合金鋼原材於 800°C 之高溫抗氧化性較差。

##### 3.2.2 披覆無電鍍鎳試片

尚未進行氧化試驗的無電鍍鎳層截面顯微結構如圖 3(a) 所示，其厚度約為 10  $\mu\text{m}$ 。以 EPMA 分析成分為 Ni-16.10 at% (9.20 wt%) P；此無電鍍鎳層以 X 光分析為非晶質型態。根據研究顯示<sup>[10]</sup>，無電鍍鎳的磷含量高於 7 wt% 時，其結晶性消失，變成非晶質型態。而控制磷含量的主要因素是無電鍍化學溶液的酸鹼值，酸鹼值愈高，無電鍍鎳的磷含量愈低。

圖 3(b) 為披覆無電鍍鎳的鐵錳鋁合金鋼試片於 800°C 氧化 1 小時後的截面金相，鍍層表面生成約 3  $\mu\text{m}$  之 NiO 層，不過與基材之附著性略差，已有部分剝落。在無電鍍鎳層表面生成  $\text{Ni}_3\text{P}$  之層狀析出物 (圖中 A 區域)，厚度約為 6  $\mu\text{m}$ 。比較值得注意的是在無電鍍鎳與鐵錳鋁合金鋼基材的界面產生針狀析出物，以 X-ray mapping 分析主要是含鐵、錳、鋁、鎳、磷與碳，其詳細之結晶形態則需進一步之分析與探討。

披覆無電鍍鎳的鐵錳鋁合金鋼試片於 800°C 氧化 9 小時後的截面金相如圖 4(a) 所示，圖 4(b) 至 (e) 分別為 Ni、Al、P、O 之 X-ray maps。綜合 X 光繞射圖形與 X-ray maps 之數據，鍍層表面生成  $\text{Ni}(\text{Fe},\text{Mn})_2\text{O}_4$  與少量 NiO 銹皮，銹皮與基材之附著性仍然不佳。無電鍍鎳層未氧化部分則生成主要是  $(\text{Fe},\text{Ni})_3\text{P}$  與少量之  $\text{Ni}_3\text{P}$  層狀析出物，鍍層與鐵錳鋁合金鋼基材界面的析出物則變得更長更粗，以 EPMA 分析其成分為 1.88% Al-3.24% C-16.41% Ni-11.65% P- 40.95% Fe- 25.88% Mn (wt%)，由於此析出物之型態為尖釘狀，深深插入基材之中，因此未

氧化之無電鍍鍍層與鐵錳鋁基材之附著性非常好。

然而披覆無電鍍鍍的鐵錳鋁合金鋼試片經過 800°C 氧化 25 小時 (如圖 5)，在照片左側之無電鍍鍍層幾乎都已經形成多孔狀之氧化物，主要是  $Mn_{0.83}Al_{1.96}Fe_{0.21}O_4$  與  $Ni(Fe,Mn)_2O_4$ 。在鍍層表面仍有部分未剝落之  $(Fe,Ni)_3P$  與少量  $Ni_3P_3$  析出相殘存，原本在界面生成之尖釘狀析出物亦開始產生氧化，此時之氧化增重量已高於原材。試片經過 800°C 氧化 49 小時之後，無電鍍鍍層都已經完全形成多孔狀之  $Mn_{0.83}Al_{1.96}Fe_{0.21}O_4$  氧化物剝落，原本之尖釘狀析出物則都已經氧化消失不見。由以上不同氧化時間之微結構變化，再印證其氧化增重數據可知，披覆無電鍍鍍的鐵錳鋁合金鋼試片由於無電鍍鍍層的氧化與剝落，無法生成緻密附著之抗氧化皮膜，縱使在鍍層與基材界面生成附著性極優良之尖釘狀析出物，但是仍然無法抵擋更長時間的 800°C 高溫氧化，使得其氧化增重量比原材還嚴重。

### 3.2.3 固體滲鋁試片

經過滲鋁處理的試片具有非常優異的 800°C 高溫抗氧化能力，即使加熱 49 小時，其氧化增重僅 0.27 mg/cm<sup>2</sup>，是加熱相同時間之原材氧化增重值的 0.037 倍，試驗後的試片外觀依然呈現金屬色澤，整個試驗過程中幾乎無任何銹皮剝落。

滲鋁鐵錳鋁合金鋼試片的截面顯微結構如圖 6 所示，表面因滲鋁而生成成分為 45.0%Al-5.9%C-43.8%Fe-5.1%Mn (at%) 的 FeAl 相，厚度約為 15  $\mu$  m。圖 7 為未氧化之滲鋁試片與 800°C 氧化 49 小時滲鋁試片的 X 光繞射圖形。圖 8 為滲鋁試片於 800°C 氧化 49 小時之截面金相，在試片表面生成一層極薄的連續  $Al_2O_3$  相，由於此  $Al_2O_3$  層太薄，因此無法在 X 光繞射圖形上發現。滲鋁試片因高溫長時間之擴散反應，表面合金化層之鋁原子向基材擴散，使得原先滲鋁生成之層狀 FeAl 相變態為層狀之  $Fe_3Al$  相 (圖中標示 A 區域)，並在  $Fe_3Al$  相與沃斯田鐵相基材之間形成一層成分為 9.84%Al-2.87%C-

33.45% Mn-53.84%Fe (wt%) 的肥粒鐵相 (圖中標示 B 區域)。 $Fe_3Al$  相與肥粒鐵相之間的界面呈現略有波浪之平面狀。

滲鋁試片的抗高溫氧化性能主要來自於 FeAl 相氧化生成之保護性  $Al_2O_3$  層，並且具有緻密性佳，附著性良好的特性，在文獻期刊中已多有報導<sup>[11]</sup>，比較 Wang 等人<sup>[6]</sup> 針對鐵錳鋁合金鋼進行熱浸鋁，再實施噴覆 NaCl 之 900°C 高溫熱腐蝕結果發現，熱浸鋁之鋁塗層於熱腐蝕時快速擴散進入合金，誘發複雜相變化，脫錳氧化造成的孔洞使鐵錳鋁合金鋼試片產生氮化鋁內侵蝕現象，因而試片抗熱腐蝕性能降低。雖然本研究之溫度較低，且腐蝕環境不同，不過綜觀本研究之固體滲鋁試片發現，滲鋁形成之 FeAl 與  $Fe_3Al$  相為穩定之層狀結構，保護鐵錳鋁基材不受外界之高溫侵蝕，因此不會發生基材氧化脫錳，造成空孔的問題。所以鐵錳鋁合金鋼實施固體滲鋁為可行且有效的表面改質方法。

### 3.2.4 披覆無電鍍鍍再固體滲鋁試片

先在基材披覆 10  $\mu$  m 無電鍍鍍層，然後進行 800°C，1 小時滲鋁處理的鐵錳鋁合金鋼試片截面金相如圖 9 所示。圖中 A 區域之成分為 46.75%Al-5.90%C-45.61%Ni-1.07%Fe (at%)，由 X 光繞射圖形得知為 NiAl 相，B 區域主要為  $(Fe,Ni)_3P$  相，在無電鍍鍍層與鐵錳鋁合金鋼基材的界面仍然產生尖釘狀析出物，以 X-ray maps 分析主要是含鐵、錳、鋁、鎳、磷與碳。類似之界面微結構亦於滲鋁之鎳基超合金 IN 738 LC 中發現<sup>[12]</sup>，不過該析出物為合金碳化物，本研究之析出物則需再進一步研究其詳細結晶構造。

披覆無電鍍鍍再固體滲鋁試片於 800°C 氧化 49 小時之截面金相如圖 10 所示，在試片表面生成一層極薄的連續  $Al_2O_3$  相，圖中 A 區域之成分為 24.00% Al- 3.76% C- 50.34 Ni- 8.99 % Fe-12.93 % Mn (at%)，由 X 光繞射圖形得知為  $Ni_2(Fe,Mn)Al$  相，界面尖釘狀析出物的成分為 6.26% Al-17.16% C-17.39% Ni-15.58 % P-21.78% Fe-21.83% Mn (at%)，

其詳細之結晶形態則值得進一步之分析與探討。

披覆無電鍍鍍再固體滲鋁試片亦具有非常優異的 800°C 高溫抗氧化能力，加熱 49 小時之後的氧化增重僅 0.41 mg/cm<sup>2</sup>，是加熱相同時間之原材氧化增重值的 0.057 倍，與滲鋁試片之高溫抗氧化性能相當，屬於同一個等級，整個試驗過程中幾乎也無銹皮剝落。其抗高溫氧化的主要原理也是在表面生成高鋁含量之 NiAl 層，在隨後之高溫氧化環境立刻生成緻密附著之 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層。

Forman<sup>[13]</sup> 與 Katsman<sup>[14]</sup> 等人曾將無電鍍鍍與鋁鍍層結合應用於表面改質處理的研究，Forman 等人在鋼材表面先用離子氣相沉積法披覆鋁層，然後在鋁層之外再實施無電鍍鍍，可抑制鋼材在 482°C 循環氧化的鍍層破壞。Katsman 等人則在 TiAl 合金表面先以無電鍍鍍打底，再用電鍍法鍍上鍍層，然後實施固體滲鋁，可獲致附著性良好的 NiAl 保護層，不過其界面型態為平面狀。

在傳統高溫環境使用的合金系統中，常會加入活性金屬元素 Y，使合金生成尖釘狀氧化物，與基材鎖固而不易剝落<sup>[15]</sup>。在本研究中，先披覆無電鍍鍍再進行滲鋁之試片會在基材與無電鍍鍍層之間形成尖釘狀析出物，將抗高溫氧化之表面改質層牢牢黏附於基材之上，在效果上有異曲同工之處。因此若在有溫度與應力變化的高溫循環氧化環境中使用，具有此種尖釘狀析出物的鐵錳鋁合金鋼試片應該會具有更佳表現。

#### 四、結論

沃斯田鐵相之 Fe-30.6% Mn-5.9% Al -0.9% C (wt%) 合金鋼試片，於表面分別披覆無電鍍鍍、鋁與無電鍍鍍/鋁等三種改質層，並在 800°C 靜態空氣氣氛進行 1~49 小時之氧化試驗，獲致以下結論：

1. 在 800°C 氧化環境中，披覆無電鍍鍍之鐵錳鋁合金鋼雖然在表面生成 Ni(Fe,Mn)<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 與少量 NiO 相，但是與基材之附著性不佳，因此其 800°C 高溫抗氧化性能比未表面處理之原材還差。

2. 鐵錳鋁合金鋼於 800°C 固體滲鋁 1 小時後，表面生成 FeAl 相，並在隨後之 800°C 高溫氧化環境中生成保護性 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄層，大幅提昇其抵抗 800°C 空氣氧化之能力。

3. 披覆無電鍍鍍，再進行 800°C 固體滲鋁 1 小時之鐵錳鋁合金鋼在表面生成 NiAl 相，並在無電鍍鍍層與鐵錳鋁合金鋼基材的界面產生尖釘狀析出物，增加表面改質層與基材之附著性，由於在 800°C 高溫氧化環境中表面生成保護性 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄層，使合金之高溫抗氧化與滲鋁試片者相當，大幅提昇其抵抗 800°C 空氣氧化之能力。

#### 五、誌謝

本研究承國科會 NSC -90-2218-E-236-003 經費支援，並獲國立清華大學材料工程研究所杜正恭教授指導，特此一併誌謝。

#### 六、參考文獻

1. R. Mevrel, *Mater. Sci. Eng.* A120 (1989) 13.
2. Wen-Ta Tsai and Kuo-En Huang, *Thin Solid Films* 366 (2000) 164.
3. F. Fitzner and J. Schlichting, *High Temperature Corrosion*, NACE, Houston (1981) 604.
4. Jyh-Wei Lee, Jenq Gong Duh, and Shiu Yueh Tsai, *Surf. Coat. Technol.* 153, 1 (2002) 59.
5. J. L. He, C. H. Yu, A. Leyland, A. D. Wilson, and A. Matthews, *Surf. Coat. Technol.* 155 (2002) 67.
6. Chaur-Jeng Wang, Jyh-Wei Lee, and J. H. Twuu, *Proceeding of ICMCTF 2002 conference*, San Diego, California, USA, April 22-26, (2002).
7. G. A. Capuano, A. Dang, U. Bernabai, and F. Felli, *Oxid. Met.* 39, 3/4 (1993) 263.
8. S. K. Banerji, *Metal Progress*, 4 (1978) 59.

9. Chaur-Jeng Wang and Yeong-Chung Chang, *Mater. Chem. Phys.* 76 (2002) 151.
10. E.Vafaei-Makhsos, *J. Appl. Phys.* 51 (1980) 6366.
11. P. S. Liu, K. M. Liang, H. Y. Zhou, S. R. Gu, X. F. Sun, H. R. Guan, T. Jin, and K. N. Yang, *Surf. Coat. Technol.* 145 (2001) 75.
12. W. T. Wu, A. Rahmel, and M. Schorr, *Oxid. Met.* 22, 1/2 (1984) 59.
13. B. R. Forman, H. L. Gilles, and M. Faul, *Surf. Coat. Technol.* 123 (2000) 106.
14. A. Katsman, A. Ginzburg, T. Werber, I. Cohen, and L. Levin, *Surf. Coat. Technol.* 127 (2000) 220.
15. D. P. Whittle and J. Stringer, *Phil. Trans. R. Soc. London A* 295 (1984) 309.

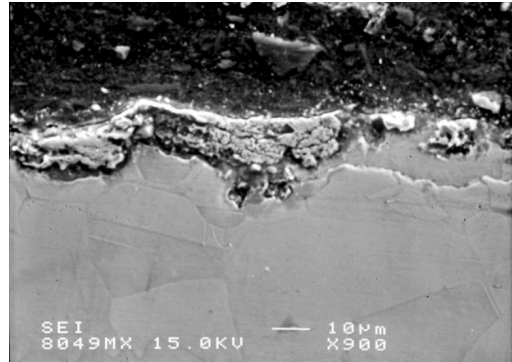


圖2. 基材於 800°C 靜態空氣氧化 49 小時之截面型態

Fig. 2. The cross sectional morphology of matrix oxidized in static air at 800°C for 49 hours.

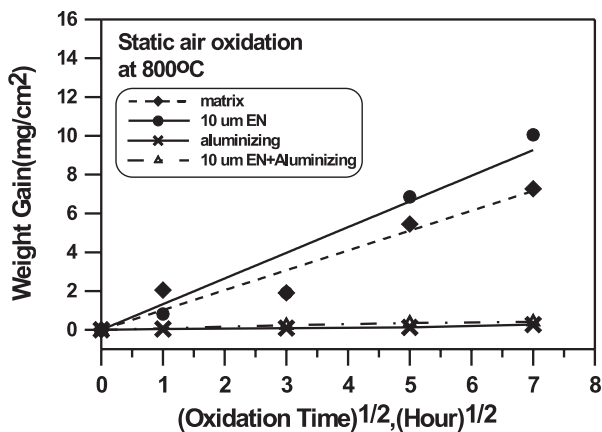
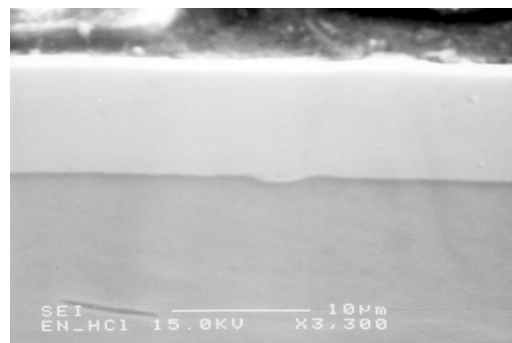
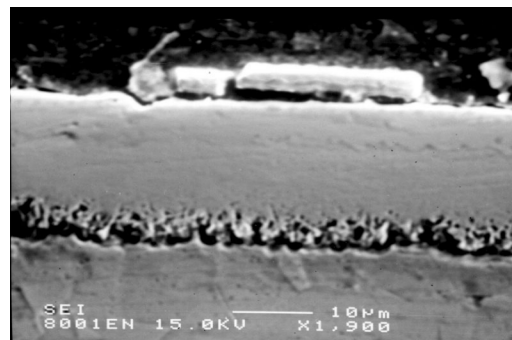


圖1. 鐵錳鋁合金原材與三種不同表面改質處理之試片於 800°C 靜態空氣氧化 1 至 49 小時的腐蝕增重與時間開根號之關係。

Fig. 1. The parabolic plot of weight gains of matrix and three different coating specimens at 800°C for 1 to 49 hours.



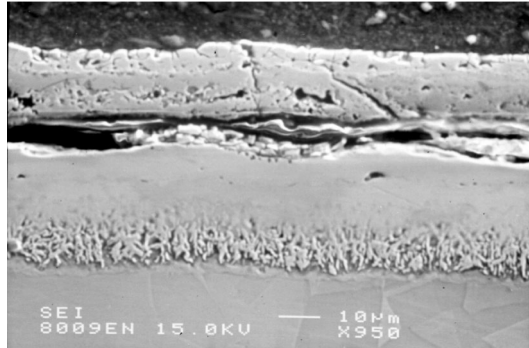
(a)



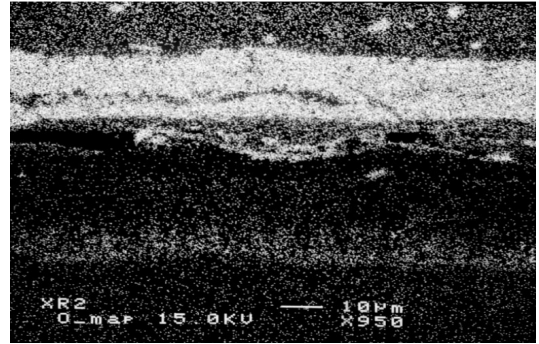
(b)

圖3. (a) 試片披覆無電鍍鎳，(b) 於 800°C 靜態空氣氧化 1 小時之截面型態

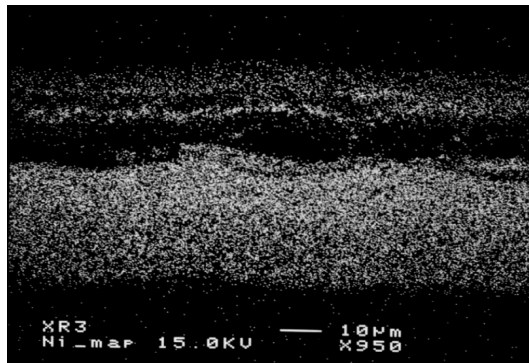
Fig. 3. The cross sectional morphologies of specimens (a) with as-deposited electroless nickel layer and then (b) oxidized in static air at 800°C for 1 hour.



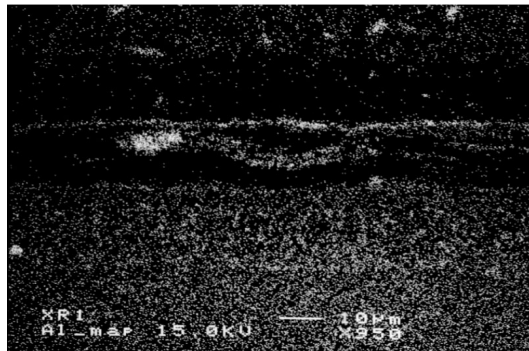
(a)



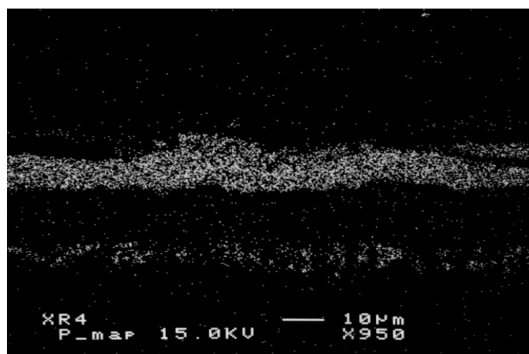
(e)



(b)



(c)



(d)

圖4. 披覆無電鍍鎳試片 (a) 於 800°C 靜態空氣氧化 9 小時之截面型態，(b) Ni map，(c) Al map，(d) P map 與 (e) O map

Fig. 4. The cross sectional morphologies of specimen (a) oxidized in static air at 800°C for 9 hours, (b) Ni map, (c) Al map, (d) P map and (e) O map.

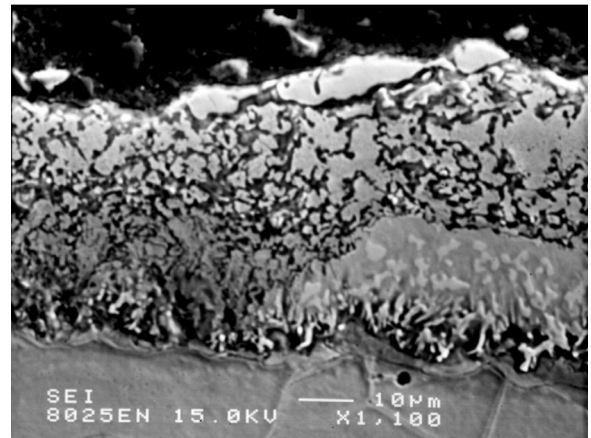


圖5. 披覆無電鍍鎳試片於 800°C 靜態空氣氧化 25 小時之截面型態

Fig. 5. The cross sectional morphology of specimen oxidized in static air at 800°C for 25 hours.

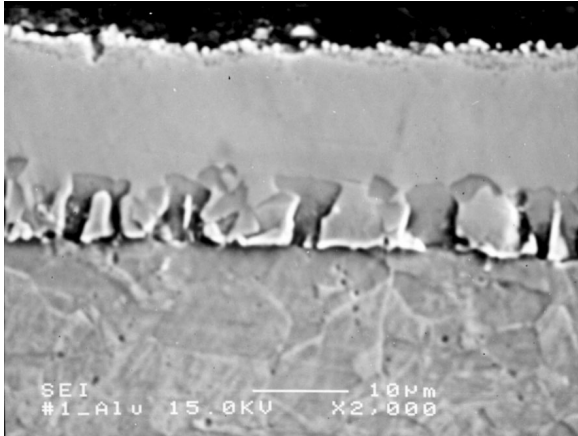


圖6. 於 800°C 固體滲鋁 1 小時之試片截面型態  
Fig. 6. The cross sectional morphology of specimen aluminized at 800°C for 1 hour.

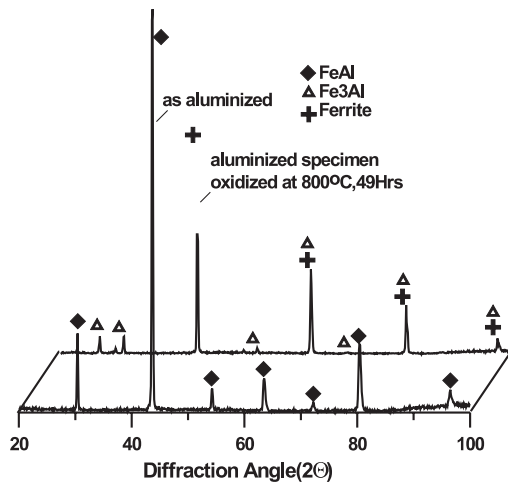


圖7. (a) 800°C 固體滲鋁 1 小時之試片與 (b) 800°C 靜態空氣氧化 49 小時試片之X光繞射圖  
Fig. 7. The X-ray diffraction patterns of specimens (a) aluminized at 800°C for 1 hour and (b) oxidized at 800°C for 49 hours.

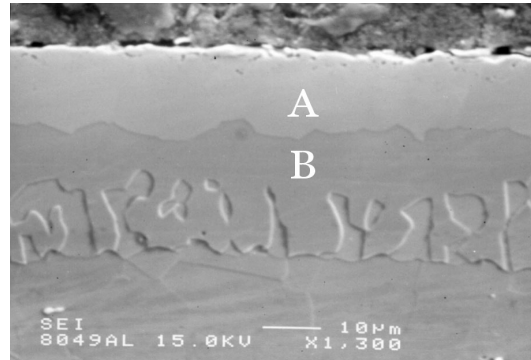


圖8. 滲鋁試片於 800°C 靜態空氣氧化 49 小時之截面型態

Fig. 8. The cross sectional morphology of aluminized specimen oxidized in static air at 800°C for 49 hours.

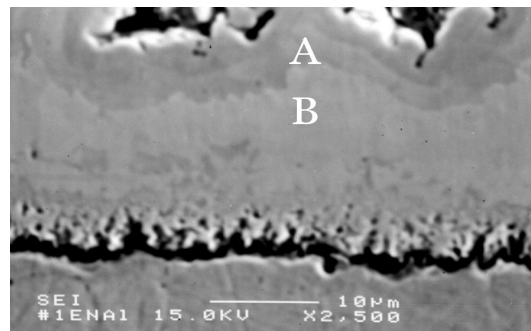


圖9. 披覆無電鍍鎳再滲鋁試片之截面型態  
Fig. 9. The cross sectional morphology of electroless nickel-plated and aluminized specimen.

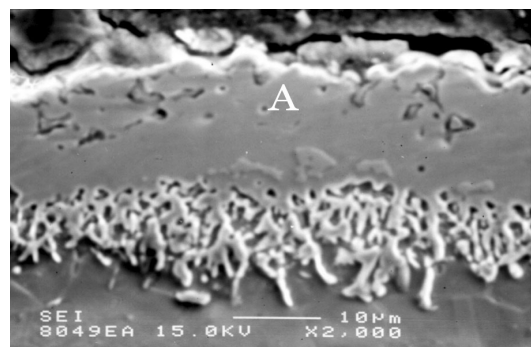


圖10. 披覆無電鍍鎳再滲鋁試片於 800°C 靜態空氣氧化 49 小時之截面型態

Fig. 10. The cross sectional morphology of electroless nickel-plated and aluminized specimen oxidized in static air at 800°C for 49 hours.