

ผลของอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการเพ็คอะลูมิเนียมซึ่งต่อความต้านทานการเกิดออกซิเดชันของ
โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214

นางสาวปสุตา กิรติมาศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

Effects of Temperature and Time in Pack Aluminizing Process on Oxidation resistance of
Nickel base Superalloy, Haynes 214

Miss Pasuta Keeratimas

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการเพ็คอะลูมิเนียมซึ่ง ต่อความต้านทานการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมพิเศษ เนื้อพื้นนิกเกิล Haynes 214
โดย	นางสาวปสุตา กীরติมาศ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วังยาว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วังยาว)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมฤกษ์ จันทรรอัมพร)

ปศุตา กิระติมาศ : ผลของอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการแพ็คอะลูมิเนียมในเชิงต่อความต้านทานการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล Haynes 214. (EFFECT OF TEMPERATURE AND TIME IN PACK ALUMINIZING PROCESS ON OXIDATION RESISTANCE OF NICKEL BASE SUPERALLOY, HAYNES 214) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล และ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : อ.ดร. ปัญญวัชร วังยาว, 72 หน้า.

งานวิจัยนี้เคลือบผิวโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล Haynes 214 โดยกระบวนการแพ็คอะลูมิเนียมในเชิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง วิเคราะห์สารประกอบของชั้นเคลือบ โครงสร้างจุลภาค วัดความแข็ง ทดสอบการสึกหรอ และทดสอบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 104 ชั่วโมง

ผลวิเคราะห์ชั้นเคลือบผิว 2 ชั้น โดยชั้นเคลือบด้านในคือสารประกอบเชิงโลหะ Ni_2Al_3 และชั้นเคลือบด้านนอกประกอบด้วย เฟส Ni_2Al_3 และ เฟส $NiAl_3$ อุณหภูมิและเวลามีผลต่อความหนาชั้นเคลือบ โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความหนาชั้นเคลือบจะเพิ่มขึ้นและเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นความหนาชั้นเคลือบก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน จากการวัดความแข็งและทดสอบการสึกหรอพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวมีการต้านทานการสึกหรอที่ดีกว่า และความแข็งมากกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว ผลทดสอบการเกิดออกซิเดชัน ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวและชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวมีอัตราการเกิดออกซิเดชันสูงในช่วงแรก จากนั้นจะเริ่มเสถียร ส่วนชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบ ช่วงแรกมีอัตราการเกิดออกซิเดชันต่ำ แต่มีแนวโน้มจะสูงขึ้นเรื่อยๆ

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา...2555..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5370283421 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS : ALUMINIZING/NICKEL BASE SUPERALLOY/HAYNES 214/OXIDATION

PASUTA KEERATIMAS : EFFECTS OF TEMPERATURE AND TIME IN PACK

ALUMINIZING PROCESS ON OXIDATION RESISTANCE OF NICKEL BASE

SUPERALLOY, HAYNES 214. ADVISOR: ASST. PROF. PATAMA

VISUTIPITUKUL, Ph.D., CO-ADVISOR: PANYAWAT WANGYAO, Ph.D. 72 pp.

In this research, pack aluminizing process was conducted on nickel base superalloy, Haynes 214 at various temperatures (700,800 and 900°C) for 1, 1.25 and 6.25 hours. Phases in layer were identified with XRD and the cross-sectional microstructure was observed by an optical microscope. Hardness was measured by Vicker microhardness tester. Wear resistance was tested by pin-on-disc wear machine and Surface morphologies of each wear tested specimen were analyzed with SEM. Cyclic oxidation tests were conducted at 1000°C for 104 hours. During cyclic oxidation test, sample weight was measured every cycles (8 hours each).

The surface consists of two layers: the inner layer is Ni_2Al_3 (main phase) and the outer layer consists of two phases: Ni_2Al_3 and $NiAl_3$ (secondary phase). Temperatures and times in the aluminizing process do affect to the thickness of the layer. The increasing of aluminizing temperature would increase the thickness of the coating layer and the increasing of time would also increase the thickness of coating layer. The aluminized Haynes 214 is harder and had better wear resistance than those of untreated Haynes 214 specimens. When comparing specimens with and without aluminized coating, it was found that the aluminized specimens show a higher mass gain in the beginning of oxidation testing and then undergoing stably. The uncoated substrates show a lower mass gain in the beginning of the test but have trends to rapidly increase later.

Department : Metallurgical Engineering..... Student's Signature

Field of Study : Metallurgical Engineering..... Advisor's Signature

Academic Year : 2012..... Co- advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือและการแนะแนวทางของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ ดร. ปัญญวัชร วัชยาว ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ทั้งสองท่านเป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่องานการทำวิจัย อบรมสั่งสอน รวมทั้งตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย ซึ่งเป็นประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำซึ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร. สมฤกษ์ จันทอัมพรซึ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอกมหาวิทยาลัยที่สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำชี้แนะที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการและเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้คำแนะนำและการสนับสนุนผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณบริษัท Tritex ที่ให้ความอนุเคราะห์ชิ้นงาน และขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องทดสอบการสึกหรอ ขอขอบพระคุณคุณจุมพฏ วานิชสัมพันธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องทดสอบการสึกหรอ

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและน้องสาว ของข้าพเจ้า ที่ให้การสนับสนุนด้านการศึกษาและคอยเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้ามาโดยตลอด และขอขอบคุณเพื่อนพี่น้องในระดับปริญญาโทบัณฑิต ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆด้วยดีเสมอมา จนข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ปรีทรรศน์วรรณกรรม.....	3
2.1 โลหะผสมพิเศษ.....	3
2.1.1 ชนิดของโลหะผสมพิเศษ.....	3
2.1.2 สมบัติของโลหะผสมพิเศษ.....	4
2.1.3 การใช้งานโลหะผสมพิเศษ.....	7
2.2 โลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิล ชนิด Haynes 214.....	7
2.2.1 โครงสร้างจุลภาคและเฟสของโลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิล.....	8
2.2.2 ธาตุผสมในโลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิล.....	10
2.2.3 สมบัติทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิล.....	10
2.2.4 กรรมวิธีทางความร้อนของโลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิล ชนิด Haynes 214.....	11

บทที่	หน้า
2.2.5 การต้านทานการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด Haynes 214.....	11
2.2.6 การใช้งานของโลหะผสมพิเศษนิกเกิล ชนิด Haynes 214.....	12
2.3 กระบวนการปรับปรุงผิวโดยวิธีอะลูมิเนียมในซิง (Aluminizing).....	13
2.3.1 การพิจารณาเชิงโลหวิทยา.....	13
2.3.2 การทำอะลูมิเนียมในซิงด้วยวิธี Pack Cementation.....	14
2.3.3 การแพร่ในวิธี pack aluminizing แบ่งตามโครงสร้างจุลภาคได้ 2 ชนิด...	14
2.3.4 สารประกอบที่ได้จากกระบวนการอะลูมิเนียมในซิง.....	15
3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง.....	17
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	17
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	17
3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	17
3.2.2 เครื่องสำหรับการวิเคราะห์.....	17
3.3 วิธีดำเนินการทดลอง.....	18
3.3.1 การเตรียมชิ้นงานก่อนทำการ Pack aluminizing.....	18
3.3.2 การปรับปรุงผิวด้วยกระบวนการ Pack aluminizing.....	18
3.3.3 ทดสอบความแข็งแบบ Vicker.....	19
3.3.4 ทดสอบการเกิดการสึกหรอโดยวิธี Pin on Disc.....	19
3.3.5 ทดสอบการเกิดออกซิเดชัน.....	19
3.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	19
4 ผลการทดลองและการอภิปราย.....	21
4.1 ลักษณะชิ้นงานก่อนการเคลือบผิวโดยวิธีอะลูมิเนียมในซิง.....	21
4.2 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานที่ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง.....	23
4.2.1 ลักษณะพื้นผิวเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน.....	23
4.2.2 ลักษณะพื้นผิวเคลือบของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน.....	24
4.3 ผลการตรวจสอบชิ้นงานที่ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงโดย XRD แบบ GIXD.....	26

4.3.1 ผลการตรวจสอบ โดย XRD แบบ GIXD ของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน....	26
4.3.2 ผลการตรวจสอบ โดย XRD แบบ GIXD ของชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน.....	27
4.4 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง.....	30
4.4.1 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน....	30
4.4.2 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน	32
4.4.3 ความหนาของชั้นเคลือบกับเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิงชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน.....	34
4.4.4 ความหนาของชั้นเคลือบกับเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิงชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน.....	38
4.4.5 จลนพลศาสตร์ของการทำอะลูมิเนียมในซิงของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน.....	42
4.4.6 จลนพลศาสตร์ของการทำอะลูมิเนียมในซิงของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน...	43
4.5 คุณสมบัติทางกล.....	45
4.5.1 ความแข็ง.....	45
4.5.2 การสึกหรอ.....	46
4.6 ผลการทดสอบการเกิดออกซิเดชัน.....	48
5 สรุปผลการทดลอง.....	51
รายการอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก.....	55
ภาคผนวก ก.....	56
ภาคผนวก ข.....	70
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	72

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การใช้งานของโลหะผสมพิเศษในอุตสาหกรรมต่างๆ.....	7
2.2	ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด Haynes 214.....	8
2.3	หน้าที่ของธาตุผสมต่างแต่ละธาตุในโลหะผสมพิเศษ.....	10
2.4	สมบัติทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล.....	11
2.5	แสดงสารประกอบเชิงโลหะชนิดต่างๆ ระหว่างนิกเกิลและอะลูมิเนียม.....	16
3.1	แสดงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาด้วยเตา muffle.....	19
4.1	ความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง.....	35
4.2	ความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง.....	36
4.3	ความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง.....	37
4.4	ความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง.....	39
4.5	ความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง.....	40
4.6	ความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง.....	41
4.7	ค่าคงที่ปฏิกิริยา (ความชัน, k) และ $\ln k$ ของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง.....	42
4.8	ค่าคงที่ปฏิกิริยา (ความชัน, k) และ $\ln k$ ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง.....	44
ก.1	แสดงความหนาชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 ที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นไมครอน).....	56
ก.2	แสดงความหนาชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 ที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1,	57

ตารางที่	หน้า
	2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นไมครอน).....
ก.3	58
	แสดงความหนาชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 ที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นไมครอน).....
ก.4	59
	แสดงความหนาชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 ที่ไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นไมครอน).....
ก.5	60
	แสดงความหนาชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 ที่ไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นไมครอน).....
ก.6	61
	แสดงความหนาชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 ที่ไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นไมครอน).....
ก.7	62
	ความแข็งของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 ที่ผ่านการใช้งาน และผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นHV).....
ก.8	63
	ความแข็งของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 ที่ผ่านการใช้งาน และผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นHV).....
ก.9	64
	ความแข็งของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 ที่ผ่านการใช้งาน และผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นHV).....
ก.10	65
	ความแข็งของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 ที่ไม่ผ่านการใช้งาน และผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นHV).....
ก.11	66
	ความแข็งของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 ที่ไม่ผ่านการใช้งาน และผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นHV).....

ตารางที่		หน้า
ก.12	ความแข็งของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 ที่ไม่ผ่านการใช้งาน และผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นHV).....	67
ก.13	น้ำหนักของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 จากการทดสอบการสึกหรอ โดยวิธี PIN ON DISC (หน่วยเป็นกรัม).....	68
ก.14	อัตราส่วนของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงจากน้ำหนักเริ่มต้นต่อพื้นที่ผิว ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 ที่ไม่ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง และการผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 6.25 ชั่วโมง เมื่อทำการทดสอบออกซิเดชันแบบวัฏจักรที่ อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส (หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร).....	69
ข.	Reference pattern ของ Ni, Al, Ni ₂ Al ₃ และ NiAl ₃	70

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างผลึกแบบ FCC ของเฟสแกมมา (ซ้าย) และผลึกแบบ primitive cubic ของเฟสแกมมาไพร์ม (ขวา).....	8
2.2	ลักษณะคาร์ไบด์ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล.....	9
2.3	ตัวอย่างการใช้งานของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด Haynes 214 (ซ้าย) Honeycomb Seals (ขวา) Mesh Belt ในสายพานลำเลียงเครื่องปั้นดินเผา.....	13
2.4	แผนภูมิสมดุลของสารประกอบเชิงโลหะของนิกเกิล-อะลูมิเนียม.....	16
4.1	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน (ซ้าย) และชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน (ขวา).....	21
4.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นของวัสดุกับขนาดเกรน.....	22
4.3	ผลการตรวจสอบชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน ด้วยวิธี GIXD.....	22
4.4	ภาพถ่ายชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง.....	23
4.5	ภาพถ่ายชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง.....	24
4.6	ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD.....	26
4.7	ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน และผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD.....	28
4.8	แผนภูมิสมดุลระหว่างอะลูมิเนียมและนิกเกิล.....	29
4.9	โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง.....	31

รูปที่	หน้า
4.10	34
โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง.....	
4.11	35
กราฟเส้นความหนาของชั้นเคลือบกับรากที่สองของเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิงของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส.....	
4.12	36
กราฟเส้นความหนาของชั้นเคลือบกับรากที่สองของเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิงของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	
4.13	37
กราฟเส้นความหนาของชั้นเคลือบกับรากที่สองของเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิงของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส.....	
4.14	39
กราฟเส้นความหนาของชั้นเคลือบกับรากที่สองของเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิงของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส.....	
4.15	40
กราฟเส้นความหนาของชั้นเคลือบกับรากที่สองของเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิงของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	
4.16	41
กราฟเส้นความหนาของชั้นเคลือบกับรากที่สองของเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิงของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส.....	
4.17	43
กราฟแสดงลอการิทึมธรรมชาติของปฏิกิริยา ($\ln k$) กับอินเวอร์สของอุณหภูมิ ($1/T$) ของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง.....	
4.18	44
กราฟแสดงลอการิทึมธรรมชาติของปฏิกิริยา ($\ln k$) กับอินเวอร์สของอุณหภูมิ ($1/T$) ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง.....	
4.19	45
ผลการเปรียบเทียบความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง.....	

รูปที่	หน้า
4.20 ผลการเปรียบเทียบความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่ อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง.....	46
4.21 อัตราการสึกหรอจำเพาะของชิ้นงานจากการทดสอบการสึกหรอ.....	47
4.22 ผิวสัมผัสของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง ที่ผ่านการทดสอบการ สึกหรอ.....	48
4.23 ผิวสัมผัสของชิ้นงานที่ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง ที่ผ่านการทดสอบการ สึกหรอ.....	48
4.24 น้ำหนักของชิ้นงานหลังจากผ่านการทดสอบการเกิดออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	49

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด Haynes 214 มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานที่มีความเค้นต่ำ อุณหภูมิที่ใช้งานสูง และบรรยากาศที่มีลักษณะเป็นออกซิเดชัน โดยอาศัยการสร้างฟิล์มของ Al_2O_3 และ Cr_2O_3 เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน และสามารถใช้งานได้ทั้งต่อเนื่อง หรือเป็นบางช่วง จึงมีการนำไปใช้งานเป็นส่วนเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ชิ้นส่วนรถยนต์ และใช้งานในเตาเผา อย่างไรก็ตามในสภาวะบรรยากาศที่เกิดออกซิเดชันอย่างรุนแรงผลของธาตุผสมที่เติมในเนื้อพื้่นของโลหะผสมพิเศษชนิด Haynes 214 ไม่เพียงพอที่จะต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ ซึ่งทำให้ชิ้นงานเสื่อมสภาพ และมีความเสี่ยงที่ชิ้นงานจะเสียหายขณะใช้งาน ดังนั้น จึงมีการศึกษาและวิจัยเพื่อปรับปรุงสมบัติผิวของโลหะผสมพิเศษนิกเกิลหลายวิธี โดยกระบวนการที่เป็นที่นิยม กระบวนการหนึ่ง คือ อะลูมิเนียมซิง(Aluminizing)

กระบวนการอะลูมิเนียมซิงที่ใช้งานกันมากในปัจจุบัน คือ กระบวนการอะลูมิเนียมซิงแบบ Pack cementation ซึ่งใช้ผงอะลูมิเนียมผสมกับผงอะลูมินาและผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ในวิธีนี้ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการรวมตัวของคลอรีนและอะลูมิเนียมได้เป็นอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) ในสถานะก๊าซซึ่งจะสัมผัสกับผิวของวัสดุอย่างทั่วถึง แล้วแตกตัวให้อะตอมอะลูมิเนียมแพร่เข้าสู่ในเนื้อวัสดุ ทำให้เกิดชั้นสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมที่ผิวชิ้นงาน ซึ่งสารประกอบที่ได้จะมีสมบัติต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงได้ดี

ในงานวิจัยนี้ศึกษาโครงสร้างจุลภาค เฟส ความต้านทานการสึกหรอ และความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิและเวลาในการเผาชิ้นงานที่แตกต่างกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการ pack aluminizing ต่อ ความหนาชั้นเคลือบและชนิดสารประกอบที่เกิดขึ้นที่ผิวของโลหะผสมพิเศษนิกเกิล Haynes 214
2. ศึกษาอัตราการเกิดสารประกอบของกระบวนการ pack aluminizing
3. ศึกษาผลของกระบวนการ pack aluminizing ต่อความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน และความต้านทานการสึกหรอ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการ pack aluminizing ในช่วงอุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง
2. ศึกษาการเกิดออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 104 ชั่วโมง
3. ศึกษาการเกิดการสึกหรอ โดยวิธีพินอินดิคส์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบชนิดของสารประกอบที่เกิดจากกระบวนการ pack aluminizing กับโลหะผสมพิเศษ นิกเกิล
2. ทราบอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ pack aluminizing กับโลหะผสมพิเศษนิกเกิล
3. เข้าใจกระบวนการ pack aluminizing

บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรม

2.1 โลหะผสมพิเศษ [1-2]

โลหะผสมพิเศษเป็นกลุ่มของโลหะผสมที่มีสมบัติที่สำคัญ คือ มีความแข็งแรง (Strength) สูง อุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งดีกว่าโลหะผสมชนิดอื่นๆ อีกทั้งมีความทนทานต่อภาระที่มีแรงกระทำ (Load) ที่อุณหภูมิสูง มีความแข็งแรงต่อการเกิดความคืบ (Creep Strength) ได้ดี ที่อุณหภูมิสูง ทนทานต่อความล้าที่อุณหภูมิสูงทั้งจำนวนรอบสูงและต่ำ ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบสลับไปมา มีอัตราการขยายตัวทางความร้อนต่ำและมีการนำความร้อนสูง นอกจากนี้ โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลต่างๆ มีความเสถียรสูงเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานานๆ ทนต่อบรรยากาศการกัดกร่อนที่รุนแรงและออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง และสามารถทำการเชื่อมได้ง่าย รวมทั้งสามารถทำการขึ้นรูปได้ง่าย โดยเฉพาะในกลุ่มโลหะผสมขึ้นรูปทางกล (Wrought)

การใช้งานส่วนใหญ่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมกังหันก๊าซ รวมทั้งชิ้นส่วนอื่นๆ ที่ต้องรับแรงที่อุณหภูมิสูงๆ สำหรับเครื่องบินรบ เครื่องบินโดยสาร เรือเดินสมุทร รวมทั้งในโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ อุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมี นอกจากนี้ยังใช้ทำเป็นชิ้นส่วนในยานอวกาศ เครื่องยนต์ขับเคลื่อนของจรวด เตาปฏิกรณ์ปรมาณู เรือดำน้ำ และการประยุกต์ใช้สำหรับงานอื่นๆ หรือสภาวะที่ต้องทนอุณหภูมิสูง

โดยทั่วไปแล้วในโลหะผสมพิเศษจะมีส่วนผสมของธาตุชนิดต่างๆ อยู่รวมกันราว 8-10 ธาตุขึ้นไป ตัวอย่างเช่น มีธาตุ निकิล โคโรเมียม โคบอลต์ โมลิบดีนัม อลูมิเนียม ไทเทเนียม เหล็ก คาร์บอน โบรอน เซอร์โคเนียม ทังสแตน และอื่นๆ โดยที่ถ้าโลหะผสมพิเศษตัวใดที่มีปริมาณธาตุนิกิล หรือโคบอลต์ หรือเหล็กสูงกว่าธาตุอื่นๆ โลหะผสมพิเศษก็จะเป็นโลหะผสมพิเศษพื้นของธาตุนั้นๆ ธาตุแต่ละตัวในโลหะผสมพิเศษก็จะมีหน้าที่ต่างๆ กันในการช่วยให้โลหะผสมพิเศษนั้นๆ สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานานๆ รวมทั้งยังมีความแข็งแรงสูงด้วย

2.1.1 ชนิดของโลหะผสมพิเศษ [3]

โลหะผสมพิเศษ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มหลัก คือ

2.1.1.1 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกิล (Nickel base superalloys)

มีส่วนผสมทางเคมี เป็นนิกิล ซึ่งเป็นส่วนผสมหลัก และมีการเติมธาตุอื่นๆลงไปอีกหลายธาตุ ที่สำคัญคือโคโรเมียม ซึ่งโคโรเมียมจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงเนื่องจากการเกิดสารละลายของแข็ง (Solid Solution Strengthening) และเมื่อเติมไทเทเนียมร้อยละ 2.25 โดยน้ำหนัก หรืออะลูมิเนียมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก จะเกิด $Ni_3(Al, Ti)$ ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังมีธาตุ

ชนิดอื่น อาทิเช่น โมลิบดีนัม โคบอลต์ ไนโอเบียม และอื่นๆ ผสมอยู่เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของ โลหะผสมพิเศษ และในปัจจุบันโลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้มีการใช้งานมากที่สุด และกลุ่มโลหะพิเศษ เนื้อพื้นนิเกิลที่มีการใช้งานแพร่หลายมากที่สุดมีโครเมียมผสมอยู่ประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

2.1.1.2 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิล-เหล็ก (Nickel-Iron base superalloys)

มีส่วนผสมทางเคมีเป็นนิเกิลร้อยละ 25-60 โดยน้ำหนัก มีเหล็กร้อยละ 15-60 โดยน้ำหนัก เป็นส่วนผสมหลัก โลหะผสมพิเศษในกลุ่มนี้มีราคาถูกกว่ากลุ่มอื่น เนื่องจากนำเหล็กมาแทนนิเกิล บางส่วน แต่การใช้งานที่อุณหภูมิสูงไม่ดีเท่าโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิล นอกจากนี้เมื่อเติมธาตุ อื่นลงไป เช่น ไทเทเนียม อลูมิเนียม ไนโอเบียมจะสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ โดยผ่าน กระบวนการชุบแข็งแบบตกตะกอน (Precipitation hardening) โครเมียม ช่วยเพิ่มความต้านทานการ กัดกร่อน ส่วน โมลิบดีนัมช่วยเพิ่มความแข็งแรงโดยการเกิดสารละลายของแข็ง

2.1.1.3 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นโคบอลต์ (Cobalt base superalloys)

ส่วนผสมทางเคมีเป็นโคบอลต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และโครเมียมร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ซึ่งโครงสร้างจุลภาคของโลหะกลุ่มนี้ประกอบด้วยโครงสร้างพื้นเป็นเฟสเซ็นเตอร์คิวบิกและมีคาร์ไบด์ชนิดต่างๆเป็นองค์ประกอบ ความแข็งแรงของโลหะผสมนี้ได้จากสารละลายของแข็งและ คาร์ไบด์ โดยมีสมบัติเด่นคือ สามารถทนต่อการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงได้ดีมาก รวมทั้งยังสามารถ ใช้งานที่ต้องรับแรงขึ้นต่ำหรือปานกลางที่อุณหภูมิสูงกว่าพวกกลุ่มโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิล อีกด้วย การพัฒนาโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นโคบอลต์มีไม่มากนักเนื่องจากราคาของโคบอลต์แพง มาก จึงหันไปพัฒนาโดยการหาธาตุอื่นที่ราคาถูกกว่าโคบอลต์มาใช้แทน

2.1.2 สมบัติของโลหะผสมพิเศษ [2]

2.1.2.1 สมบัติทางกล

โลหะผสมพิเศษเหล่านี้ มีโครงสร้างแบบเฟสเซ็นเตอร์คิวบิก (Face Centered Cubic, FCC) หรือมีโครงสร้างพื้น (Matrix) เป็น โครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite) ซึ่งมีความแข็งแรงเชิงกล ต่างๆ เช่น ความต้านทานแรงดึง (tensile) การยืดขาด (Rupture) ความคืบ (Creep) ที่อุณหภูมิสูง ดีกว่าโลหะผสมแบบอื่นที่มีโครงสร้างแบบบอดีเซ็นเตอร์คิวบิก (Body Centered Cubic, BCC) รวมทั้งมีความยืดหยุ่น (Ductility) ความต้านทานต่อแรงกระแทกที่ดี ความสามารถต้านทาน ต่อความล้าที่รอบต่ำและสูง และความต้านทานความล้าจากอุณหภูมิสูงได้ดีเยี่ยม นอกจากนี้ โครงสร้างแบบ FCC นี้มีความสามารถในการละลายธาตุอื่นให้เข้าไปผสมกับตัวเอง และมีความสามารถในการควบคุมการตกตะกอน (Precipitation) ของเฟสอินเทอร์เมทัลลิก (Intermetallic phases) เช่น แกมมาไพร์ม (Gamma Prime, γ') หรือ แกมมาดับเบิลไพร์ม (Gamma Double Prime, γ'') เพื่อสร้างความแข็งแรงของโลหะผสมพิเศษ

ซึ่งโดยทั่วไปความแข็งแรงของโลหะผสมพิเศษได้มาจาก

1. การตกตะกอนของของแข็ง (Precipitation strengthening) คือ เฟสที่สอง เช่น γ' และ γ'' ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากอะลูมิเนียมและไทเทเนียม
2. สารละลายของแข็ง (Solid Solution Strengthening) เนื่องจากธาตุอื่นๆที่เติม ที่มีขนาดของอะตอมแตกต่างกัน ได้แก่ โครเมียม โมลิบดีนัม อะลูมิเนียม ไนโอเบียม ไทเทเนียมและธาตุอื่นๆ
3. การตกตะกอนของคาร์ไบด์ (Carbide precipitation) ทั้งในเกรนและขอบเกรน โดยเฉพาะในโลหะผสมพิเศษที่มีโครงสร้างแบบพหุผลึกที่ได้จากการหล่อและการรีด

2.1.2.2 ลักษณะทางกายภาพ

2.1.2.2.1 ความหนาแน่น (Density)

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิล-เหล็กมีความหนาแน่นต่ำที่สุดในกลุ่มโลหะผสมพิเศษ เนื่องจากเหล็กมีความหนาแน่นต่ำกว่านิเกิลและโคบอลต์ สำหรับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลความหนาแน่นขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดธาตุที่ผสม เช่น ถ้าโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลมีอะลูมิเนียมและไทเทเนียมผสมอยู่มาก จะมีความหนาแน่นต่ำ 0.28 lb/in^3 แต่ถ้าโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลมีทั้งสแตนเลสและแทนทาลัมผสมอยู่มาก จะมีความหนาแน่นสูง 0.326 lb/in^3 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นโคบอลต์มีความหนาแน่นสูงที่สุด อยู่ในช่วงประมาณ $0.31\text{-}0.335 \text{ lb/in}^3$ ซึ่งความหนาแน่นมีความสำคัญต่อแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

2.1.2.2.2 การขยายตัวจากความร้อน (Thermal expansion)

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลและโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นโคบอลต์มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนใกล้เคียงกันและมีค่าต่ำกว่าโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิล-เหล็ก ซึ่งสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำเป็นที่ต้องการ เนื่องจากทำให้เกิดความเค้นเนื่องจากความร้อนต่ำที่สุด ป้องกันการเกิดการแตกหักโดยความล้าเนื่องจากความร้อน (Thermal fatigue cracking)

2.1.2.2.3 การนำความร้อน (Thermal Conductivity)

โลหะผสมพิเศษเหล่านี้โดยปกติถูกใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูง ดังนั้นการนำความร้อนที่ดีเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อถ่ายเทความร้อนออกไป เพื่อให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้อยที่สุด เป็นผลให้ลดแนวโน้มที่จะเกิดความเค้นจากความร้อนและการแตกหักโดยความล้าเนื่องจากความร้อน

2.1.2.2.4 ความไม่เสถียรของเฟส (Phase Instability)

เฟสที่ปรากฏอยู่ในโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษ ไม่ได้อยู่ในสภาวะสมดุลตั้งแต่แรก แต่มีแนวโน้มที่เปลี่ยนเข้าสู่สมดุล ถ้าใช้งานที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลง

ของเฟสต่างๆนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและระยะเวลาที่ได้รับความร้อน ความไม่เสถียรของเฟสนั้นๆ สามารถส่งผลให้เกิดเป็นเฟสที่อ่อนแอหรือเปราะ ซึ่งเป็นเฟสที่ไม่ต้องการในโครงสร้าง เช่น σ , Delta และ Lave และการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานาน เฟส γ' และ/หรือ γ'' ก็จะมีขนาดใหญ่มากขึ้น ซึ่งส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation) ที่อุณหภูมิสูงอีกด้วย ยิ่งไปกว่านั้นในการใช้งานโลหะผสมพิเศษที่มีสภาวะใกล้เคียงกับการรับความเค้น และต้องรับภาระที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานานจะทำให้มีโอกาสเกิดช่องว่างเล็กๆ (Micro Voids) มากมายอยู่ที่ขอบผลึก และเมื่อต้องรับภาระที่มีแรงมากระทำ (Load) นานขึ้นอีกก็จะทำให้ช่องว่างเล็กๆ เหล่านี้เชื่อมต่อกัน และทำให้เกิดการแตกหักแบบผ่านเกรนเนื่องจากความเค้นตามมา สำหรับโลหะผสมพิเศษเนื้อพินิกเกิลนั้นมีข้อได้เปรียบโลหะผสมพิเศษเนื้อพินชนิดอื่น เพราะเมื่อมีการผสมธาตุอื่นๆไป จะไม่ก่อให้เกิดเฟสที่ไม่ต้องการขึ้นมาในโครงสร้าง

2.1.2.3 ความเสถียรของผิว (Surface stability)

ไอแก๊สร้อนความร้อนสูงที่เกิดจาก Compression และ combustion ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของชิ้นส่วนจากการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง

2.1.2.3.1 การเกิดออกซิเดชัน (Oxidation)

เป็นปฏิกิริยาของโลหะผสมกับก๊าซออกซิเจนในระหว่างการเผาไหม้ ของเชื้อเพลิงที่สะอาดปราศจากสิ่งเจือปน เช่น ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ หรือวานาเดียม การต้านการเกิดออกซิเดชันที่ดีนั้นเป็นมาจากการเกิดออกไซด์ที่ผิวซึ่งงานอย่างต่อเนื่องและมีความแน่น เสมือนเป็น Diffuse barrier และไม่หลุดร่วงระหว่างวัฏจักรความร้อน โดยทั่วไปโลหะผสมพิเศษเนื้อพินิกเกิล-โครเมียม ที่ผสมอะลูมิเนียมสูง เช่น IN-713C และ B4900 มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันที่ดีเยี่ยม เนื่องจากมีความสามารถที่จะเกิดออกไซด์แบบ Cr_2O_3 และ Al_2O_3 [4] และโลหะผสมพิเศษเนื้อพินิกเกิลยังมีความต้านทานการเกิดออกซิเดชันสูงกว่าโลหะผสมพิเศษเนื้อพินโคบอลต์ด้วยส่วนธาตุอิทเรียม แทนทาลัม ซีเรียม ช่วยเพิ่มความสามารถของฟิล์มที่ผิวซึ่งงานได้ และเพิ่มการต้านการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมพิเศษเนื้อพินโคบอลต์และโลหะผสมพิเศษเนื้อพินิกเกิล-เหล็ก เทียบเท่าได้กับโลหะผสมพิเศษเนื้อพินโครเมียม

2.1.2.3.2 การกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง (Hot Corrosion)

การกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงเป็นผลมาจากการเกิดออกซิเดชันธรรมดา ทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ และธาตุเจือปนอื่นๆ ที่อยู่ในอากาศหรือเชื้อเพลิง ความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นอยู่กับปริมาณโครเมียม สำหรับโลหะผสมพิเศษเนื้อพินโคบอลต์ส่วนใหญ่จะมีโครเมียมมากกว่าโลหะผสมพิเศษอื่นๆ เนื่องจากความต้องการความต้านทานการกัดกร่อนสูง

ดังนั้นโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นโคบอลต์จะต้านทานต่อการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงกว่าโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล

2.1.3 การใช้งานโลหะผสมพิเศษ

โลหะผสมพิเศษจะถูกใช้งานเป็นชิ้นส่วนหลักๆของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ(gas turbine engine)ซึ่งทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่า 550 องศาเซลเซียสและอาจสูงถึง 1200 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะใบพัดกังหันก๊าซ (Turbine Blades) และโลหะผสมพิเศษจะถูกใช้เป็นชิ้นส่วนในเครื่องบิน เรือเดินสมุทร เครื่องยนต์กังหันก๊าซสำหรับยานพาหนะและสำหรับผลิตไฟฟ้า ยานอวกาศ เครื่องยนต์ของจรวด ชิ้นส่วนในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู เรือดำน้ำ โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ อุปกรณ์ทางด้านปิโตรเคมี และสำหรับใช้งานด้านอื่นๆ ที่ต้องทนต่ออุณหภูมิสูง การใช้งานส่วนใหญ่ของโลหะผสมพิเศษจะถูกนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนประกอบในเครื่องยนต์กังหันก๊าซสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า

โดยทั่วไปแล้วโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลจะถูกใช้เป็นชิ้นส่วนที่ต้องมีการเคลื่อนที่ และโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นโคบอลต์จะถูกใช้เป็นชิ้นส่วนที่อยู่กับที่เนื่องจากมีน้ำหนักมากกว่า ตารางที่ 2.1 การใช้งานของโลหะผสมพิเศษในอุตสาหกรรมต่างๆ

ประเภทอุตสาหกรรม	ปริมาณการใช้
อุตสาหกรรมอวกาศยาน (Aerospace) :	
ส่วนใบพัดกังหันก๊าซ (Gas Turbine)	72%
ส่วนโครงสร้างอวกาศยาน (Airframe)	8%
อุตสาหกรรมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Power Generation) :	
ส่วนใบพัดกังหันก๊าซ (Gas Turbine)	10%
ส่วนงานนิวเคลียร์ (Nuclear)	2%
ส่วนงานเชื้อเพลิง/ถ่านหิน (Fossil)	1%
อุตสาหกรรมเคมี (Chemical)	6%
อุตสาหกรรมอื่นๆ (Miscellaneous)	1%

2.2 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล ชนิด Haynes 214 [5]

โลหะผสมที่มีส่วนประกอบหลักคือ นิกเกิล โครเมียม อะลูมิเนียม และเหล็ก มีวัตถุประสงค์หลักสำหรับใช้งานที่อุณหภูมิตั้งแต่ 955 องศาเซลเซียส ขึ้นไป

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิล ชนิด Haynes 214

Nominal Chemical Composition, Weight Percent									
Ni	Cr	Al	Fe	Mn	Si	Zr	C	B	Y
75 ^a	16	4.5	3	0.5*	0.2*	0.1*	0.05	0.01*	0.01

^a As Balance *Maximum

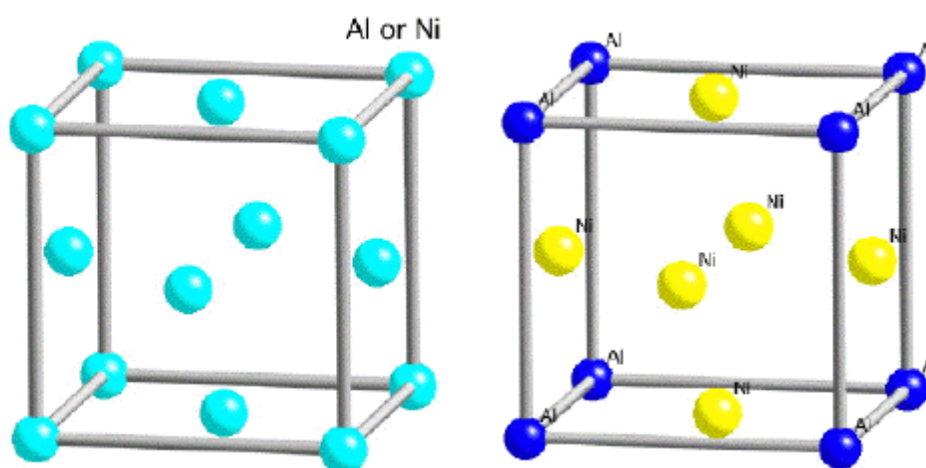
โลหะผสมเนื้อพื้่นนิกเกิล ชนิด Haynes 214 คล้ายคลึงกับโลหะผสมเนื้อพื้่นนิกเกิลที่มีปริมาณอะลูมิเนียมสูงชนิดอื่น ซึ่งมีแนวโน้มเกิดการบ่มแข็ง (age-hardened) เมื่อทำกรรมวิธีความร้อนที่อุณหภูมิปานกลาง

โลหะผสมเนื้อพื้่นนิกเกิล ชนิด Haynes 214 ถ้าใช้งานในอุณหภูมิช่วง 595-925 องศาเซลเซียส จะเกิดความแข็งแรงจากการสร้างของเฟสที่สอง คือ แกมมาไพร์ม ($\text{Ni}_3\text{Al,Ti}$) ซึ่งมีผลต่อการสูญเสียความเหนียว (Tensile ductility) ณ อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิปานกลาง จากที่กล่าวมาข้างต้นโลหะผสมนิกเกิล ชนิด Haynes 214 เสี่ยงที่จะเกิด strain-age cracking เมื่อรับความเค้น (stress) อย่างมาก หรือรับความเครียดอย่างมากซ้ำๆ

2.2.1 โครงสร้างจุลภาคและเฟสของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิล [6]

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิล มีโครงสร้างหลักอยู่ 3 ประเภท คือ

2.2.1.1 เนื้อพื้่นแกมมา (γ) เป็นเนื้อพื้่นที่มีโครงสร้างแบบ FCC ดังแสดงในรูปที่ 1 ซ้ายมือ มักจะมีธาตุที่เป็นสารละลายของแข็งผสมอยู่ เช่น โคบอลต์, โครเมียม, โมลิบดีนัม และ ทังสแตน สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง $0.9T_M$ (จุดหลอมเหลว) และที่อุณหภูมิต่ำ สามารถใช้งานได้เป็นเวลานานถึง 100,000 ชั่วโมง



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกแบบ FCC ของเฟสแกมมา (ซ้าย) และผลึกแบบ primitive cubic ของเฟสแกมมาไพร์ม (ขวา) [7]

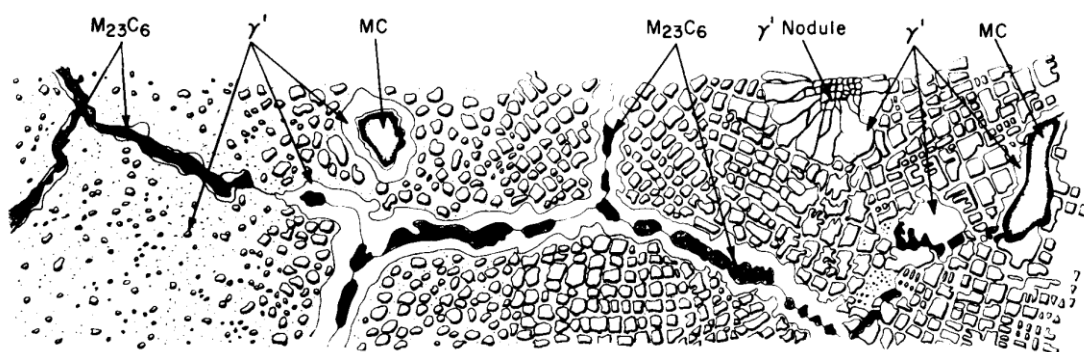
2.2.1.2 แกมมาไพร์ม (γ') เป็นสารประกอบระหว่างโลหะ มีโครงสร้างเป็น FCC ดังแสดงในรูปที่ 1 ขวามือ สูตรทางเคมี คือ A_3B ได้แก่ $Ni_3(Al, Ti)$ และ $(Ni,Co)_3(Al, Ti)$ เป็นโครงสร้างที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง ด้วยกลไกการขัดขวางการเคลื่อนที่ของ Dislocation และการเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านระหว่างแกมมาและแกมมาไพร์ม อีกทั้งพบว่าความแข็งแรงของแกมมาไพร์ม จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ความสามารถในการยึดหยุ่นของแกมมาไพร์มจะช่วยป้องกันการเกิดการแตกหัก(Fracture) ได้ ส่วนความต้านทานการความเค้นจะมีค่าลดลงขณะที่ปริมาณแกมมาไพร์มมีค่าเพิ่มขึ้น

2.2.1.3 คาร์ไบด์ เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งและเปราะ คาร์ไบด์ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลจะมีการกระจายตัวอยู่ตามขอบเกรน ดังแสดงในรูปที่ 2 ถ้าอนุภาคคาร์ไบด์มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอจะทำให้โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงเป็นอย่างมาก แต่ถ้าคาร์ไบด์มีการเกาะตัวต่อเนื่องเป็นแนวตามขอบเกรนหรืออยู่ในลักษณะแบบฟิล์มจะทำให้เกิดการแตกได้ง่าย แบ่งตามส่วนผสมทางเคมีได้ดังนี้

2.2.1.3.1 MC เกิดในช่วงแรกของการแข็งตัว มีความเสถียรสูง โลหะที่มักเกิดเป็นคาร์ไบด์ได้แก่ ไทเทเนียม, แทนทาลัม, โคบอลต์, ทังสแตน

2.2.1.3.2 $M_{23}C_6$ เกิดระหว่างการทำความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ หรือการใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 760-980 องศาเซลเซียส หรืออาจเกิดจากการสลายตัวของ MC ก็ได้ มักเกิดที่ขอบเกรน โลหะที่มักเกิดเป็นคาร์ไบด์ ได้แก่ โครเมียม, เหล็ก, โมลิบดีนัม, ทังสแตน

2.2.1.3.3 M_6C เกิดช่วงอุณหภูมิ 815-980 องศาเซลเซียส จะเกิดได้เมื่อปริมาณของทังสแตนและ โมลิบดีนัมมากกว่า 6-8%



รูปที่ 2.2 ลักษณะคาร์ไบด์ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิล [2]

2.2.2 ธาตุผสมในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล [8]

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลจะมีธาตุอื่นๆผสมอยู่หลายธาตุ เช่น โครเมียม โคบอลต์ โมลิบดีนัม ทังสแตน แทนทาลัม โคลัมเบียม (ในโอเบียม) อะลูมิเนียม ไทเทเนียม เหล็ก แมงกานีส ซิลิกอน คาร์บอน โบรอน เซอร์โคเนียม และอื่นๆ

สามารถแบ่งธาตุผสมเป็น 3 กลุ่มหลักๆ คือ

2.2.2.1 ธาตุที่ประกอบเป็นเนื้อพื้่น FCC เช่น นิกเกิล โคบอลต์ เหล็ก โครเมียม โมลิบดีนัม ทังสแตน และวานาเดียม

2.2.2.2 ธาตุที่ประกอบเป็นเฟส γ' (Ni_3M) เช่น อะลูมิเนียม ไทเทเนียม ในโอเบียม และ แทนทาลัม

2.2.2.3 ธาตุที่แยกตัวอยู่ตามขอบผลึก เช่น แมงกานีส โบรอน คาร์บอน และเซอร์โคเนียม

ตารางที่ 2.3 หน้าที่ของธาตุผสมต่างแต่ละธาตุในโลหะผสมพิเศษ [8]

หน้าที่	ธาตุ
ช่วยให้เกิดสารละลายของแข็ง	Co, Cr, Fe, Mo, W, Ta
สร้างคาร์ไบด์:	
ชนิด MC	W, Ta, Ti, Mo, Nb
ชนิด M_7C_3	Cr
ชนิด $M_{23}C_6$	Cr, Mo, W
ชนิด M_6C	Mo, W
คาร์โบไนไตรด์(Carbonitrides): ชนิด M (CN)	C, N
ต้านทานการเกิดออกซิเดชัน	Al, Cr
ปรับปรุงความต้านทานการกัดกร่อนแบบร้อน	La, Th
ต้านทานการทำปฏิกิริยากับสารประกอบกำมะถัน (Sulfidation)	Cr
ปรับปรุงคุณสมบัติความคืบ	B
เพิ่มความแข็งแรงต่อการขีดขาด	B
ทำให้เกิดการแยกตัวของขอบเกรน	B, C, Cr

2.2.3 สมบัติทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล [2]

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลมีสมบัติที่ดีหลายด้าน เช่น มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง ต้านทานการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง และเพิ่มความแข็งแรง อีกทั้งยังมีสมบัติอื่นๆ ที่แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 2.4 สมบัติทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล [2]

ความหนาแน่นโดยทั่วไป	7.9-8.5 g cm ⁻²
Yield strength	800-1200 MPa
Tensile strength	1250-1450 MPa
อุณหภูมิการใช้งานโดยทั่วไป	650-1100 องศาเซลเซียส

2.2.4 กรรมวิธีทางความร้อนของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด Haynes 214

โดยทั่วไปโลหะผสมเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด Haynes 214 ถูกเตรียมใช้งานโดยการทำละลายด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (Solution heat-treated) ที่อุณหภูมิ 1095 องศาเซลเซียส และปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว หรือ Quench เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดีที่สุด การอบชุบความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมินี้ เป็นผลให้มีการตกตะกอนคาร์ไบด์ที่ขอบเกรน และกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 955 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟสแกมมาไพร์ม และการทำกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้จะไม่ถูกแนะนำให้ทำ

2.2.5 การต้านทานการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด Haynes 214

การเกิดออกซิเดชัน แบ่งได้ 3 แบบ แบบที่ 1 คือ general หรือ uniform oxidation เป็นการเกิดออกซิเดชันที่ผิวภายนอกโดยมีลักษณะสม่ำเสมอทั่วทั้งผิวเหมือนเป็นฟิล์มป้องกัน แบบที่ 2 คือ intergranular oxidation ซึ่งเป็นการเกิดออกซิเดชันตามขอบเกรน และอาจแพร่ลึกเข้าไปในเนื้อผิว และแบบที่ 3 คือ internal oxidation เป็นการเกิดออกซิเดชันข้างใต้ผิวภายนอก แต่ไม่ใช่ที่ขอบเกรน โดยการเกิดออกซิเดชันสองแบบหลังนี้ค่อนข้างจะส่งผลเสียต่อเนื้อวัสดุมากกว่า

การใช้งานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดออกไซด์ หลายชนิดทั้งออกไซด์ที่เกิดจากโลหะพื้นและจากธาตุที่เติมเข้าไปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติต่างๆ ออกไซด์ที่อาจเกิดขึ้นได้แก่ Chromic oxide (Cr₂O₃), Aluminum oxide (Al₂O₃), Nickel oxide (NiO), Cobalt oxide (CoO) และ Spinel (NiO.Cr₂O₃) เป็นต้น

ซึ่งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 870 องศาเซลเซียส นั้น การเกิดออกซิเดชันจะเกิดในลักษณะที่เรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (uniform oxidation) ซึ่งไม่ก่อให้เกิดปัญหา แต่เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า 870 องศาเซลเซียส จะก่อให้เกิดออกซิเดชันที่รุนแรงและเป็นปัญหา

ความสามารถในการป้องกันการเกิดออกซิเดชันของออกไซด์แต่ละชนิดจะแตกต่างกัน โดยจากข้อดีที่มีอัตราการโตต่ำ จึงทำให้ฟิล์มออกไซด์ Al₂O₃ และ Cr₂O₃ เป็นตัวป้องกันที่ดีที่สุดในการบรรดาออกไซด์ที่กล่าวมาข้างต้น [9]

โลหะผสมเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด Haynes 214 ถูกออกแบบให้ดีที่สุดในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง ซึ่งดีกว่าโลหะผสมขึ้นรูปทางกลชนิดออสเทนนิติก (wrought austenitic)

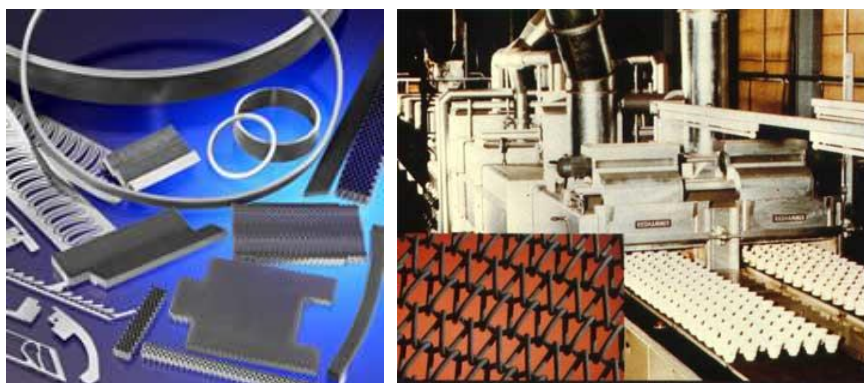
ทั่วไป มีวัตถุประสงค์หลักสำหรับใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 955-1315 องศาเซลเซียส ซึ่งสมบัติที่สามารถสร้าง Al_2O_3 เป็นออกไซด์ฟิล์มชนิดที่ป้องกันตัวเองและยึดแน่นกับเนื้อพื้น ซึ่งที่อุณหภูมิสูงนี้มักเกิด Al_2O_3 มากกว่าออกไซด์ของโครเมียม

ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 955 องศาเซลเซียส โลหะผสมเนื้อพื้นนิกเกิล ชนิด Haynes 214 จะเริ่มมีออกไซด์ ซึ่งเป็นการผสมกันของโครเมียมและอะลูมิเนียมออกไซด์ การผสมกันแบบนี้ให้การป้องกันค่อนข้างน้อยกว่าข้างต้น แต่ยังคงมีความต้านทานการเกิดออกซิเดชันเท่ากับโลหะผสมเนื้อพื้นนิกเกิลชนิดที่ดีที่สุดอื่นๆ

ซึ่งอุณหภูมิสูงกว่า 980 องศาเซลเซียส ต้องการความหนาของ Al_2O_3 ที่เพียงพอในเวลาที่เหมาะสม เนื่องจากถ้าชั้นของ Al_2O_3 ถูกกัดกร่อนโดยแก๊สร้อน หรือถูกถูหรือขูดให้หลุดออกโดยบั้งเอิญ และยังคงดำเนินปฏิกิริยาต่อไปในขณะที่ชั้นป้องกันยังไม่เกิดขึ้นใหม่อย่างรวดเร็ว จะทำให้เกิดออกซิเดชันที่รุนแรงมาก อย่างไรก็ตาม ปริมาณของอะลูมิเนียมในโลหะผสมพิเศษหลายๆ ชนิดอาจไม่พอที่จะทำให้เกิด Al_2O_3 ที่ยาวนานพอเพื่อใช้ในการป้องกันออกซิเดชัน ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันการเกิดออกซิเดชันอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นเราจึงต้องอาศัยการเคลือบผิวเข้ามาช่วยนั่นเอง [10]

2.2.6 การใช้งานของโลหะผสมพิเศษนิกเกิล ชนิด Haynes 214

- ในอุตสาหกรรมเครื่องยนต์กังหันแก๊ส (Gas Turbine Engine) ใช้ทำชิ้นส่วน เช่น Honeycomb Seals, Combustor Splash Plates, และ Static Oxidation limited parts
- ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ทำชิ้นส่วนภายใน Catalytic Converter และชิ้นส่วนของ Burner Cup ใน Auxiliary Heaters สำหรับยานยนต์ทางทหาร
- ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูง เป็นการใช้งานที่เฉพาะเจาะจงอย่างมาก เช่น หมุดทนความร้อน (Refractory Anchors), Furnace Flame Hoods, Rotary Calciners for processing chloride compound
- ชิ้นส่วนของสายพานลำเลียงเครื่องปั้นดินเผา และงานอบชุบความร้อน ได้แก่ Mesh belt, Trays และ fixtures สำหรับเครื่องปั้นดินเผา และอบชุบความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 3



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการใช้งานของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิล ชนิด Haynes 214 (ซ้าย) Honeycomb Seals (ขวา) Mesh Belt ในสายพานลำเลียงเครื่องปั้นดินเผา

2.3 กระบวนการปรับปรุงผิวโดยวิธีอะลูมิเนียมไนซิง (Aluminizing)

โลหะผสมพิเศษ มีวิธีป้องกันไม่ให้ผิวของชิ้นงานถูกทำลายจากสิ่งแวดล้อมอยู่ 3 วิธีหลัก คือ 1.การเคลือบผิวด้วยอะลูมิเนียมไนด์ (aluminide coatings), 2. การหุ้มด้วยโลหะ (metallic claddings) หรือ overlay coatings และ 3.การเคลือบผิวด้วยแก้ว-เซรามิก (glass-ceramic coatings) [11-12] ซึ่งมักถูกนำมาใช้งานที่อุณหภูมิสูง กระบวนการเหล่านี้ทำให้เกิดการสร้างชั้นออกไซด์ซึ่งช่วยป้องกันผิวได้ดี ให้สามารถต้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่ใช้งานทั้งหมดได้

การเคลือบผิวด้วยอะลูมิเนียมไนด์ ซึ่งเป็นวิธีที่มีนิยมในการปรับปรุงความต้านทานการเกิดออกซิเดชันในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิล โดยอาศัยการแพร่ของอะตอมอะลูมิเนียมเข้าสู่ผิวหน้าของโลหะผสมพิเศษ ทำให้เกิดสารประกอบเชิงโลหะ (intermetallic compound) คือ โลหะอะลูมิเนียมไนด์ (MAI) เมื่อเกิดออกซิเดชันระหว่างการใช้งาน ชิ้นงานจะสร้างฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) บนผิวหน้าของอะลูมิเนียมไนด์และกลายเป็นชั้นป้องกันปฏิกิริยาของโลหะพื้่นกับสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ถ้าฟิล์มออกไซด์ที่ผิวหน้าถูกทำลายหรือบางส่วนหลุดล่อนออกเนื่องจากวัฏจักรความร้อน สารประกอบอะลูมิเนียมไนด์ที่อยู่ด้านล่างจะถูกเปิดออกอีก และจะเกิดการออกซิไดซ์เพื่อสร้างฟิล์มปกป้องกันอีก ซึ่งการเกิดฟิล์มนี้สามารถเกิดขึ้นเร็วเพียงพอที่จะป้องกันการกัดกร่อนในครั้งถัดไป จึงทำให้ความต้านทานต่อการกัดกร่อนของโลหะผสมเนื้อพื้่นนิกเกิล สูงขึ้น

2.3.1 การพิจารณาเชิงโลหวิทยา

ส่วนประกอบหลักของการเคลือบผิวด้วยอะลูมิเนียมไนด์ คือ สารประกอบเชิงโลหะของ NiAl ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ BCC ชนิด CsCl ถูกสร้างขึ้นโดยปฏิกิริยาเคมีเมื่อที่ผิวชิ้นงานมีอะลูมิเนียมมาก solid solution ตัวแรกที่ถูกแทนที่โดย intermediate compound Ni_3Al หรือ γ' ก่อนที่ปริมาณของอะลูมิเนียมจะถึงระดับที่เกิดการสร้างสารประกอบ NiAl หรือ β สารประกอบ Ni_3Al

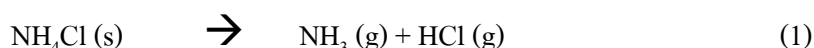
สามารถพบได้ทั่วไปในการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน intermediate ระหว่าง solid solution และ เฟส β

แนวโน้มน้ำที่ชัดเจนที่ทำให้เกิดการสร้างสรรค์ประกอบ NiAl ที่มีจุดหลอมเหลวสูงมาก (ประมาณ 1600 องศาเซลเซียส) นี้เนื่องจากมี heat of formation ที่มากถึง $-14 \text{ kcal g}^{-1} \text{ atom}^{-1}$ [13] ซึ่งมีค่าติดลบมากที่สุด เสถียรมากที่สุด ในบรรดาสารประกอบที่อยู่ใน binary system การเพิ่มปริมาณ อะลูมิเนียมทำให้เกิดเฟส δ หรือ Al_3Ni_2 ซึ่งมีความเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า แต่จะหลอมเหลวที่ อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

2.3.2 การทำอะลูมิเนียมในเชิงด้วยวิธี Pack Cementation [14]

Pack Cementation เป็นหนึ่งในวิธีที่ใช้สำหรับกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิง อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายไม่แพงเมื่อเทียบกับวิธีอื่น และสามารถเคลือบชิ้นงานที่มีขนาดเล็กได้ โดยนำ อะลูมิเนียม, อะลูมินา (Al_2O_3) และแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) มาผสมกัน แล้วใส่ลงไปใน ภาชนะ จากนั้นนำไปอบเพื่อให้เกิดการแพร่ของอะตอมอะลูมิเนียมเข้าไปในโลหะพื้น ซึ่งสารแต่ละตัวทำหน้าที่แตกต่างกันไปโดย อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ทำหน้าที่เป็นแหล่งที่มาของอะตอม อะลูมิเนียม ส่วนแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) จะทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้น (Activator) ให้ อะลูมิเนียมกลายสภาพจากของแข็งเป็นอะตอม และอะลูมินา (Al_2O_3) จะทำหน้าที่เสมือนธาตุเฉื่อย ป้องกันการหลอมติดกันเป็นก้อนของอะลูมิเนียม ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในวิธี Pack Cementation มี ดังนี้

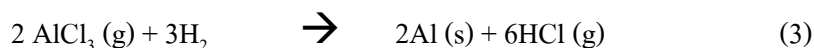
ที่อุณหภูมิสูง ตัวกระตุ้นจะแตกตัว ดังสมการที่ (1)



ผงอะลูมิเนียมจะเข้าทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นที่แตกตัวแล้วให้สารประกอบอะลูมิเนียมคลอไรด์ ดังสมการที่ (2)



อะลูมิเนียมคลอไรด์จะสลายตัวให้อะตอมอะลูมิเนียมที่ผิวโลหะพื้น ดังสมการที่ (3)



จากนั้นปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นซ้ำขั้นตอนที่ 2 และ 3 ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งอะลูมิเนียมในผงผสมหมด หรือหยุดการทดลองโดยการลดอุณหภูมิลง [15]

2.3.3 การแพร่ในวิธี pack aluminizing แบ่งตามโครงสร้างจุลภาคได้ 2 ชนิด [15]

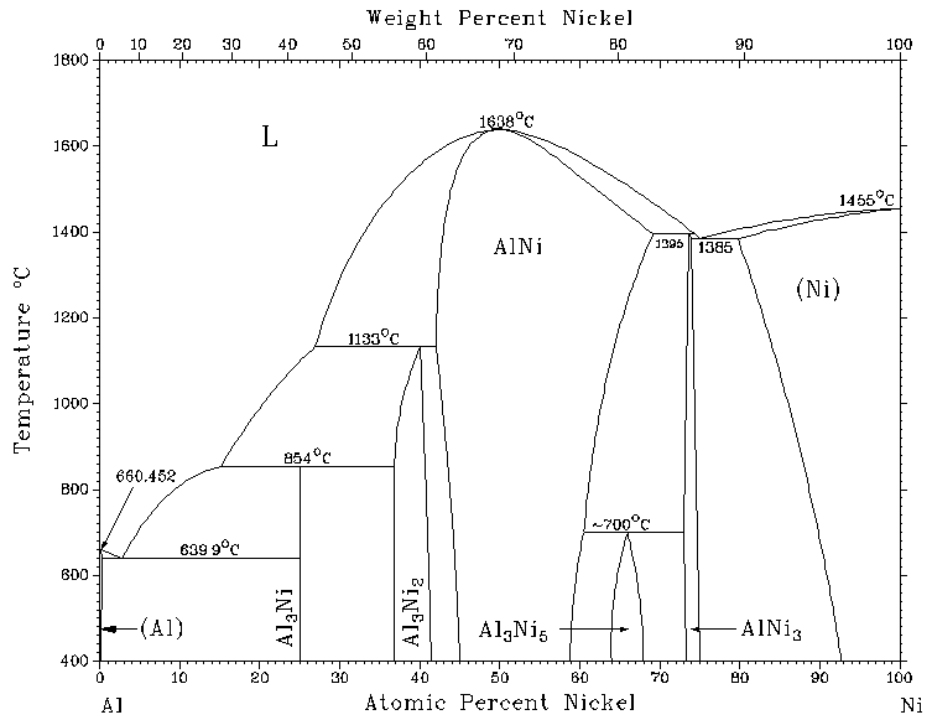
2.3.3.1 Low activity หรือ Outward diffusion จะเกิดการแพร่ของนิกเกิลจากเนื้อพื้น ทำให้เกิด Ni-rich ในชั้นผิว NiAl โดยกระบวนการนี้จะต้องใช้ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1000-1100 องศาเซลเซียส ทำให้พื้นที่ช่วง interdiffusion ถูกจำกัด และ gradient ของ Al ในเฟส β จะต้านออกจากรู

alloying element ในโลหะพื้นจะมีการแพร่ในผิวเคลือบแต่จะมีค่าจำกัดขึ้นกับความสามารถ ในการละลายของตัวเอง

2.3.3.2 High activity หรือ Inward diffusion จะเกิดอะลูมิเนียมแพร่เข้าไปในชิ้นงานจะเกิดโครงสร้าง Ni_2Al_3 และ $\beta\text{-NiAl}$ ซึ่งกลไกนี้จะเกิดเมื่ออุณหภูมิการทำ Aluminizing ต่ำกว่าแบบที่ 1 คือ ประมาณ 700-950 องศาเซลเซียส โดยจะมี gradient ของความเข้มข้นของ Al ในผิวเคลือบสูง เป็นผลให้เกิดการแพร่ขณะทำ Heat-treatment ที่ 1050-1100 องศาเซลเซียส ได้โครงสร้างเป็นชั้น $\beta\text{-NiAl}$ ทั้งหมด

2.3.4 สารประกอบที่ได้จากกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิง

สารประกอบที่เกิดขึ้นได้จากวิธีอะลูมิเนียมในเชิง มีหลายประเภท ขึ้นอยู่กับปริมาณอะลูมิเนียมที่แพร่เข้าสู่วัสดุ หากพิจารณาจากแผนภูมิสมดุล สารประกอบเชิงโลหะของนิกเกิล-อะลูมิเนียม ที่อาจเกิดขึ้น คือ NiAl , NiAl_3 , Ni_2Al_3 , Ni_3Al , Ni_5Al_3 [15-17] ซึ่งสารประกอบเชิงโลหะแต่ละตัวมีส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างต่างกัน ส่งผลให้สมบัติต่างกัน ในวิธีการ pack aluminizing จึงมักเกิดชั้นสารประกอบที่มีปริมาณอะลูมิเนียมสูงอยู่ที่ผิว และชั้นที่มีปริมาณอะลูมิเนียมต่ำอยู่ภายใน ซึ่งผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคที่พบในการทำ pack aluminizing ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้น นิกเกิล ชนิด Haynes 214 พบชั้นสารประกอบของ Ni_2Al_3 [18] แม้ว่าสารประกอบ Ni_2Al_3 เป็นสารประกอบที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า NiAl ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีจุดหลอมเหลวสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมชนิดอื่น ๆ การเคลือบผิวด้วยวิธีอะลูมิเนียมในเชิงที่ได้ชั้นสารประกอบของ Ni_2Al_3 นั้นสามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสได้ดีและยังสามารถทำการอบให้เป็นเนื้อเดียวเพื่อให้ได้สารประกอบ NiAl ได้ [6]



รูปที่ 2.4 แผนภูมิสมดุลของสารประกอบเชิงโลหะของนิกเกิล-อะลูมิเนียม [19]

ตารางที่ 2.5 แสดงสารประกอบเชิงโลหะชนิดต่างๆ ระหว่างนิกเกิลและอะลูมิเนียม [20]

Phase	Composition wt%Ni	Pearson symbol	Space group
Al	0 to 0.24	cF4	Fm $\bar{3}$ m
NiAl ₃	42.0	$\mathcal{O}P16$	Pnma
Ni ₅ Al ₃	55.9 to 60.7	hP5	P $\bar{3}$ m1
NiAl	61.0 to 83.0	cP2	Pm $\bar{3}$ m
Ni ₃ Al ₃	79.0 to 82.0	...	Cmmm
Ni ₃ Al	85.0 to 87.0	cP4	Pm $\bar{3}$ m
Ni	89.0 to 100	cF4	Fm $\bar{3}$ m

สารประกอบเชิงโลหะของนิกเกิลและอะลูมิเนียม ที่น่าสนใจ คือ NiAl ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็น B2 หรือเรียกว่า เฟสเบต้า มีจุดหลอมเหลวที่สูงมาก โดยในกรณีที่มีสัดส่วนของนิกเกิลต่ออะลูมิเนียมเป็น 1 ต่อ 1 (Stoichiometric) จะมีจุดหลอมเหลวที่สูงประมาณ 1638 องศาเซลเซียส แต่หากสัดส่วนของนิกเกิลและอะลูมิเนียมไม่เท่ากับ 1 ต่อ 1 (Nonstoichiometric) จะมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่าเล็กน้อย และความหนาแน่นต่ำ โดยในกรณีที่ส่วนผสมเป็น Nonstoichiometric พบว่า NiAl จะมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 5.35 g cm^{-3} (Al-rich boundary ของเฟส NiAl) ถึง 6.50 g cm^{-3} (Ni-rich boundary) และในกรณีที่ส่วนผสมเป็น Stoichiometric ของ binary NiAl มีความหนาแน่นประมาณ 5.85 g cm^{-3}

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 โลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิด ชนิด Haynes 214
- 3.1.2 ฟองอะลูมิเนียม (Al) ขนาด 42 ไมครอน
- 3.1.3 ฟองอะลูมินา
- 3.1.4 ฟองแอมโมเนียมคลอไรด์
- 3.1.5 Alcohol
- 3.1.6 Acetone
- 3.1.7 Crucible
- 3.1.8 ซ้อนตักสาร
- 3.1.9 ฟอยล์อะลูมิเนียม
- 3.1.10 Resin
- 3.1.11 กระดาษทรายเบอร์ 80,220,320,400,600,800,1000,1200,2000,4000
- 3.1.12 ผ้าสักหลาดและผงขัดอะลูมินา

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1.1 เครื่องขัดชิ้นงานหยาบและละเอียด (Grinding & Polishing machine)
- 3.2.1.2 เตา muffle
- 3.2.1.3 เครื่องตัด
- 3.2.1.4 เครื่องเตรียมเรซินแบบร้อน (Hot mounting machine)
- 3.2.1.5 เครื่องซั่งดิจิตอล
- 3.2.1.6 เครื่องซูปเปอร์โซนิค (Supersonic cleaner)
- 3.2.1.7 เครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ (Vickers microhardness tester)
- 3.2.1.8 เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์ (Pin-on-disc wear machine)

3.2.2 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์

- 3.2.2.1 กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)
- 3.2.2.2 เครื่อง X-rays Diffractometer (XRD)

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

ชิ้นงานในการทดลองแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1. ชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน 12 ชิ้น
2. ชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน 12 ชิ้น

3.3.1 การเตรียมชิ้นงานก่อนทำ Pack aluminizing

3.3.1.1 ตัดชิ้นงาน โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล ชนิด Haynes 214

3.3.1.2 ขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทราย เบอร์ 80 , 220 , 320 , 400 , 600 , 800 , 1000 , 1200 , 2000 , 4000 ตามลำดับ

3.3.1.3 ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยอะซิโตน โดยใช้เครื่องซูปเปอร์โซนิค

3.3.1.4 ผสมผงแอมโมเนียมคลอไรด์, ผงอะลูมิเนียมและผงอะลูมินา ด้วยอัตราส่วน $\text{NH}_4\text{Cl} : \text{Al} : \text{Al}_2\text{O}_3$ เป็น 5: 15: 80 โดยน้ำหนัก รวมเป็นปริมาณ 15 กรัม

3.3.1.5 เทผงที่ผสมใส่ crucible ส่วนหนึ่ง อัดผงให้แน่น

3.3.1.6 วางชิ้นงาน

3.3.1.7 เทผงที่เหลือลงในถ้วย แล้วอัดให้แน่น

3.3.1.8 เทผงอะลูมินาทับอีกชั้น อัดให้แน่นจนเต็มถ้วย

3.3.1.9 ปิดฝาให้สนิท แล้วใช้ลวดสเตนเลสพันรอบถ้วยให้แน่น

3.3.2 การปรับปรุงผิวด้วยกระบวนการ Pack aluminizing

3.3.2.1 นำไปเผาด้วยเตา muffle ด้วยอุณหภูมิและเวลาดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาด้วยเตา muffle

Condition	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)
1	700	1
2	700	2.25
3	700	4
4	700	6.25
5	800	1
6	800	2.25
7	800	4
8	800	6.25
9	900	1
10	900	2.25
11	900	4
12	900	6.25

3.3.2.2 ปล่อยให้เย็นตัวในเตา

3.3.3 ทดสอบความแข็งแบบVicker โดยใช้โหลด 100 กรัม

3.3.4 ทดสอบการเกิดการสึกหรอโดยวิธี Pin on Disc

3.3.4.1 ตัดชิ้นงานเป็นวงกลมให้มีขนาดพอดีกับพิน

3.3.4.2 ติดชิ้นงานกับปลายพิน

3.3.4.3 นำ Pin หมุนรอบจุดศูนย์กลางของจานอะลูมินา โดยพินจะถูกกดกับดิสก์ ด้วยแรงกด (Load) 5 นิวตัน ระยะทางไถล 500 เมตร ความเร็วการไถล 0.251 เมตรต่อวินาที

3.3.4.4 นำชิ้นงานมาวัดปริมาณการสึกหรอ

3.3.5 การทดสอบการเกิดออกซิเดชัน

3.3.5.1 นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวมาชั่งน้ำหนัก และบันทึกไว้

3.3.5.2 นำชิ้นงานไปเข้าเตาเพื่อทดสอบการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 104 ชั่วโมง รอบละ 8 ชั่วโมง

3.3.5.3 นำชิ้นงานที่ผ่านการเผามาชั่งน้ำหนักทุกรอบ

3.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

3.4.1 ตรวจสอบสารประกอบที่เกิดขึ้นบนผิวชั้นเคลือบ โดย X-rays Diffractometer

3.4.2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางและวัดความหนาชั้นเคลือบ โดยกล้องจุลทรรศน์แสง

3.4.3 หาอัตราการเกิดสารประกอบชั้นเคลือบ

3.4.4 เปรียบเทียบความแข็ง

3.4.5 เปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานการสึกหรอ

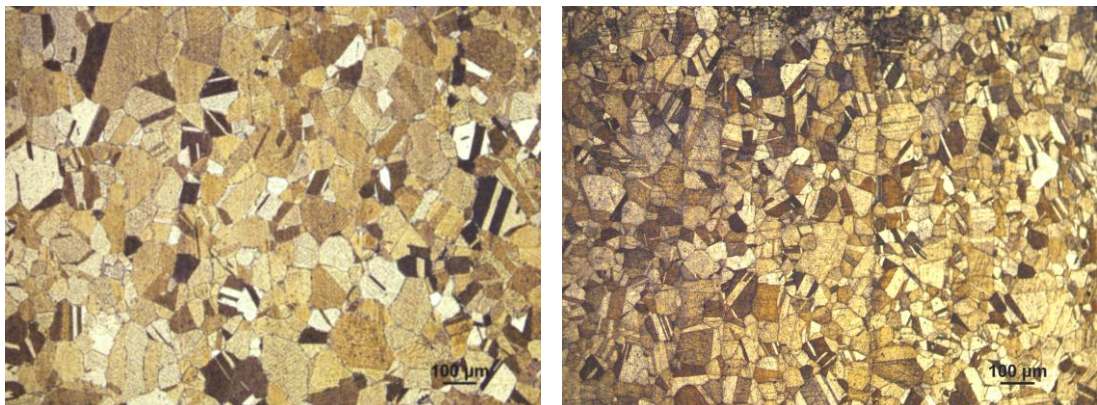
3.4.6 เปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

4.1 ลักษณะชิ้นงานก่อนการเคลือบผิวโดยวิธีอะลูมิเนียม

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน (รูปที่ 4.1 ซ้าย) พบเกรนมีขนาดใหญ่ อาจเกิดจากการโตของเกรนเนื่องจากการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน และพบการทวินจากการคืนสภาพของโลหะ (annealing twin) เมื่อวัดขนาดเกรนโดยมาตรฐาน ASTM วิธี Comparison พบว่ามีขนาดเกรนประมาณ 64 ไมครอน ส่วนชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน (รูปที่ 4.1 ขวา) เกรนมีขนาดเล็ก ขอบเกรนชัดเจน ซึ่งเกรนมีขนาดประมาณ 45 ไมครอน และพบ annealing twin ปริมาณมาก



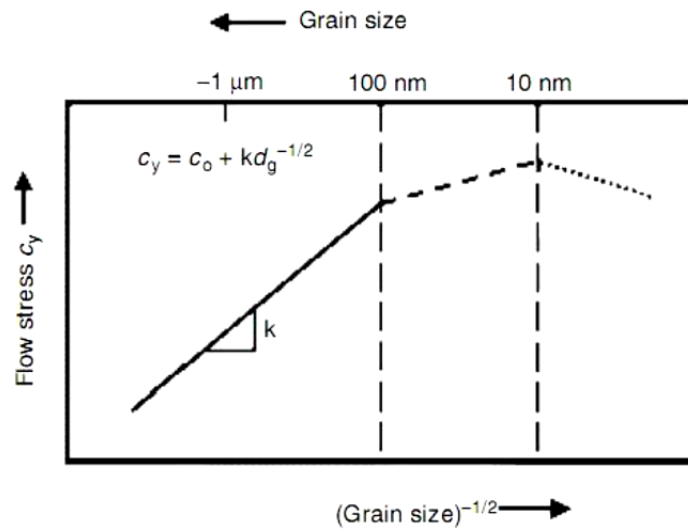
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน (ซ้าย) และชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน (ขวา)

จากสมการของ Hall-Petch (สมการที่ 4.1) แสดงความสัมพันธ์ของความแข็งแรงกับขนาดเกรน

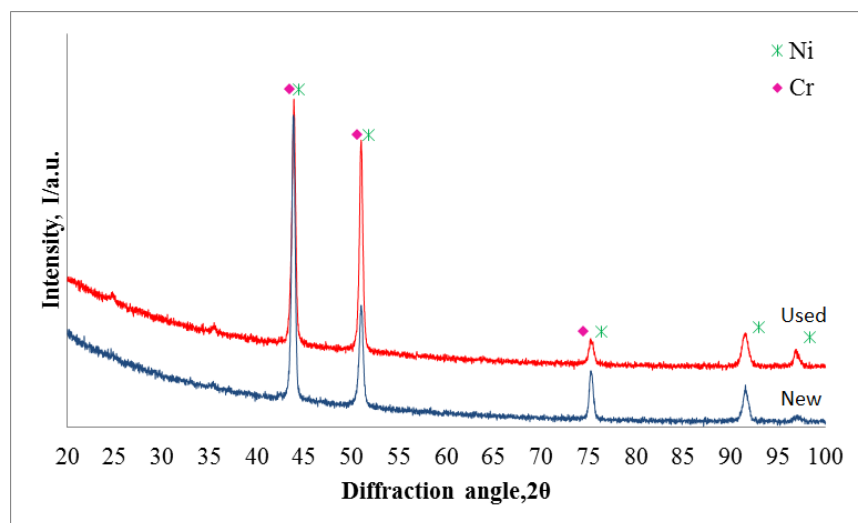
$$\sigma = \sigma_0 + kD^{-1/2} \quad \text{สมการที่ 4.1}$$

ตามสมการแล้ว ยิ่งเกรนมีขนาดเล็กทำให้วัสดุมีความแข็งแรงสูงมากขึ้น เนื่องจากโดยทั่วไปแล้ว การมีขอบเกรนจำนวนมาก จะทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ยาก จำเป็นต้องมีพลังงานมากพอที่จะ

เคลื่อนที่ผ่านขอบเกรน ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงและจุดครากของวัสดุ แต่สมการนี้จะใช้ได้เมื่อนำขนาดเกรนอยู่ในระดับไมโครเมตร หรืออยู่ในช่วง 10 นาโนเมตร จนถึง 100 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งขนาดเกรนของวัสดุที่เราทดลองอยู่ในช่วงที่กล่าวมาข้างต้น ส่วนขอบ annealing twin ก็เป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน เช่นเดียวกับขอบเกรน [21-22] แสดงว่า ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งานจะมีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และจากการวัดความแข็งแรงพบว่า ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน มีความแข็งเท่ากับ 313 HV ซึ่งมากกว่า ชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน ที่มีความแข็งเท่ากับ 250 HV



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นของวัสดุกับขนาดเกรน

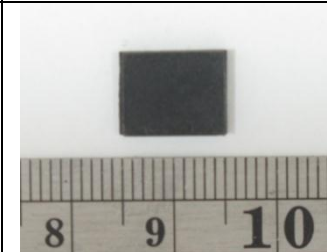
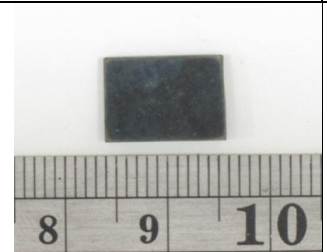
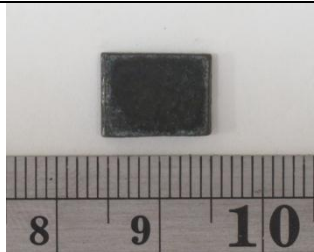
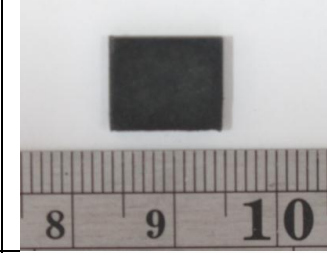
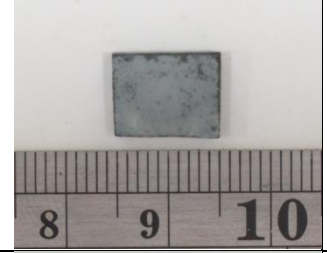
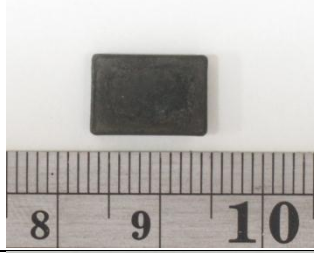
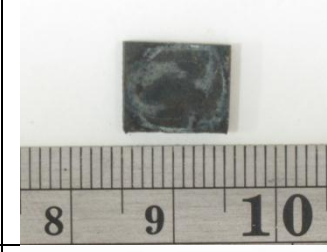
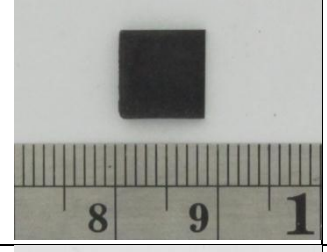

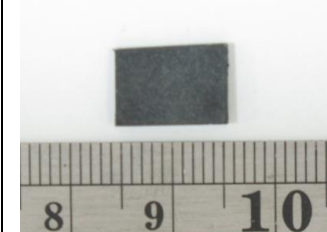
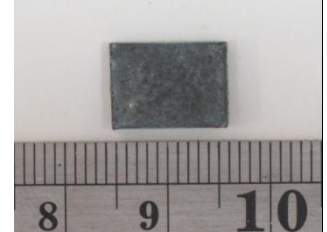
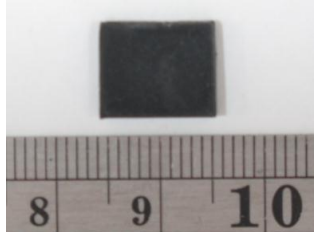


รูปที่ 4.3 ผลการตรวจสอบชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน ด้วยวิธี GIXD

จากผลการตรวจสอบชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน โดย XRD แบบ GIXD ที่มุม 5 องศา (รูปที่ 4.3) พบนิกเกิลและโครเมียม โดยนิกเกิลเป็นเฟสหลัก ซึ่งตรงตามส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิล Haynes 214

4.2 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานที่ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง

4.2.1 ลักษณะพื้นผิวเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน

อุณหภูมิ/ เวลา	700 องศาเซลเซียส	800 องศาเซลเซียส	900 องศาเซลเซียส
1 ชั่วโมง			
2.25 ชั่วโมง			
4 ชั่วโมง			
6.25 ชั่วโมง			

รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง

จากภาพถ่ายชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมในเชิง (รูปที่ 4.4) พบว่าทุกชิ้นงานที่ผิวมีชั้นเคลือบเป็นสีเทาเข้มก่อนข้างดำ ต่อเนื่องกันทั่วทั้งชิ้นงาน และบางชิ้นจะพบผงอะลูมิเนียมผสมผงอะลูมิเนียม สีขาวบนชั้นผิวเคลือบ คิดในลักษณะทั่วทั้งชิ้นงาน เช่น ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 2.25 ชั่วโมง พบบางส่วนของงาน เช่น ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง หรือเป็นจุดๆทั่วชิ้นงาน เช่น ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 6.25 ชั่วโมง

4.2.2 ลักษณะพื้นผิวเคลือบของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน

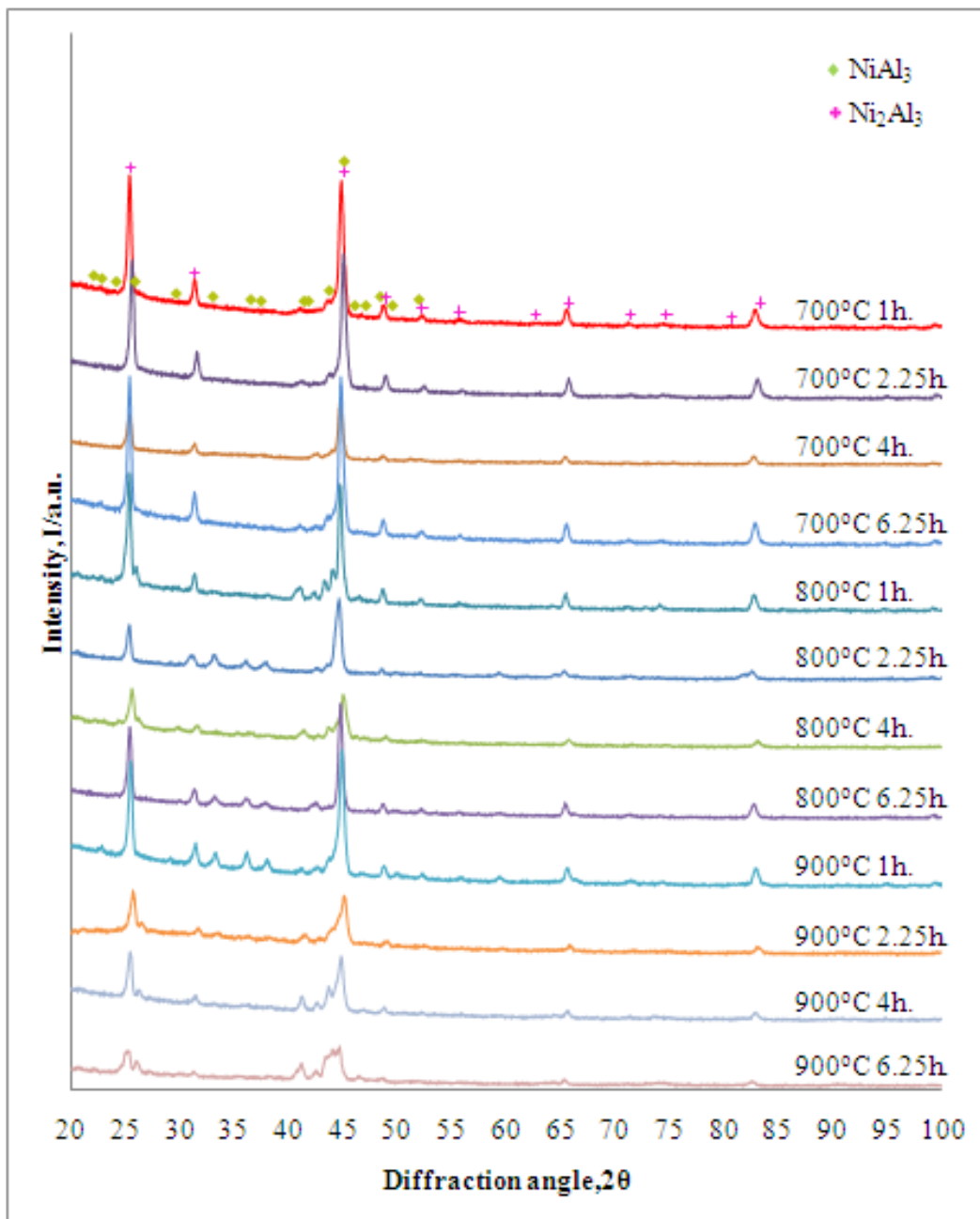
อุณหภูมิ/ เวลา	700 องศาเซลเซียส	800 องศาเซลเซียส	900 องศาเซลเซียส
1 ชั่วโมง			
2.25 ชั่วโมง			
4 ชั่วโมง			
6.25 ชั่วโมง			

รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในเชิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง

จากภาพถ่ายชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมในเชิง (รูปที่ 4.5) พบว่าทุกชิ้นงานที่ผิวมีชั้นเคลือบเป็นสีเทาเข้มก่อนใช้งาน ต่อเนื่องกันทั่วทั้งชิ้นงาน และบางชิ้นจะพบผงอะลูมิเนียมผสมผงอะลูมิเนียม สีขาวบนชั้นผิวเคลือบ คิดในลักษณะทั่วชิ้นงาน เช่น ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 6.25 ชั่วโมง พบบางส่วนของงาน เช่น ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 6.25 ชั่วโมง หรือเป็นจุดๆทั่วชิ้นงาน เช่น ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 6.25 ชั่วโมง

4.3 ผลการตรวจสอบชิ้นงานที่ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิงโดย XRD แบบ GIXD

4.3.1 ผลการตรวจสอบโดย XRD แบบ GIXD ของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน

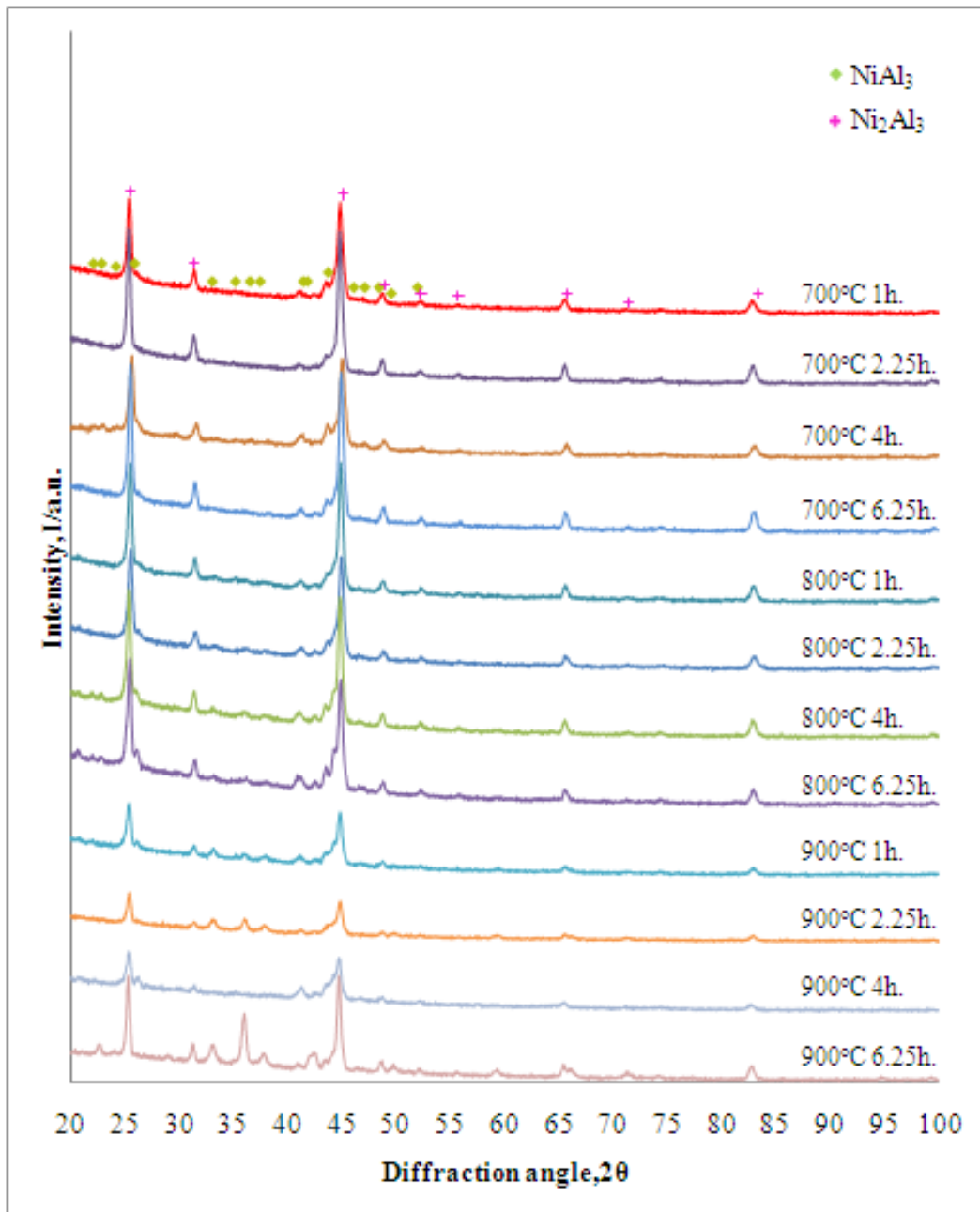


รูปที่ 4.6 ผลการตรวจสอบชิ้นเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD

จากรูปที่ 4.6 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบโดย XRD แบบ GIXD ที่มุม 5 องศา ของชั้นงานที่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมในเชิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง พบว่าชั้นงานทุกชั้น มีฟิสิกของเฟส NiAl_3 และ Ni_2Al_3 โดยฟิสิกของ Ni_2Al_3 มีความเข้มสัมพัทธ์สูงกว่าฟิสิกของ NiAl_3 แสดงว่าเฟส Ni_2Al_3 เป็นเฟสหลักและ NiAl_3 เป็นเฟสรองที่เกิดขึ้น

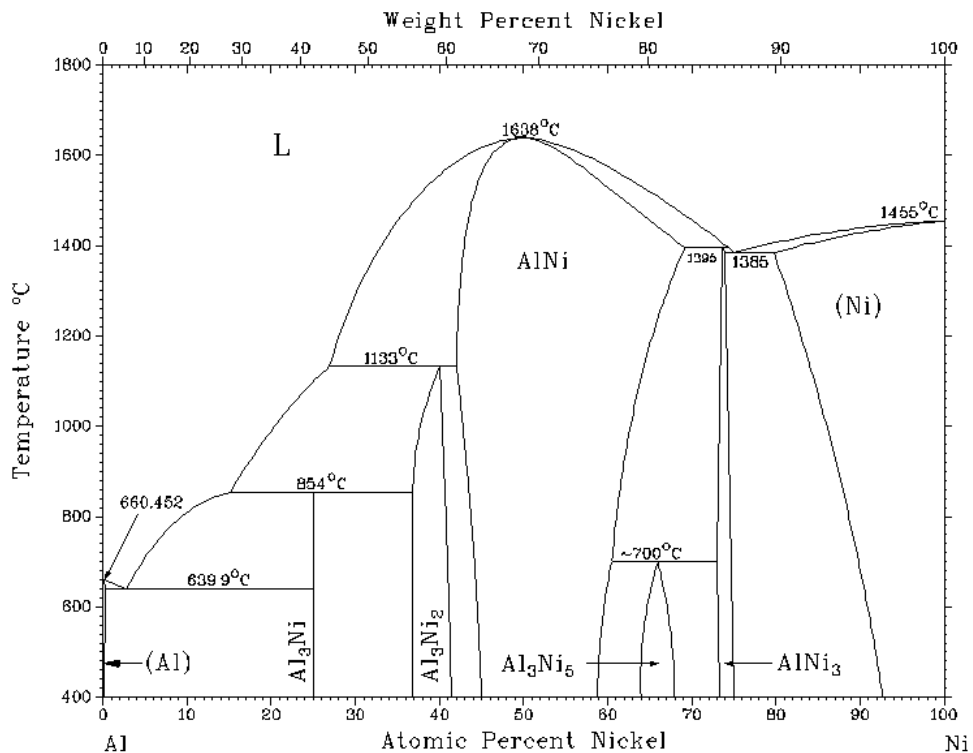
4.3.2 ผลการตรวจสอบโดย XRD แบบ GIXD ของชั้นงานที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน

จากผลการตรวจสอบชั้นเคลือบโดย XRD แบบ GIXD ที่มุม 5 องศา ของชั้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมในเชิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (รูปที่ 4.7) โดยทุกชั้นงาน พบฟิสิกของเฟส NiAl_3 และ Ni_2Al_3 โดยฟิสิกที่มีความเข้มสัมพัทธ์สูงสุด คือ Ni_2Al_3 เช่นเดียวกับ ชั้นงานที่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมในเชิง



รูปที่ 4.7 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD

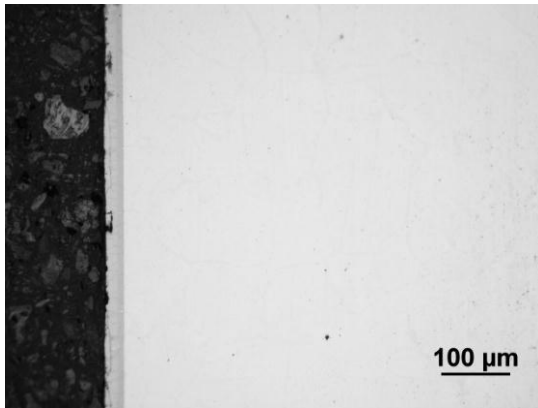
สาเหตุของการพบเฟส Ni_2Al_3 เป็นเฟสหลัก ของทั้งชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งานและชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน เนื่องจากการทำอะลูมิเนียมในเชิงที่อุณหภูมิ 700 – 950 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดกลไก Inward diffusion หรือ High aluminium content ซึ่งจะทำให้เกิดการแพร่ของอะลูมิเนียมเข้าสู่ชิ้นงาน ทำให้เกิดโครงสร้าง Ni_2Al_3 และ Ni_3Al ซึ่งเป็นเฟสที่เสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากความแตกต่างของ interdiffusion coefficients ของอะลูมิเนียม ผ่านชั้นเคลือบ Ni_2Al_3 และ Ni_3Al เป็นผลให้ชั้นเคลือบ Ni_3Al ที่เกิดจากกระบวนการนี้บางมาก ไม่สามารถตรวจพบได้ [23-27] ดังนั้นจึงพบเพียงชั้นเคลือบ Ni_2Al_3 และจากแผนภูมิสมมูลระหว่างอะลูมิเนียมและนิกเกิล (รูปที่ 4.8) เมื่อชิ้นงานเย็นตัวลง มีโอกาสที่จะเกิด การตกตะกอนของ NiAl_3 ขึ้น



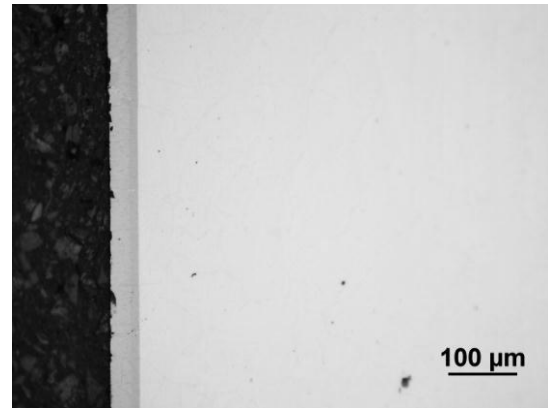
รูปที่ 4.8 แผนภูมิสมมูลระหว่างอะลูมิเนียมและนิกเกิล [19]

4.4 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการทำอะลูมิเนียม

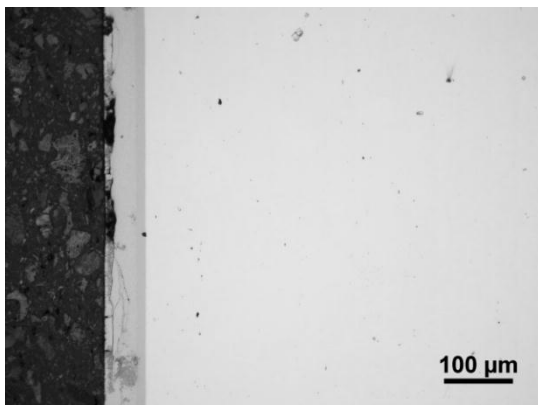
4.4.1 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน



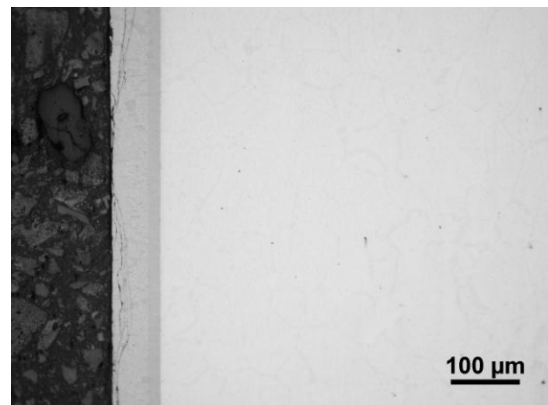
ก.) 700 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง



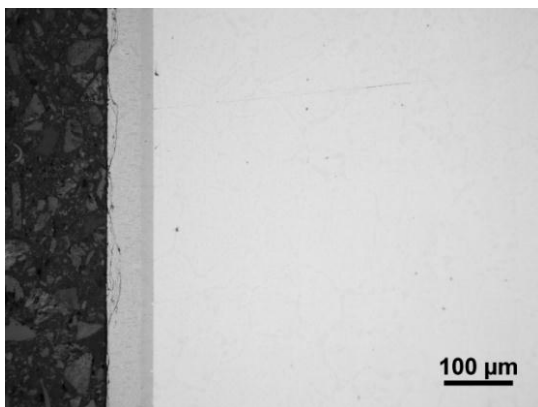
ข.) 700 องศาเซลเซียส 2.25 ชั่วโมง



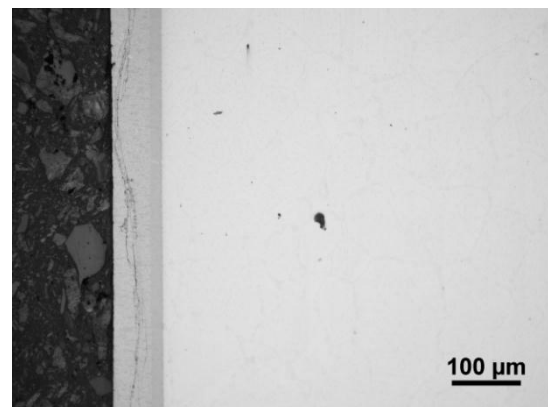
ค.) 700 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง



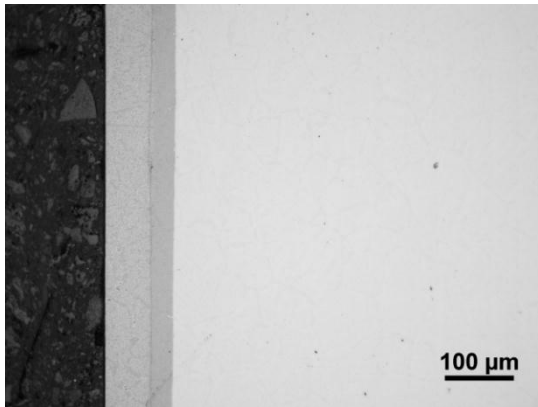
ง.) 700 องศาเซลเซียส 6.25 ชั่วโมง



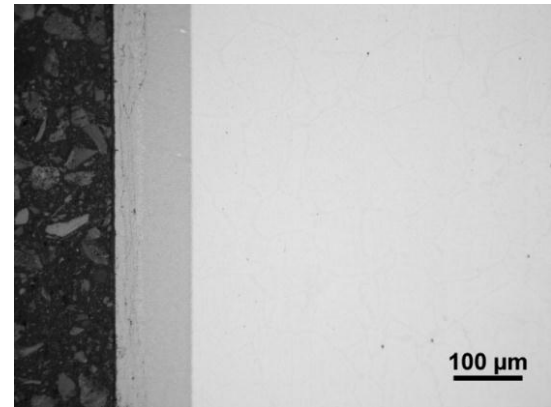
จ.) 800 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง



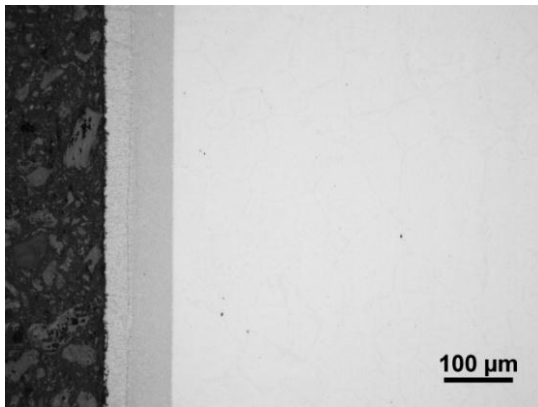
ฉ.) 800 องศาเซลเซียส 2.25 ชั่วโมง



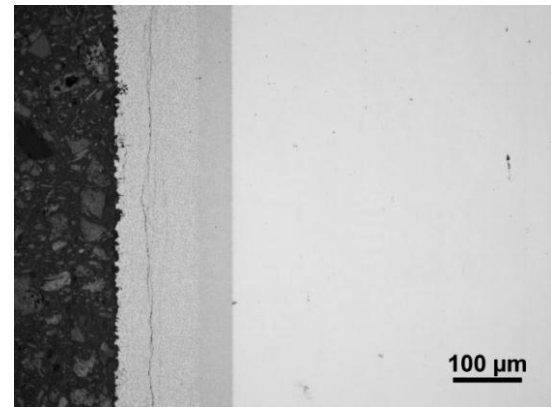
ซ.) 800 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง



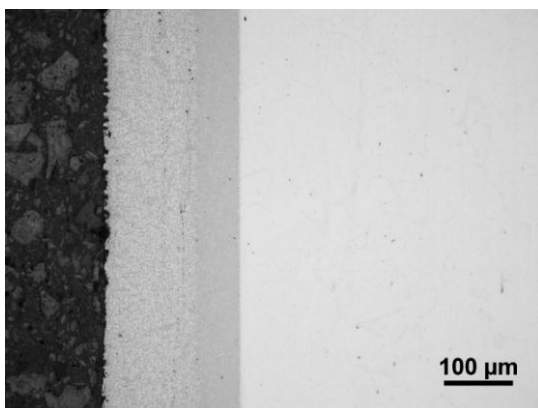
ซ.) 800 องศาเซลเซียส 6.25 ชั่วโมง



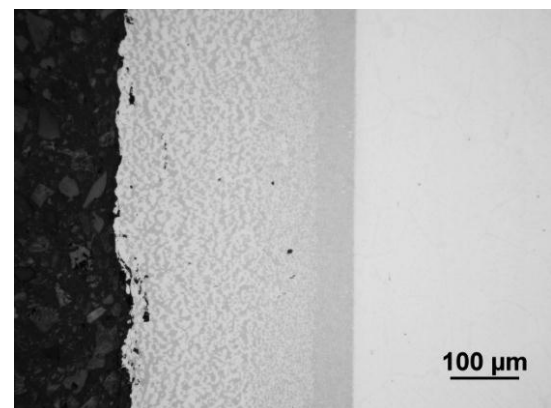
ฅ.) 900 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง



ฅ.) 900 องศาเซลเซียส 2.25 ชั่วโมง



ฅ.) 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

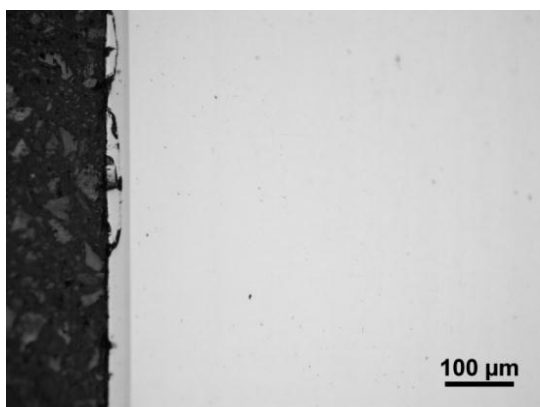


ฅ.) 900 องศาเซลเซียส 6.25 ชั่วโมง

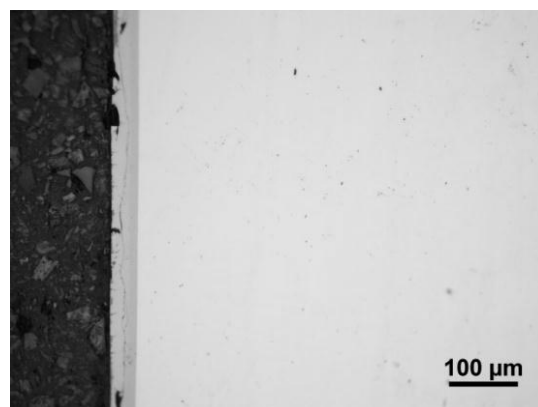
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียม ซึ่ง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (รูปที่ 4.9) พบชั้นเคลือบแบ่งได้เป็น 2 บริเวณ คือ 1.บริเวณชั้นในติดกับชิ้นงาน พบเฟสสีเทา 2. บริเวณชั้นนอก พบเฟสสีขาวและสีเทา ทั้ง 2 บริเวณเป็นที่มีลักษณะต่อเนื่อง จากข้อ 4.3 แสดงว่าเฟส Ni_2Al_3 เกิดก่อน นั่นคือ เฟสสีเทาที่อยู่ชั้นในติดกับชิ้นงาน ส่วนชั้นเคลือบด้านนอก คือ Ni_2Al_3 กับ ตะกอนของ $NiAl_3$ โดยเมื่อเวลาและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นชั้นเคลือบด้านนอกนี้จะ โตขึ้นเรื่อยๆ

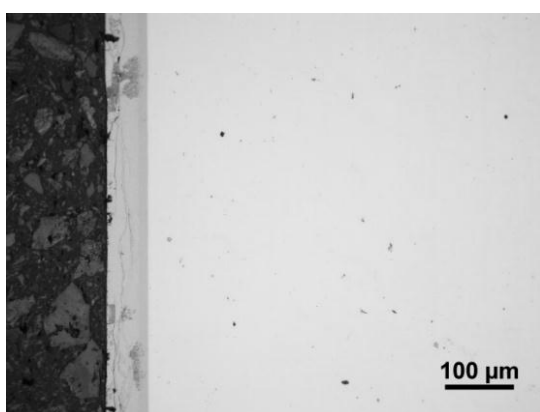
4.4.2 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน



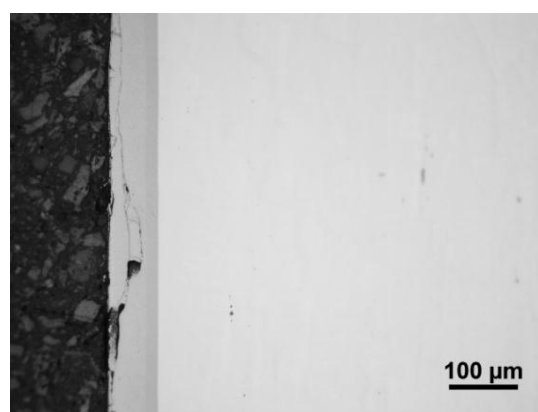
ก.) 700 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง



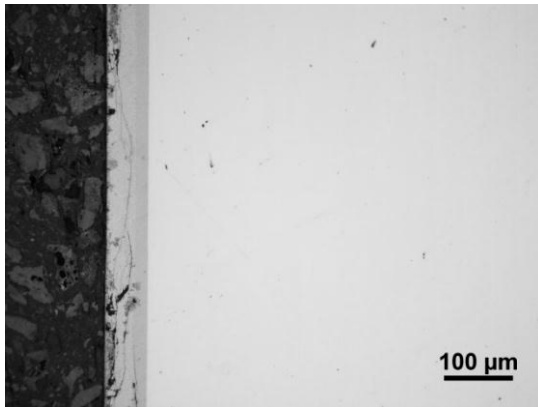
ข.) 700 องศาเซลเซียส 2.25 ชั่วโมง



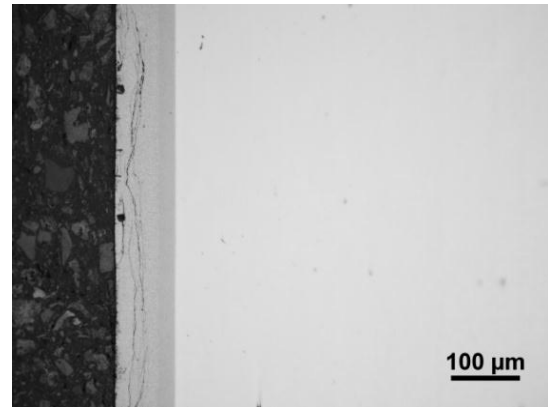
ค.) 700 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง



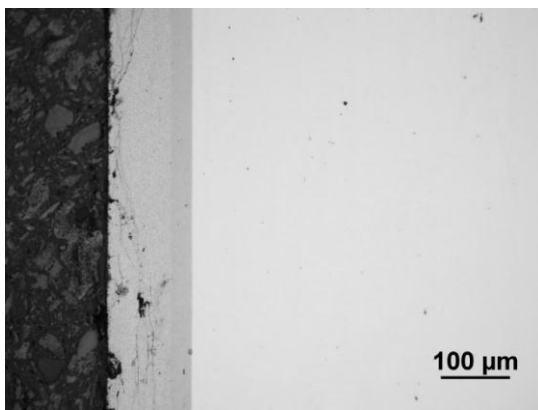
ง.) 700 องศาเซลเซียส 6.25 ชั่วโมง



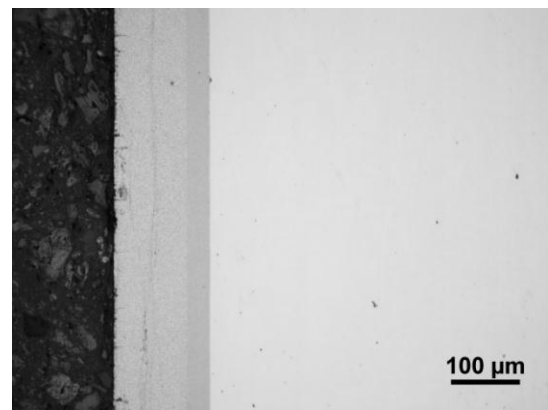
จ.) 800 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง



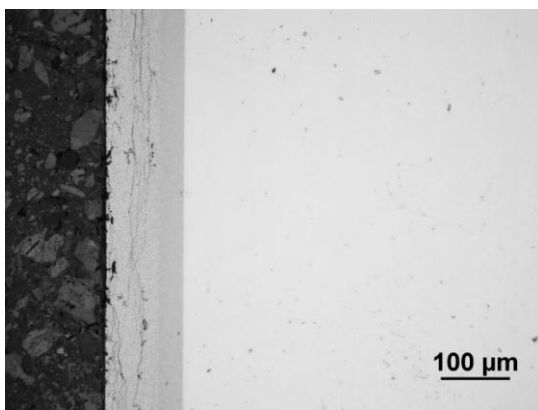
ฉ.) 800 องศาเซลเซียส 2.25 ชั่วโมง



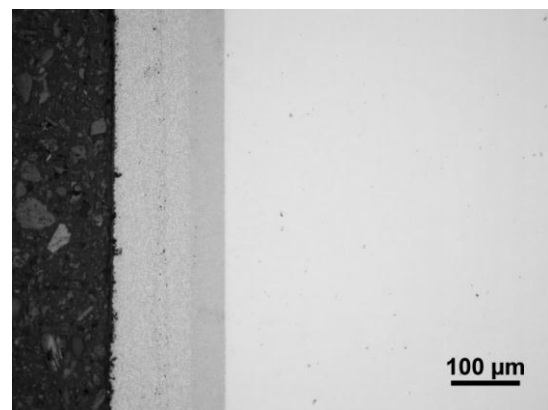
ช.) 800 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง



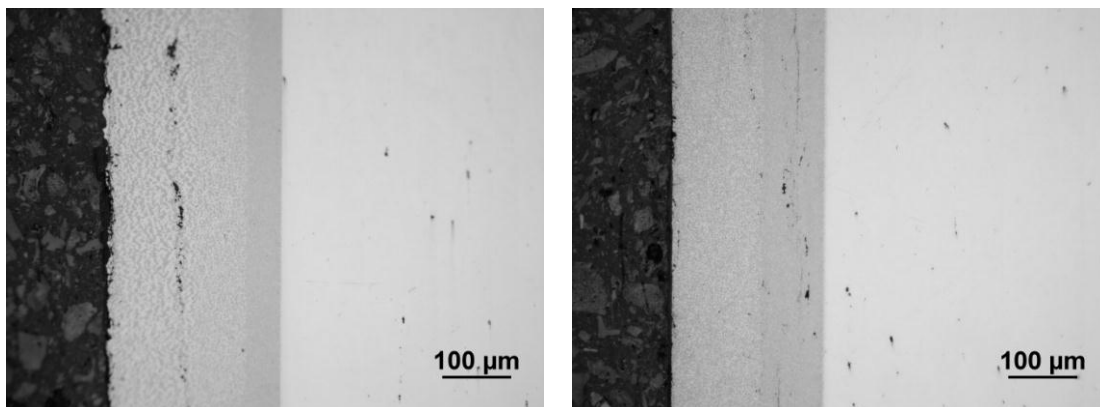
ซ.) 800 องศาเซลเซียส 6.25 ชั่วโมง



ณ.) 900 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง



ญ.) 900 องศาเซลเซียส 2.25 ชั่วโมง



ฎ.) 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

ฎ.) 900 องศาเซลเซียส 6.25 ชั่วโมง

รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง

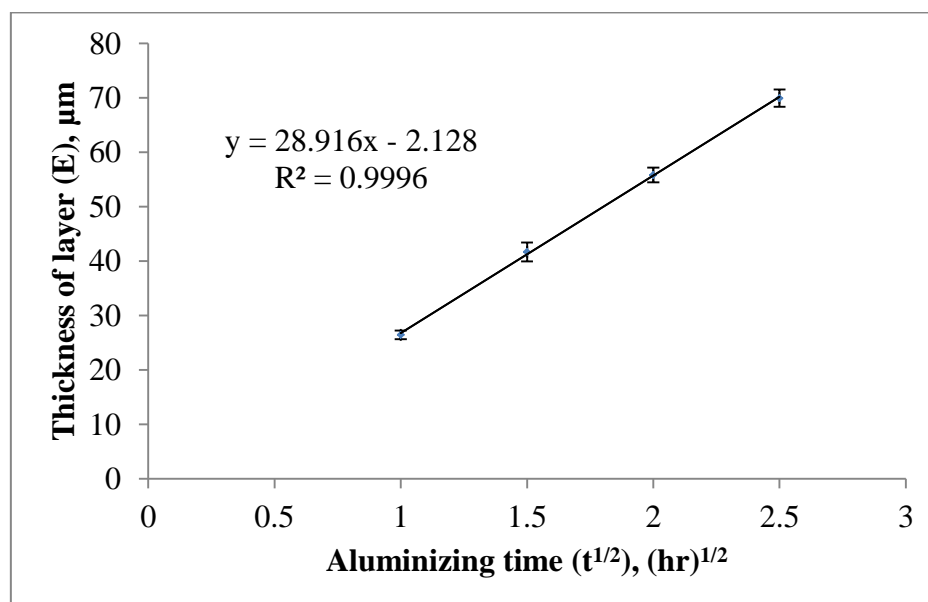
จากรูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง พบชั้นเคลือบเหมือนกับชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมไนซิง โดยชั้นในติดกับเนื้อพื้นพบเฟสสีเทา คือ Ni_2Al_3 ส่วนชั้นถัดมาข้างนอก พบเฟสสีขาวและสีเทาเป็นเฟสของ Ni_2Al_3 กับ ตะกอนของ $NiAl_3$ ทั้ง 2 ชั้นมีลักษณะต่อเนื่อง แต่บริเวณขอบชั้นนอก ไม่เรียบสวยเหมือนชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมไนซิง

4.4.3 ความหนาของชั้นเคลือบกับเวลาให้การทำอะลูมิเนียมไนซิงชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน

นำชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง มาวัดความหนาของชั้นเคลือบได้ 26.45, 41.7, 55.81 และ 69.94 ไมครอน ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) และเมื่อนำความหนาของชั้นเคลือบกับรากที่สองของเวลาในการทำอะลูมิเนียมไนซิงมาเขียนกราฟ พบว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ 28.92 (รูปที่ 4.11)

ตารางที่ 4.1 ความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในเชิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง

เวลาที่ใช้ในการทำอะลูมิเนียมในเชิง (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ (μm)	SD
1.00	26.45	0.78
2.25	41.7	1.75
4.00	55.81	1.36
6.25	69.94	1.58



รูปที่ 4.11 กราฟเส้นความหนาของชั้นเคลือบกับรากที่สองของเวลาในการทำอะลูมิเนียมในเชิงของ ชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในเชิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

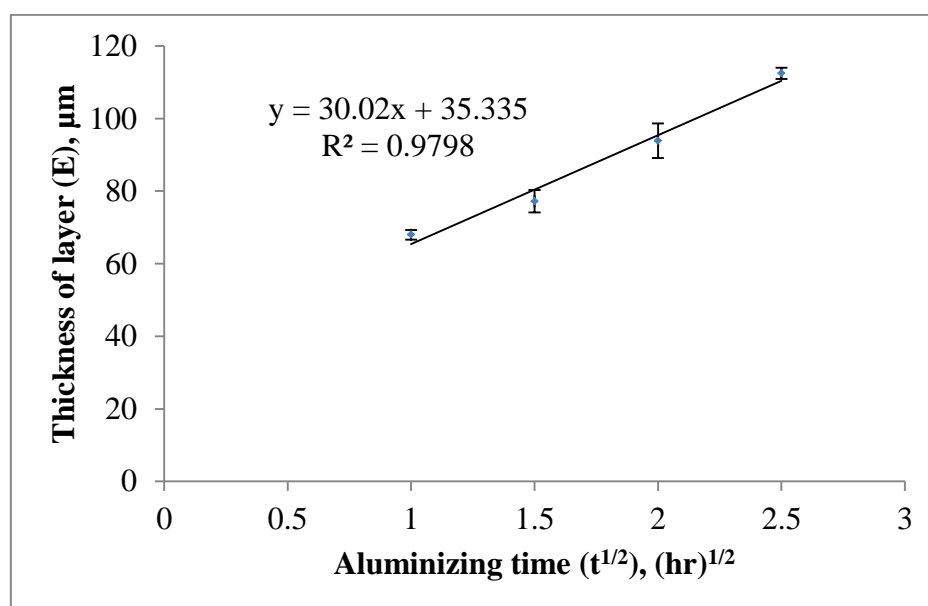
จากกราฟเส้นความหนาของชั้นเคลือบกับเวลาในการทำอะลูมิเนียมในเชิง ของชิ้นงานที่ผ่านการ ใช้งานและทำอะลูมิเนียมในเชิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบว่าเส้นกราฟไม่ตัดแกนที่จุดคู่อันดับ (0,0) เนื่องจาก Incubation time เพราะนำชิ้นงานใส่เข้าเตาตั้งแต่อุณหภูมิห้อง ซึ่งระหว่างการให้ ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิที่ทำอะลูมิเนียมในเชิง จะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นก่อนไหนเราไม่สามารถทราบได้ และอาจเกิดจากช่วงแรกของปฏิกิริยาเป็น reaction control

สำหรับความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมในเชิง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (ตารางที่ 4.2) วัดได้ 67.96, 77.2, 93.89

และ 112.43 ไมครอน ตามลำดับ โดยเมื่อเขียนกราฟความหนาของชั้นเคลือบกับรากที่สองของเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิง (รูปที่ 4.12) พบว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง และความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ 30.02

ตารางที่ 4.2 ความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง

เวลาที่ใช้ในการทำอะลูมิเนียมในซิง (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ (μm)	SD
1.00	67.96	1.36
2.25	77.2	3.08
4.00	93.89	4.79
6.25	112.43	1.55



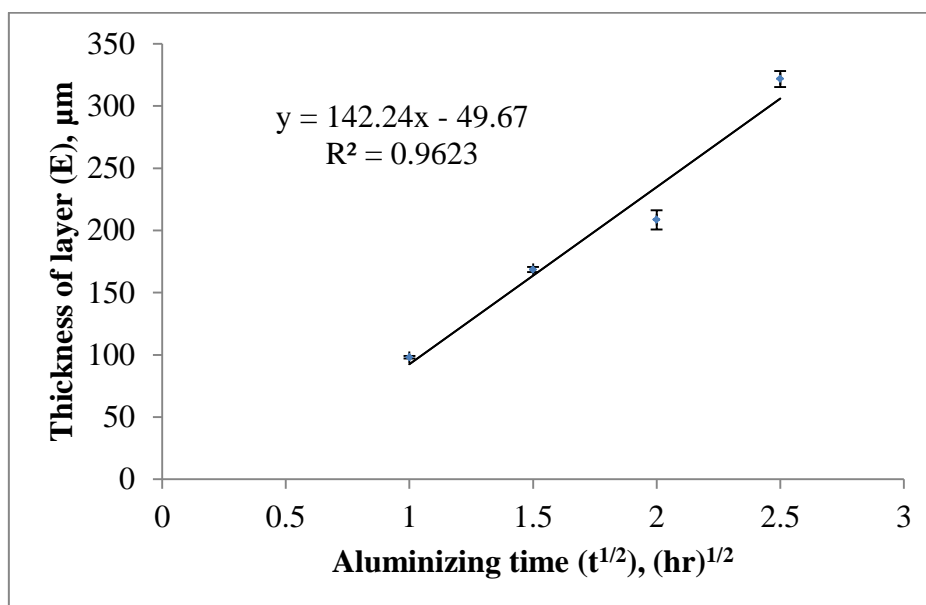
รูปที่ 4.12 กราฟเส้นความหนาของชั้นเคลือบกับรากที่สองของเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิงของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

ในส่วนของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (ตารางที่ 4.3) วัดความหนาของชั้นเคลือบได้เป็น 98.04, 168.59, 208.6 และ 321.77 ไมครอน ตามลำดับ และเมื่อเขียนกราฟความหนาของชั้นเคลือบกับรากที่สอง

ของเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิง (รูปที่ 4.13) พบว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง โดยความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ 142.24

ตารางที่ 4.3 ความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง

เวลาที่ใช้ในการทำอะลูมิเนียมในซิง (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ (μm)	SD
1.00	98.04	0.98
2.25	168.59	2.01
4.00	208.6	7.7
6.25	321.77	6.41



รูปที่ 4.13 กราฟเส้นความหนาของชั้นเคลือบกับรากที่สองของเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิงของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

จากกราฟเส้นแสดงความหนาของชั้นเคลือบกับรากที่สองของเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิงของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส พบว่าความหนาของชั้นเคลือบ (E) แปรผันตามรากที่สองของเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิง (t)^{1/2} ซึ่งตรงกับศึกษาของ Wagner [28] คือ กลไกการเกิดชั้นเคลือบผิวจะเป็นแบบ Diffusion control ซึ่งการแพร่

เป็นกระบวนการที่อาศัยเวลายังเวลานาน อะลูมิเนียมมีโอกาสแพร่เข้าสู่ชิ้นงานได้มาก ชั้นเคลือบจึงหนามากขึ้น จากกราฟดังกล่าวจะได้สมการที่ 4.2

$$E = k (t)^{1/2} \quad \text{สมการที่ 4.2}$$

โดย k คือ ค่าคงที่อัตราการโตของชั้นเคลือบ ซึ่งในการทดลองนี้ค่า k สามารถแทนอัตราการโตของชั้นเคลือบได้ จะได้ค่าคงที่อัตราการโตของชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เท่ากับ 28.916, 30.02 และ 142.24 ตามลำดับ

สังเกตว่าเมื่อเวลาเท่ากัน ยิ่งอุณหภูมิในการทำอะลูมิเนียมในซิงสูงขึ้น ความหนาชั้นเคลือบมากขึ้น เป็นผลมาจาก Diffusion coefficient (D) แปรผันตามอุณหภูมิ ดังสมการที่ 4.3

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \quad \text{สมการที่ 4.3}$$

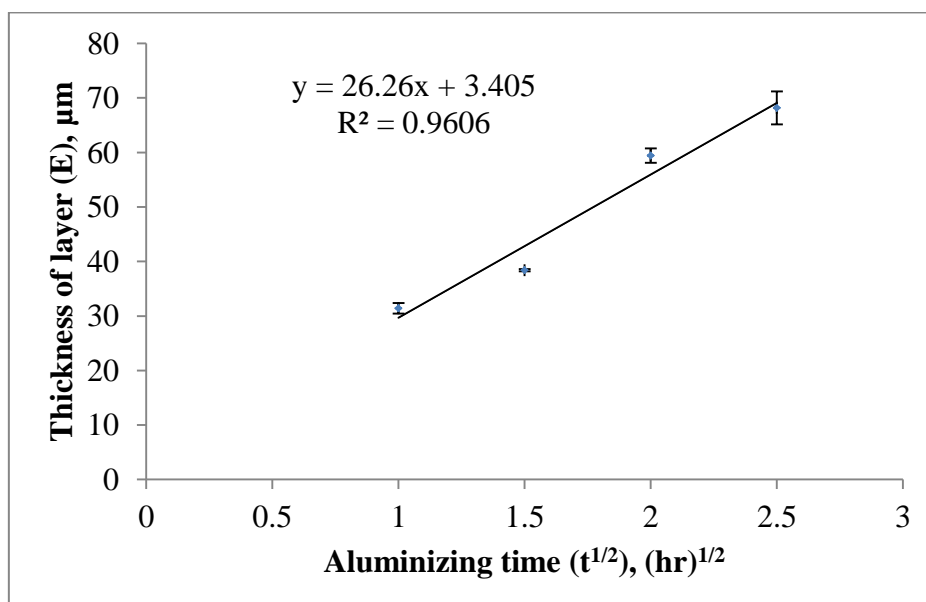
โดยค่า D_0 และ Q เป็นค่าคงที่ ซึ่งค่าคงที่ทั้งสองนี้ขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมี จากสมการเมื่ออุณหภูมิในการทำอะลูมิเนียมในซิงสูงขึ้น Diffusion coefficient จะเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการโตของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้น แสดงว่าอุณหภูมิและเวลามีผลต่อความหนาของชั้นเคลือบ โดยที่อุณหภูมิและเวลาสูงขึ้น ชั้นเคลือบจะมีความหนาเพิ่มขึ้น

4.4.4 ความหนาของชั้นเคลือบกับเวลาให้การทำอะลูมิเนียมในซิงชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน

จากตารางที่ 4.4 แสดงความหนาของชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง ซึ่งมีความหนาของชั้นเคลือบเท่ากับ 31.43, 38.4, 59.42 และ 68.19 ไมครอน ตามลำดับ และเมื่อนำความหนาของชั้นเคลือบกับรากที่สองของเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิงมาเขียนกราฟ พบว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง โดยความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ 26.26 (รูปที่ 4.14)

ตารางที่ 4.4 ความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง

เวลาที่ใช้ในการทำอะลูมิเนียมในซิง (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ (μm)	SD
1.00	31.43	0.97
2.25	38.4	0.18
4.00	59.42	1.32
6.25	68.19	3.03

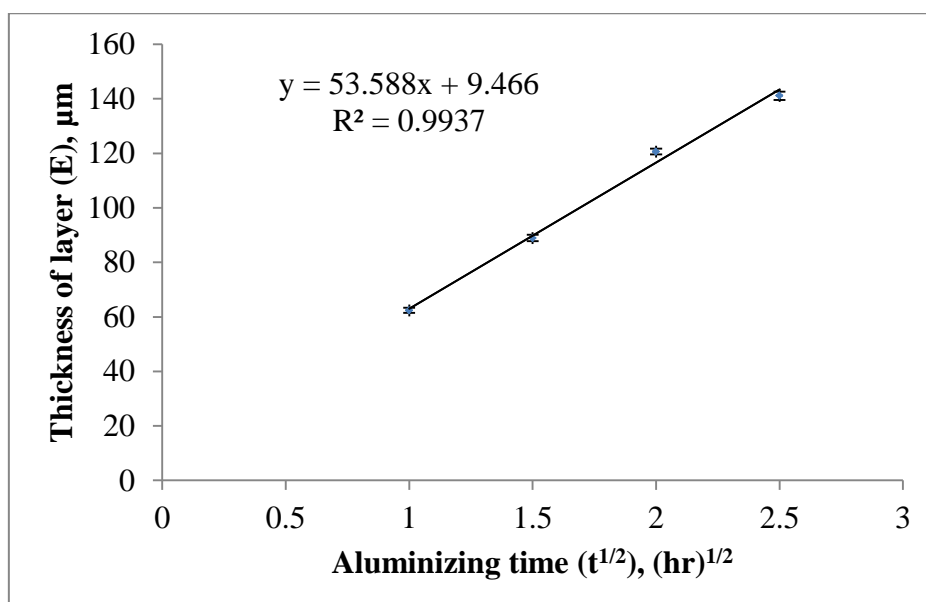


รูปที่ 4.14 กราฟเส้นความหนาของชั้นเคลือบกับรากที่สองของเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิงของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

สำหรับความหนาของชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (ตารางที่ 4.5) วัดได้ 62.36, 88.9, 120.62 และ 141.1 ไมครอน ตามลำดับ เมื่อเขียนกราฟระหว่างความหนาของชั้นเคลือบกับรากที่สองของเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิง พบว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง โดยความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ 53.588 (รูปที่ 4.15)

ตารางที่ 4.5 ความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง

เวลาที่ใช้ในการทำอะลูมิเนียมในซิง (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ (μm)	SD
1.00	62.36	0.94
2.25	88.9	1.17
4.00	120.62	1.06
6.25	141.1	1.56

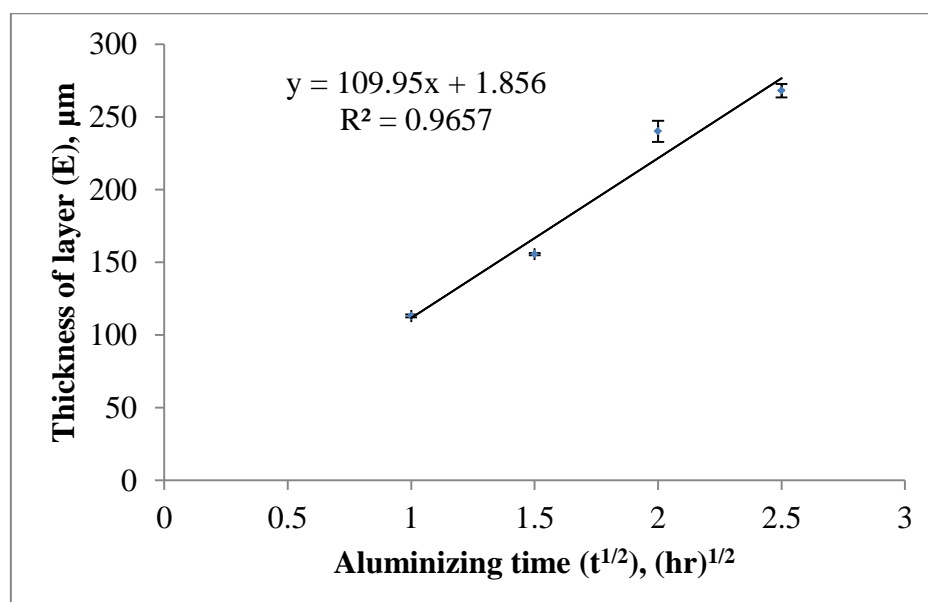


รูปที่ 4.15 กราฟเส้นความหนาของชั้นเคลือบกับรากที่สองของเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิงของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

ในส่วนความหนาของชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (ตารางที่ 4.6) วัดได้ 113.09, 155.65, 240.15 และ 268.17 ไมครอน ตามลำดับ เมื่อเขียนกราฟระหว่างความหนาของชั้นเคลือบกับรากที่สองของเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิง พบว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง โดยความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ 109.95 (รูปที่ 4.16)

ตารางที่ 4.6 ความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง

เวลาที่ใช้ในการทำอะลูมิเนียมในซิง (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ (μm)	SD
1.00	113.09	1
2.25	155.65	0.8
4.00	240.15	7.34
6.25	268.17	4.61



รูปที่ 4.16 กราฟเส้นความหนาของชั้นเคลือบกับรากที่สองของเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิงของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

สำหรับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งานและผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาเขียนกราฟเส้นความหนาของชั้นเคลือบกับรากที่สองของเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิง พบว่ากลไกการเกิดชั้นเคลือบผิวจะเป็นแบบ Diffusion control เหมือนกับชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง ซึ่งจะได้ค่าคงที่อัตราการโตของชั้นเคลือบ เท่ากับ 26.26, 53.588 และ 109.95 ตามลำดับ และจากข้อ 4.4.3 สรุปได้เช่นกันว่าอุณหภูมิและเวลามีผลต่อความหนาของชั้นเคลือบ ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมในซิง โดยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ชั้นเคลือบจะมีความหนามากขึ้น

4.4.5 จลนพลศาสตร์ของการทำอะลูมิเนียมในเชิงของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน

จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับเวลา หรือกฎอัตรา (rate law) เป็นแบบพาราโบลา โดยกราฟความสัมพันธ์ของความหนาชั้นเคลือบกับรากที่สองของเวลาในการทำอะลูมิเนียมในเชิง (E vs. $t^{1/2}$) ของแต่ละอุณหภูมิ จะเป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) และสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา (activation energy, Q) ได้ ตามสมการของ Arrhenius [29] ดังนี้

$$k = Ae^{-Q/RT}$$

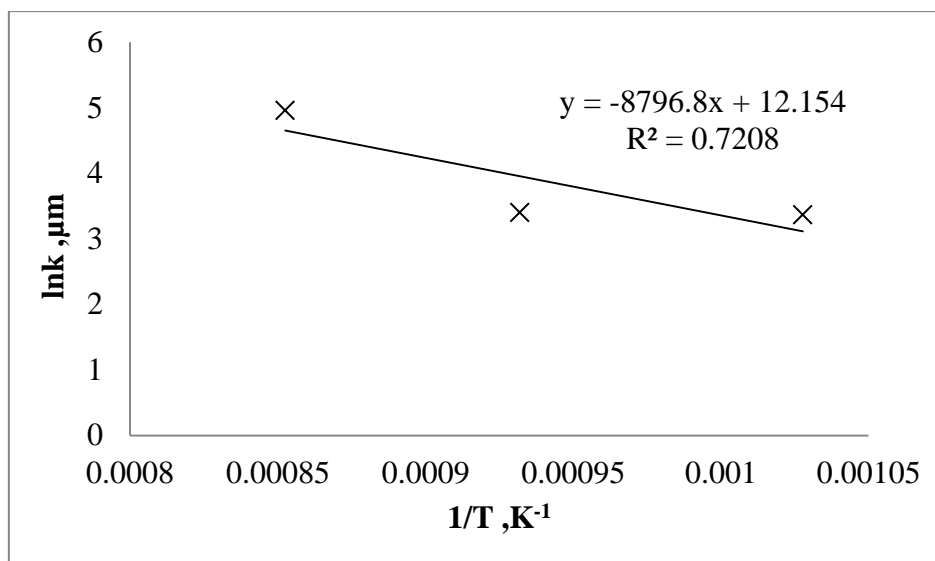
$$\ln k = -Q/RT + \ln A \quad \text{สมการที่ 4.4}$$

ซึ่งค่า k คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยา, Q คือ พลังงานกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา (activation energy, $J \text{ mol}^{-1}$), R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant) มีค่าเท่ากับ $8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$, T คือ อุณหภูมิ(K) และ A คือ ค่าคงที่ของอาร์เรนีอุส (preexponential constant)

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ปฏิกิริยา (ความชัน, k) และ $\ln k$ ของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในเชิง

อุณหภูมิในการทำอะลูมิเนียมในเชิง		1/T (K ⁻¹)	ความชัน, k ($\mu\text{m h}^{-1/2}$)	ln k
(°C)	(K)			
700	973	0.001028	28.92	3.36440
800	1073	0.000932	30.02	3.40186
900	1173	0.000853	142.24	4.95752

เมื่อนำลอการิทึมธรรมชาติของปฏิกิริยา ($\ln k$) กับอินเวอร์สของอุณหภูมิ ($1/T$) มาสร้างกราฟ จะได้ค่าความชันของกราฟเท่ากับ $-Q/R$ (รูปที่ 4.17)



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงลอการิทึมธรรมชาติของปฏิกิริยา ($\ln k$) กับอินเวอร์สของอุณหภูมิ ($1/T$) ของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในเชิง

จากกราฟรูปที่ 4.17 จะได้สมการดังนี้

$$\ln k = -8796.8/T + 12.154 \quad \text{สมการที่ 4.5}$$

ความชันของกราฟคือ $-Q/R$ มีค่าเท่ากับ -8796.8 จะได้ค่า Q เท่ากับ $73.141 \text{ KJ mol}^{-1}$ ซึ่งเป็นพลังงานจำนวนน้อยที่สุดที่จำเป็นต่อระบบ เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดได้ ในช่วงอุณหภูมิ 700 - 900 องศาเซลเซียส

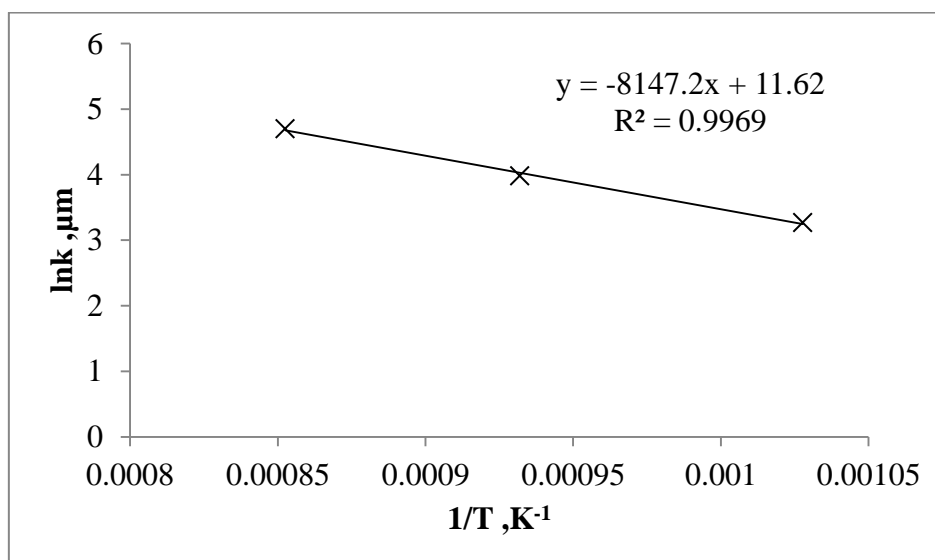
4.4.6 จลนพลศาสตร์ของการทำอะลูมิเนียมในเชิงของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน

จากความสัมพันธ์ของความหนาชั้นเคลือบกับรากที่สองของเวลาในการทำอะลูมิเนียมในเชิง (E vs. $t^{1/2}$) ของแต่ละอุณหภูมิ จะเป็นเส้นตรง จะสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา (activation energy, Q) ได้ ตามสมการของ Arrhenius

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่ปฏิกิริยา (ความชัน, k) และ $\ln k$ ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในเชิง

อุณหภูมิในการทำอะลูมิเนียมในเชิง		1/T (K ⁻¹)	ความชัน, k (μm h ^{-1/2})	ln k
(°C)	(K)			
700	973	0.001028	26.26	3.2680
800	1073	0.000932	53.588	3.9813
900	1173	0.000853	109.95	4.7000

โดยนำลอการิทึมธรรมชาติของปฏิกิริยา ($\ln k$) กับอินเวอร์สของอุณหภูมิ (1/T) มาสร้างกราฟ จะได้ค่าความชันของกราฟเท่ากับ $-Q/R$ (รูปที่ 4.18)



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงลอการิทึมธรรมชาติของปฏิกิริยา ($\ln k$) กับอินเวอร์สของอุณหภูมิ (1/T) ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในเชิง

จากกราฟรูปที่ 4.18 จะได้สมการดังนี้

$$\ln k = -8147.2/T + 11.62$$

สมการที่ 4.6

โดยความชันของกราฟซึ่งคือ $-Q/R$ มีค่าเท่ากับ -8147.2 จะได้ค่า Q เท่ากับ $67.736 \text{ KJ mol}^{-1}$ ซึ่งคือ พลังงานจำนวนน้อยที่สุดที่จำเป็นต้องแก่ระบบ เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดได้ ในช่วงอุณหภูมิ

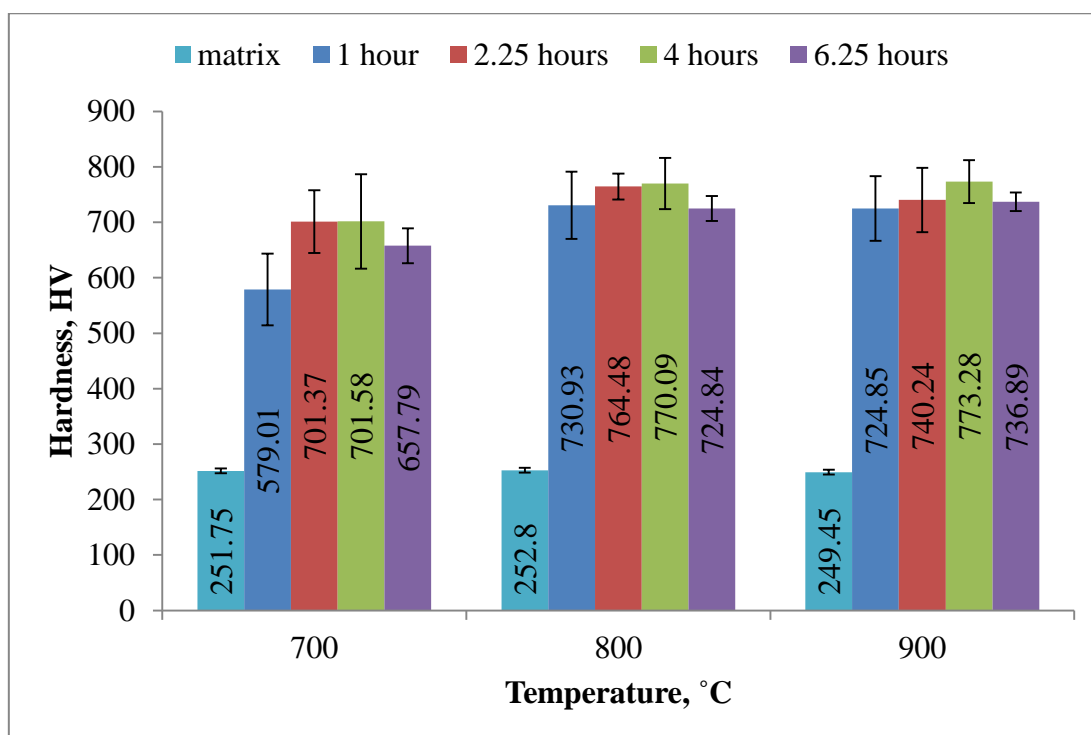
700 - 900 องศาเซลเซียส

4.5 คุณสมบัติทางกล

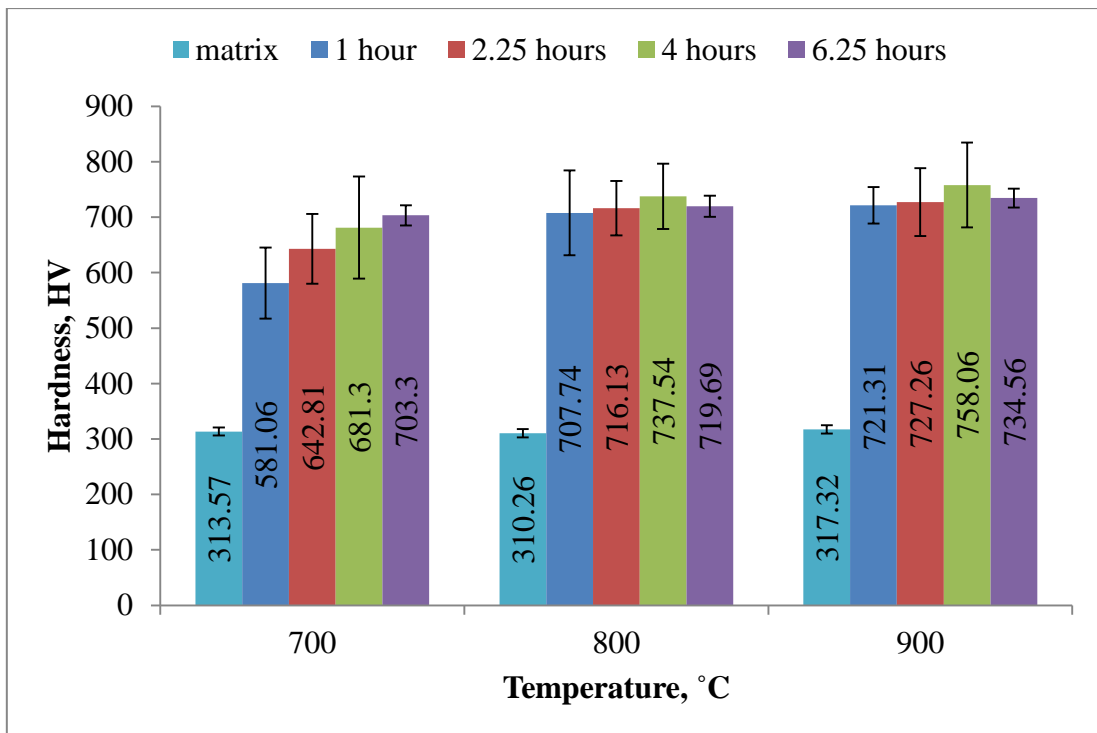
4.5.1 ความแข็ง

วัดความแข็งผิวชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (รูปที่ 4.19) และวัดความแข็งของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (รูปที่ 4.20)

สังเกตว่าชิ้นงานยังทำอะลูมิเนียมไนซิงที่อุณหภูมิและเวลาให้การเคลือบเพิ่มขึ้น ความแข็งผิวเคลือบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย อาจเกิดจากความหนาชั้นเคลือบที่เพิ่มขึ้น



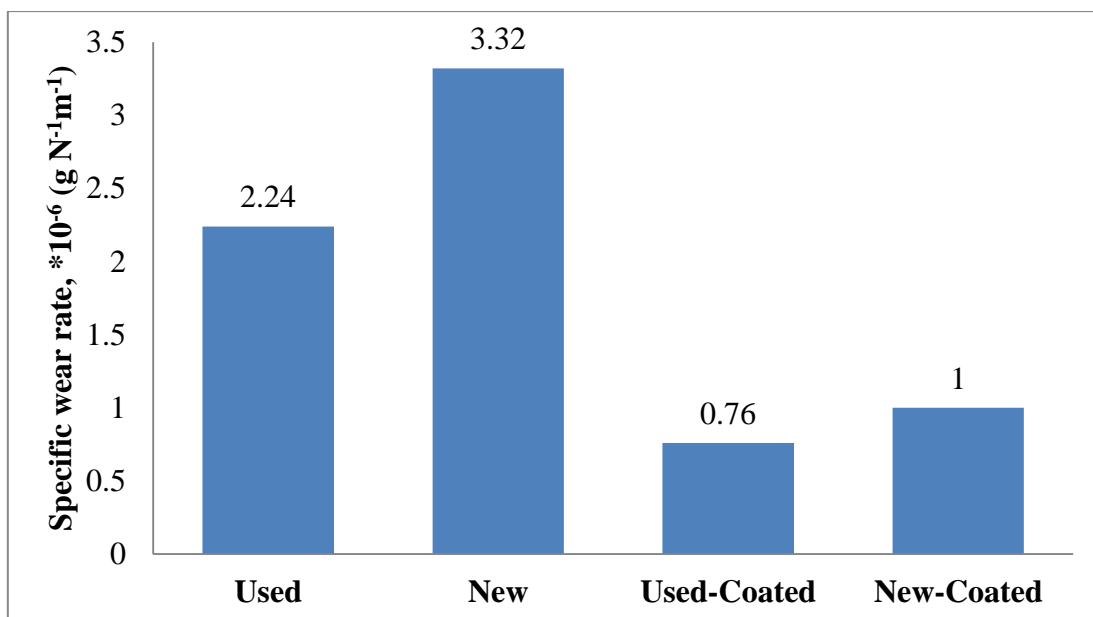
รูปที่ 4.19 ความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง



รูปที่ 4.20 ความแข็งของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง

4.5.2 การสึกกร่อน

เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและไม่ผ่านการใช้งาน ทั้งที่ทำอะลูมิเนียมไนซิง และไม่ได้ทำอะลูมิเนียมไนซิง มาทดสอบการสึกกร่อน (รูปที่ 4.21) พบว่าชิ้นงานที่มีอัตราการสึกกร่อนมากที่สุดไปน้อยสุดตามลำดับ ดังนี้ ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งานและไม่ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง $3.32 \times 10^{-6} \text{ g N}^{-1} \text{ m}^{-1}$, ชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและไม่ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง $2.24 \times 10^{-6} \text{ g N}^{-1} \text{ m}^{-1}$, ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 2.25 ชั่วโมง $1 \times 10^{-6} \text{ g N}^{-1} \text{ m}^{-1}$ และ ชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 2.25 ชั่วโมง $0.76 \times 10^{-6} \text{ g N}^{-1} \text{ m}^{-1}$



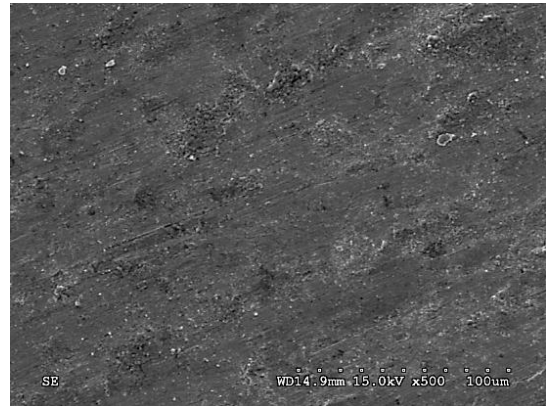
รูปที่ 4.21 อัตราการสึกหรอจำเพาะของชิ้นงานจากการทดสอบการสึกหรอ

หลังจากทดสอบการสึกหรอ ได้นำผิวสัมผัสของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ มาตรวจสอบด้วย SEM ปรากฏว่าผิวสัมผัสของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและไม่ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง เกิดการสึกหรอแบบ abrasive ส่วนชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งานและไม่ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง เกิดการสึกหรอแบบ abrasive ผสม adhesive ซึ่งการสึกหรอแบบ adhesive ถือว่าเป็นการสึกหรอที่รุนแรง จึงเป็นผลให้เกิดอัตราการสึกหรอมากที่สุดหรือน้ำหนักหายไปมากที่สุดนั่นเอง (รูปที่ 4.22) ในส่วนของผิวสัมผัสของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมไนซิงที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 2.25 ชั่วโมง และชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมไนซิงที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 2.25 ชั่วโมง (รูปที่ 4.23) พบการสึกหรอแบบ abrasive ทั้ง 2 แบบ จากข้อมูลข้างต้นสรุปได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง มีความต้านทานการสึกหรอดีกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง และชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานมีความต้านทานการสึกหรอดีกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน

ก.) ผ่านการใช้งาน

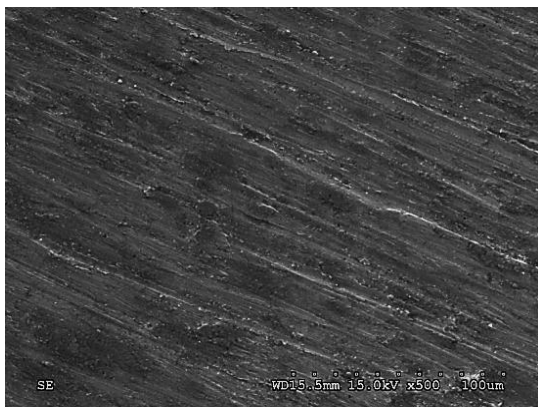


ข.) ไม่ผ่านการใช้งาน

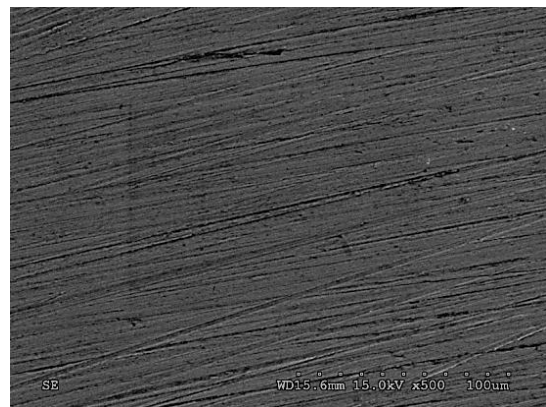


รูปที่ 4.22 ผิวสัมผัสของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอ

ก.) ผ่านการใช้งาน



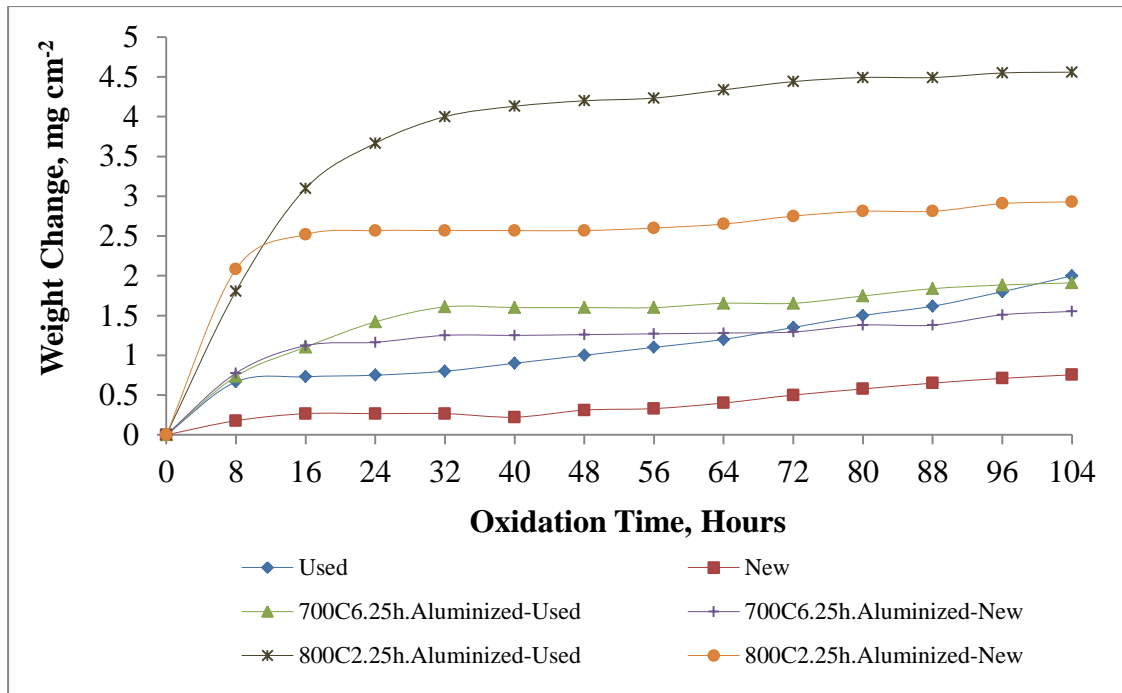
ข.) ไม่ผ่านการใช้งาน



รูปที่ 4.23 ผิวสัมผัสของชิ้นงานที่ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอ

4.6 ผลการทดสอบการเกิดออกซิเดชัน

ทดสอบการเกิดออกซิเดชันแบบวัฏจักร เพื่อเปรียบเทียบความเสถียรของชั้นเคลือบ และการยึดเกาะของชั้นออกไซด์ (รูปที่ 4.24) แสดงน้ำหนักสะสมที่หายไปกับเวลาในการเกิดออกซิเดชันแบบวัฏจักรที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและชิ้นงานไม่ผ่านการใช้งาน ทั้งชนิดที่ไม่ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิงและชนิดที่ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิงที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 6.25 ชั่วโมง และ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 2.25 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานทั้ง 6 ชนิด น้ำหนักไม่สูญหาย



รูปที่ 4.24 น้ำหนักของชิ้นงานหลังจากผ่านการทดสอบการเกิดออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานการเกิดออกซิเดชันของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง ในทั้งชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานมีอัตราการเกิดออกซิเดชันสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน อาจเป็นเนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการใช้งาน มีการใช้งานที่อุณหภูมิสูงที่นานกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งาน มีโอกาสเกิดการตกตะกอนของเฟส gamma prime (γ') Ni₃Al ในเนื้อพื้น ซึ่งทำให้อะตอมของAlในเนื้อพื้นเหลือน้อย ทำให้ไม่เพียงพอที่จะเกิดฟิล์มออกไซด์ต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงๆต่อไป ส่วนชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งานมีอะลูมิเนียมกระจายตัวในเนื้อพื้นค่อนข้างสม่ำเสมอทำให้มีโอกาสเกิดฟิล์มออกไซด์ที่เพียงพอในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ได้ดีกว่า

เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง และชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง พบว่าชิ้นงานที่ทำอะลูมิเนียมไนซิง มีอัตราการเกิดออกซิเดชันสูงในช่วงแรก จากนั้นจะเริ่มเสถียร ส่วนชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง ช่วงแรกมีอัตราการเกิดออกซิเดชันต่ำ แต่มีแนวโน้มจะสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและไม่ได้ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง จะมีอัตราการฟอร์ม

ออกซิเดชันที่สูงมากกว่า ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมในซิงที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 6.25 ชั่วโมง เมื่อผ่านการทดสอบเป็นเวลา 72 ชั่วโมง และอัตราการพอร์มออกซิเดชันจะสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 6.25 ชั่วโมง เมื่อผ่านการทดสอบเป็นเวลา 104 ชั่วโมง อาจเป็นไปได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและไม่ได้ผ่านการทำอะลูมิเนียมมีโอกาสเกิด Cr_2O_3 และ ออกไซด์ของนิกเกิล ซึ่ง Cr_2O_3 เป็นออกไซด์ที่มีความสามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ดี ส่วนชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมในซิงที่ช่วงแรกอาจเกิดออกไซด์ของนิกเกิล ซึ่งเป็นออกไซด์ชนิดที่ป้องกันการเกิดออกซิเดชันต่ำ แต่หลังจากนั้นเกิดออกไซด์ชนิดที่ป้องกันการเกิดออกซิเดชันได้ดี คือ Al_2O_3 ซึ่งมีความสามารถในการป้องกันการเกิดออกซิเดชันดีกว่า Cr_2O_3 [6,30]

เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง โดยชิ้นงานที่ทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส 2.25 ชั่วโมง จะมีอัตราการเกิดออกซิเดชันสูงกว่า ชิ้นงานที่ทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 6.25 ชั่วโมง อาจเป็นผลจากชิ้นงานที่ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส 2.25 ชั่วโมง มีผิวเคลือบที่หนากว่า โดยชั้นเคลือบประกอบด้วย Ni_2Al_3 และ NiAl_3 ซึ่ง NiAl_3 มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียส (จุดหลอมเหลว NiAl_3 854 องศาเซลเซียส) เมื่อทำการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส อาจทำให้เกิดการหลอมเหลวในชั้นเคลือบที่มีเฟส NiAl_3 แล้วทำให้เกิดการขยายตัวออกมาทำให้เกิดรอยแตกที่ผิวเคลือบและสามารถพอร์มออกซิเดชันได้มากกว่า หรืออาจเกิดจาก ชั้นเคลือบอะลูมิเนียมไนต์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส 2.25 ชั่วโมง มีความพรุนมากกว่า ทำให้ออกซิเจนแพร่ได้เร็วกว่า จึงมีอัตราการเกิดออกซิเดชันสูงกว่า

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษา ผลของอุณหภูมิและเวลา ของการเคลือบผิวโดยวิธี Pack aluminizing ต่อ โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 แล้วนำไปทดสอบการสึกหรอ และการเกิดออกซิเดชัน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. สารประกอบที่เกิดขึ้นจากการทำ Pack aluminizing บนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 แบบที่ผ่านการใช้งาน และไม่ผ่านการใช้งาน ได้แก่ สารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนต์ Ni_2Al_3 เป็นเฟสหลัก และ $NiAl_3$ เป็นเฟสรอง

2. ความหนาชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 แบบที่ผ่านการใช้งาน และไม่ผ่านการใช้งาน ซึ่งผ่านกระบวนการ Pack aluminizing พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความหนาชั้นเคลือบจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่า diffusion coefficient เพิ่มขึ้น และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นความหนาชั้นเคลือบจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการโตของชั้นเคลือบถูกควบคุมโดยกลไกการแพร่

3. การทดสอบการสึกหรอ ปรากฏว่า โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 ที่ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง มีความต้านทานการสึกหรอดีกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง เป็นผลมาจากความแข็งของสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนต์ Ni_2Al_3 และ $NiAl_3$

4. การทดสอบการเกิดออกซิเดชันแบบวัฏจักร เมื่อทดสอบเป็นเวลานานกว่า 104 ชั่วโมง พบว่าโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 ที่ผ่านการใช้งาน มีอัตราการเกิดออกซิเดชันสูงกว่า ชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานและไม่ผ่านการใช้งาน ซึ่งผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิงที่ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 6.25 ชั่วโมง อาจเกิดจากชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิงที่ช่วยขัดขวางการแพร่ของออกซิเจน

รายการอ้างอิง

- [1] ปัญญาวัชร วัชยาว. เอกสารประกอบ TECHNICAL TRAINING วิศวกรรมงานโลหะ สำหรับใช้ที่อุณหภูมิสูง. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2548.
- [2] Sims, C.T., and Hagel, W.C. The Superalloys. New York: Wiley, 1972.
- [3] ปัญญาวัชร วัชยาว. เอกสารประกอบ วิชา High temperature Materials. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)
- [4] Goward, G.W. Current Research on the Surface Protection of Superalloys for Gas Turbine Engines. J. Metals 22 (October 1970): 31–39.
- [5] Haynes International. Haynes 214 Alloy. [Online]. 2008. Available from: <http://www.haynesintl.com/pdf/h3008.pdf> [2012, Jan 5]
- [6] Visuttipitukul, P., Chansaksoong, S., and Wangyao, P. Coating of nickel aluminide by pack cementation to improve oxidation resistance of nickel-based superalloys grade IN 738. Journal of High Temperature Materials and Processes 28 (November 2009): 401-406.
- [7] Bhadeshia, H. K. D. H. Nickel Based Superalloys [Online]. Available from: http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2013/New_Crystallography_1.ppt - 9.62 MB [2012, Jan 15]
- [8] ญดา พลเสน และ ปรารักษ์ทิพย์ อุนหเศรษฐ์. ผลกระทบของการลดลงของอุณหภูมิอย่างกะทันหันระหว่างกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษเบสนิคเกิลเกรด GTD-111. ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [9] Li, M.H., Sun, X.F., Jin, T., Guan, H.R., and Hu, Z.Q. Oxidation Behavior of a Single-Crystal Ni-Base Superalloy in Air-II: At 1000, 1100, and 1150°C. Oxidation of Metals 60 (August 2003): 195-210.
- [10] Davis, J.R., et al. ASM Specialty Handbook – Nickel, Cobalt, and Their Alloys. Materials Park, Ohio: ASM International, 2000.
- [11] Jackson, C.M., and Hall, A.M. NASA technical memorandum NASA TM X-53448. United States: National Aeronautics and Space Administration, 1966.

- [12] National Research Council (U.S.). Committee on Coatings. High-temperature oxidation-resistant coating: coatings for protection from oxidation of superalloys, refractory metals, and graphite. Washington, D.C.: National Academy of Sciences, 1970.
- [13] Robinson, P.M., and Bever, M.B. Intermetallic Compounds. New York: Wiley, 1967.
- [14] Donachie, M.J., and Donachie, S.J. Superalloys: a technical guide. Materials Park, Ohio: ASM International, 2002.
- [15] Hounginou, C., Chevalier, S., and Larpin, J.P. Synthesis and characterization of pack cemented aluminide coatings on metals. Applied Surface Science 236 (September 2004): 256-269.
- [16] Goward, G.W. Progress in coating for gas turbine airfoils. Surface and Coating Technology 108-109 (October 1998): 73-79.
- [17] Hodge, A.M., and Dunand, D.C. Synthesis of nickel aluminide foams by pack aluminization of nickel foams. Intermetallics 9 (July 2001): 581-589.
- [18] ชลิตเทพ ชะนะ และ ณัฐรดา ศิริสุคนธ์. การเคลือบผิวด้วยวิธี Pack-Aluminizing เพื่อศึกษาคุณสมบัติของชั้นผิวเคลือบ. ปรียญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [19] Biswas, A., Roy, S.K., Gurumurthy, K.R., Prabhu, N., and Banerjee, S. A study of self-propagating high-temperature synthesis of NiAl in thermal explosion mode. Acta Materialia 50 (February 2002): 757-773.
- [20] Baker, H. and Okamoto, H. ASM Handbook Volume 03: Alloy Phase Diagrams. Materials Park, Ohio: ASM International, 1992.
- [21] Chen, M., Ma, E., Hemker, K., and Gogotsi, Y. Nanomaterials Handbook. Chapter 17. Mechanical Behavior of Nanocrystalline Metals. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [22] Pande, C.S., Rath, B.B., and Imam, M.A. Effect of annealing twins on Hall-Petch relation in polycrystalline materials. Materials Science and Engineering: A. 367 (February 2004): 171-175.
- [23] Shmorgun, V.G., Trykov, Yu.P., Slautin, O.V., Metelkin, V.V., and Bogdanov, A.I. The Kinetics of Diffusion Process in the Nickel-Aluminum Composition. Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 50 (June 2009): 286-289.

- [24] d'Heurle, F.M., and Ghez, R. Reactive diffusion in a prototype system: nickel-aluminum I: Non-constant diffusion coefficient. Thin Solid Films. 215 (July 1992): 19-25.
- [25] Hickl, A.J., and Heckel, R.W. Kinetics of Phase Layer Growth During Aluminide Coating of Nickel. Metallurgical Transaction A. 6 (March 1975): 431-440.
- [26] Fujiwara, K., and Horita, Z. Measurement of intrinsic diffusion coefficients of Al and Ni in Ni₃Al using Ni/NiAl diffusion couples. Acta Materialia. 50 (April 2002): 1571-1579.
- [27] Brossard, J.M., Panicaud, B., Balmain, J., and Bonnet, G. Modelling of aluminized coating growth on nickel. Acta Materialia. 55 (November 2007): 6586-6595.
- [28] Wei, H., Sun, X., Zheng, Q., Hou, G., Guan, H., and Hu, Z. Effect of Substrate Characteristics on Interdiffusion Coefficients of Ni and Al Atoms in \square -NiAl Phase of Aluminide Coatings. Journal of Materials Science & Technology 20 (2004): 196-198.
- [29] Connors, K.A. Chemical Kinetics: The Study of Reaction Rates in Solution. New York: VCH, 1990.
- [30] Young, D.J., Chyrkin, A., He, J., Gruner, D., and Quadakkers, W.J. Slow Transition from Protective to Breakaway Oxidation of Haynes 214 Foil at High Temperature. Oxidation of Metals. 79 (April 2013): 405-427.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตาราง ก.1 แสดงความหนาแน่นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิล Haynes 214 ที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นไมครอน)

ครั้งที่	1 ชั่วโมง	2.25 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6.25 ชั่วโมง
1	25.66	38.45	56.52	69.88
2	26.65	41.22	56.21	69.25
3	25.66	38.85	55.9	69.57
4	26.65	42.02	55.59	68.32
5	25.66	42.02	53.11	70.19
6	26.65	43.21	54.04	71.12
7	26.65	43.6	55.9	68.32
8	27.63	42.81	55.9	71.12
9	25.66	42.02	57.14	68.32
10	27.63	42.81	57.76	73.29
ค่าเฉลี่ย	26.45	41.701	55.81	69.94
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.78	1.75	1.36	1.58

ตาราง ก.2 แสดงความหนาแน่นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิล Haynes 214 ที่ผ่านการใช้งาน และทำอะลูมิเนียมซิง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นไมครอน)

ครั้งที่	1 ชั่วโมง	2.25 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6.25 ชั่วโมง
1	67.64	77.2	103.4	112.61
2	66.85	76.23	100.3	112.81
3	66.85	80.09	94.2	111.02
4	66.45	77.2	94.2	111.41
5	69.63	78.16	91.99	111.81
6	69.63	69.48	91.99	110.62
7	66.85	77.2	92.73	113.4
8	67.25	77.2	93.83	114.2
9	68.44	78.16	88.31	111.02
10	70.03	81.06	87.95	115.39
ค่าเฉลี่ย	67.96	77.20	93.89	112.43
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.36	3.08	4.79	1.55

ตาราง ก.3 แสดงความหนาแน่นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิล Haynes 214 ที่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นไมครอน)

ครั้งที่	1 ชั่วโมง	2.25 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6.25 ชั่วโมง
1	96.69	171.89	221.29	309.495
2	97.49	169.51	220.255	312.07
3	97.09	166.72	214.58	317.23
4	98.28	167.92	209.94	325.485
5	99.48	167.92	205.81	324.97
6	99.48	169.51	204.265	324.97
7	98.28	165.13	205.3	326
8	97.88	167.52	203.75	326.515
9	98.68	168.71	201.69	326.515
10	97.09	171.1	199.11	324.455
ค่าเฉลี่ย	98.04	168.59	208.6	321.77
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.98	2.01	7.7	6.41

ตาราง ก.4 แสดงความหนาแน่นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิล Haynes 214 ที่ไม่ผ่านการ
ใช้งาน และทำอะลูมิเนียมซิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง
(หน่วยเป็นไมครอน)

ครั้งที่	1 ชั่วโมง	2.25 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6.25 ชั่วโมง
1	32.28	38.375	57.12	66.01
2	32.21	38.17	57.83	67.26
3	31.73	38.17	58.32	66.08
4	31.19	38.175	59.31	67.02
5	30.12	38.38	59.37	71.34
6	32.26	38.58	59.82	71.33
7	29.51	38.58	60.42	72.28
8	31.6	38.375	60.24	71.32
9	31.17	38.585	60.86	64.47
10	32.33	38.585	61.01	64.91
ค่าเฉลี่ย	31.43	38.40	59.42	68.19
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.95	0.18	1.32	3.03

ตาราง ก.5 แสดงความหนาแน่นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 ที่ไม่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมซิง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นไมครอน)

ครั้งที่	1 ชั่วโมง	2.25 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6.25 ชั่วโมง
1	61.53	87.24	122.14	142.34
2	61.99	90.46	119.84	142.8
3	62.45	88.62	121.68	140.5
4	62.91	87.7	121.68	140.05
5	62.45	88.16	120.3	139.59
6	63.36	87.7	119.38	140.96
7	61.53	89.54	120.3	139.59
8	60.61	90.46	120.76	139.13
9	63.36	89.54	121.22	143.26
10	63.36	89.54	118.92	142.8
ค่าเฉลี่ย	62.36	88.90	120.62	141.10
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.94	1.17	1.06	1.56

ตาราง ก.6 แสดงความหนาแน่นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพูนิกเกิล Haynes 214 ที่ไม่ผ่านการใช้งานและทำอะลูมิเนียมซิง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นไมครอน)

ครั้งที่	1 ชั่วโมง	2.25 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6.25 ชั่วโมง
1	113.41	155.29	252.63	270.19
2	111.12	154.92	251.64	265.37
3	110.66	156.02	239.75	262.47
4	111.58	155.65	235.79	266.33
5	111.58	154.18	236.78	268.26
6	111.58	155.29	233.81	262.47
7	110.66	156.02	233.81	275.02
8	109.74	156.76	232.82	271.16
9	112.04	155.65	245.7	265.37
10	110.66	156.76	238.76	275.02
ค่าเฉลี่ย	111.30	155.65	240.15	268.17
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.00	0.80	7.34	4.61

ตาราง ก.7 ความแข็งของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 ที่ผ่านการใช้งาน และผ่านการทำอะลูมิไนซิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นHV)

ครั้งที่	เนื้อพื้่น	1 ชั่วโมง	2.25 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6.25 ชั่วโมง
1	243.6	477.6	606.4	491	635.4
2	248.3	490.2	611.3	641.6	636.8
3	250.2	525.7	670	665.2	637.7
4	250.4	540.4	677.7	701.7	638.5
5	251.1	602.7	726.2	742.3	645.6
6	251.8	608.9	733.7	748.3	645.6
7	252.7	620.5	743.2	751.3	653
8	253.2	629.1	743.8	757.4	663.7
9	257.3	641.1	750.1	758	686.1
10	258.9	653.9	751.3	759	735.5
ค่าเฉลี่ย	251.8	579.01	701.37	701.58	657.79
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.32	64.68	56.53	85.1	31.47

ตาราง ก.8 ความแข็งของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 ที่ผ่านการใช้งาน และผ่านการ
ทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นHV)

ครั้งที่	เนื้อพื้่น	1 ชั่วโมง	2.25 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6.25 ชั่วโมง
1	246.2	587.3	726.8	674.6	692.8
2	246.4	682.4	736.4	730.2	698.5
3	248.5	702	744.7	750.7	705.3
4	251.9	740.2	752.5	760.5	716.8
5	253.9	740.5	764.9	768.3	722.7
6	254.7	745.9	772.4	772.4	724.2
7	255	772.1	781	795.7	738.7
8	256	773.7	782.6	797.3	742.3
9	256.4	781	788.8	810.4	743.8
10	259	784.2	794.7	840.8	763.3
ค่าเฉลี่ย	252.8	730.93	764.48	770.09	724.84
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.42	60.64	23.36	46.2	22.38

ตาราง ก.9 ความแข็งของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล Haynes 214 ที่ผ่านการใช้งาน และผ่านการ
ทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นHV)

ครั้งที่	เนื้อพื้่น	1 ชั่วโมง	2.25 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6.25 ชั่วโมง
1	234	652.5	585.7	686.1	719.3
2	234.3	660.1	724.2	743.5	720.7
3	242.1	680.1	740.2	752.2	723
4	243.6	689.6	744.4	767.4	727.1
5	246.6	713.1	748.6	770.8	729.1
6	247.1	713.7	750.1	796	740.5
7	254.4	745	764.9	797.3	741.7
8	260.2	769.9	775.9	799	744.7
9	263.2	809.3	781.6	809.7	749.5
10	269	815.2	786.8	810.8	773.3
ค่าเฉลี่ย	249.5	724.85	740.24	773.28	736.89
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	11.93	58.37	57.81	38.67	16.68

ตาราง ก.10 ความแข็งของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิล Haynes 214 ที่ไม่ผ่านการใช้งาน และผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นHV)

ครั้งที่	เนื้อพื้่น	1 ชั่วโมง	2.25 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6.25 ชั่วโมง
1	305.6	496	524.5	501.4	680.3
2	308.5	500.2	555	562.8	684
3	307	519.8	626.7	634.4	686.4
4	309.1	523.6	637.3	643	686.7
5	309.7	604.5	641.8	712.3	702.8
6	313.2	613.8	643.7	740.2	708.4
7	314.9	614	691.2	742.9	710
8	315.4	627.4	691.7	751	723.3
9	323.2	646.4	692.3	751.3	724.6
10	329.1	664.9	723.9	773.7	726.5
ค่าเฉลี่ย	313.56	581.06	642.81	681.3	703.3
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	7.50	64.10	63.03	92.25	18.03

ตาราง ก.11 ความแข็งของโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิด Haynes 214 ที่ไม่ผ่านการใช้งาน และผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นHV)

ครั้งที่	เนื้อฟีน	1 ชั่วโมง	2.25 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6.25 ชั่วโมง
1	299.3	573.3	636.8	616.7	688.2
2	304.4	609.8	641.8	665.7	697.7
3	304.7	632.6	680.9	710.9	710.6
4	309.2	700.1	692.8	732.9	711.4
5	310.8	721.9	736.4	745	712.5
6	312	750.1	740.2	751	722.5
7	312.5	755	753.8	782.9	728.2
8	316	765.8	754.4	786.2	734.3
9	316.7	783.6	755	789.8	743.2
10	317	785.2	769.2	794.3	748.3
ค่าเฉลี่ย	310.3	707.74	716.13	737.54	719.69
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	5.91	76.54	49.22	58.79	19.27

ตาราง ก.12 ความแข็งของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิล Haynes 214 ที่ไม่ผ่านการใช้งาน และผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นHV)

ครั้งที่	เนื้อพื้่น	1 ชั่วโมง	2.25 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6.25 ชั่วโมง
1	308.1	669.7	617.8	642.8	713.9
2	310.3	679.6	623.3	655.7	718.2
3	310.8	683.7	728.2	692.3	720.7
4	313.3	713.7	728.8	732.3	729.7
5	314	730.2	730.5	757.1	731.1
6	316.6	731.4	732.6	777.2	732.6
7	318.4	743.8	764.2	787.8	736.4
8	321.4	748	766.1	844.4	737.3
9	329	755	788.1	844.4	757.1
10	331.3	758	793	846.6	768.6
ค่าเฉลี่ย	317.3	721.31	727.26	758.06	734.56
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	7.85	32.92	61.22	76.56	17.01

ตาราง ก.13 น้ำหนักของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล Haynes 214 จากการทดสอบการสึกหรอ โดยวิธี PIN ON DISC (หน่วยเป็นกรัม)

ระยะทาง ในการ ทดสอบ	ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทำอะลูมิไนซิง				ชิ้นงานที่ผ่านการทำอะลูมิไนซิง			
	ไม่ผ่านการใช้งาน		ผ่านการใช้งาน		ไม่ผ่านการใช้งาน		ผ่านการใช้งาน	
	น้ำหนัก ที่ลดลง	น้ำหนัก ที่ลดลง	น้ำหนัก ที่ลดลง	น้ำหนัก ที่ลดลง	น้ำหนัก ที่ลดลง	น้ำหนัก ที่ลดลง	น้ำหนัก ที่ลดลง	น้ำหนัก ที่ลดลง
0	33.5728	-	33.4849	-	33.8589	-	33.6353	-
50	33.5712	0.0016	33.4829	0.002	33.858	0.0009	33.6342	0.0011
100	33.5704	0.0008	33.4815	0.0014	33.8579	0.0001	33.6339	0.0003
150	33.5698	0.0006	33.4806	0.0009	33.8578	0.0001	33.6334	0.0005
200	33.5694	0.0004	33.4797	0.0009	33.8576	0.0002	33.6333	0.0001
250	33.5689	0.0005	33.4788	0.0009	33.8575	0.0001	33.6331	0.0002
300	33.5687	0.0002	33.4782	0.0006	33.8573	0.0002	33.633	0.0001
350	33.5685	0.0002	33.4775	0.0007	33.8572	0.0001	33.633	0
400	33.5684	0.0001	33.4773	0.0002	33.857	0.0002	33.6329	0.0001
450	33.5679	0.0005	33.4768	0.0005	33.857	0	33.6328	0.0001
500	33.5672	0.0007	33.4766	0.0002	33.857	0	33.6328	0

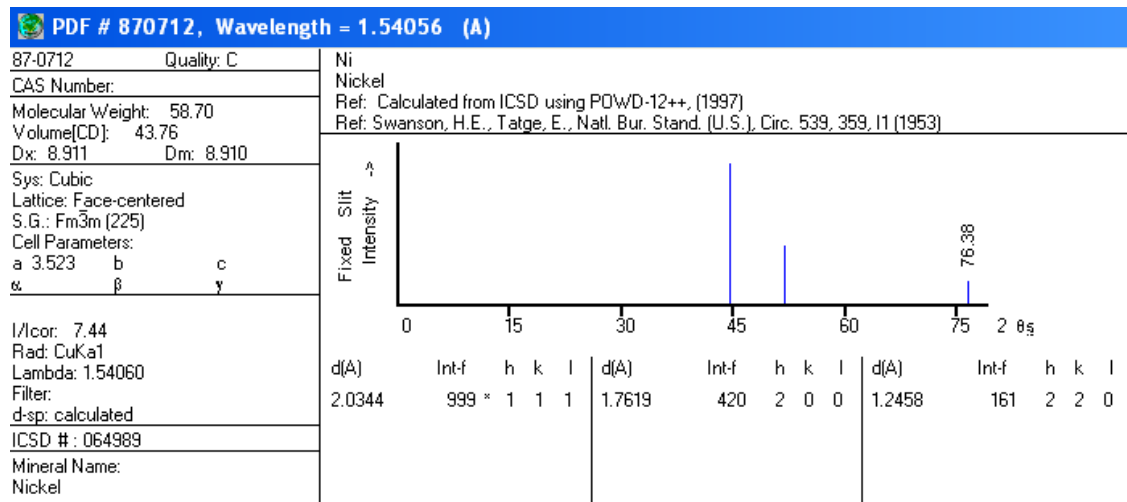
ตาราง ก.14 อัตราส่วนของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงจากน้ำหนักเริ่มต้นต่อพื้นที่ผิว ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพูนิกเกิล Haynes 214 ที่ไม่ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง และผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 6.25 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 2.25 ชั่วโมง เมื่อทำการทดสอบออกซิเดชันแบบวัฏจักรที่ อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส (หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

ชนิด	ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง		ชิ้นงานที่ทำอะลูมิเนียมไนซิงที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 6.25 ชั่วโมง		ชิ้นงานที่ทำอะลูมิเนียมไนซิงที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 2.25 ชั่วโมง	
	ผ่านการใช้งาน	ไม่ผ่านการใช้งาน	ผ่านการใช้งาน	ไม่ผ่านการใช้งาน	ผ่านการใช้งาน	ไม่ผ่านการใช้งาน
0 ชั่วโมง	0	0	0	0	0	0
8 ชั่วโมง	0.6661	0.1775	0.7351	0.7759	1.8073	2.0837
16 ชั่วโมง	0.7306	0.2663	1.1027	1.1207	3.0983	2.5198
24 ชั่วโมง	0.7510	0.2663	1.4205	1.1638	3.6663	2.5682
32 ชั่วโมง	0.8057	0.2663	1.6081	1.2500	4.0343	2.5682
40 ชั่วโมง	0.9267	0.2721	1.6184	1.2511	4.1311	2.5682
48 ชั่วโมง	1.0403	0.3106	1.6258	1.2636	4.2120	2.5682
56 ชั่วโมง	1.1348	0.3374	1.6375	1.2707	4.2343	2.608
64 ชั่วโมง	1.2468	0.4106	1.6540	1.2829	4.3376	2.6536
72 ชั่วโมง	1.3571	0.5013	1.6540	1.2931	4.4409	2.7589
80 ชั่วโมง	1.5027	0.5769	1.7459	1.3793	4.4925	2.8105
88 ชั่วโมง	1.6177	0.6588	1.8378	1.3793	4.4925	2.8105
96 ชั่วโมง	1.8177	0.7100	1.8838	1.5086	4.5524	2.9074
104 ชั่วโมง	1.9984	0.7544	1.9157	1.5517	4.5618	2.9359

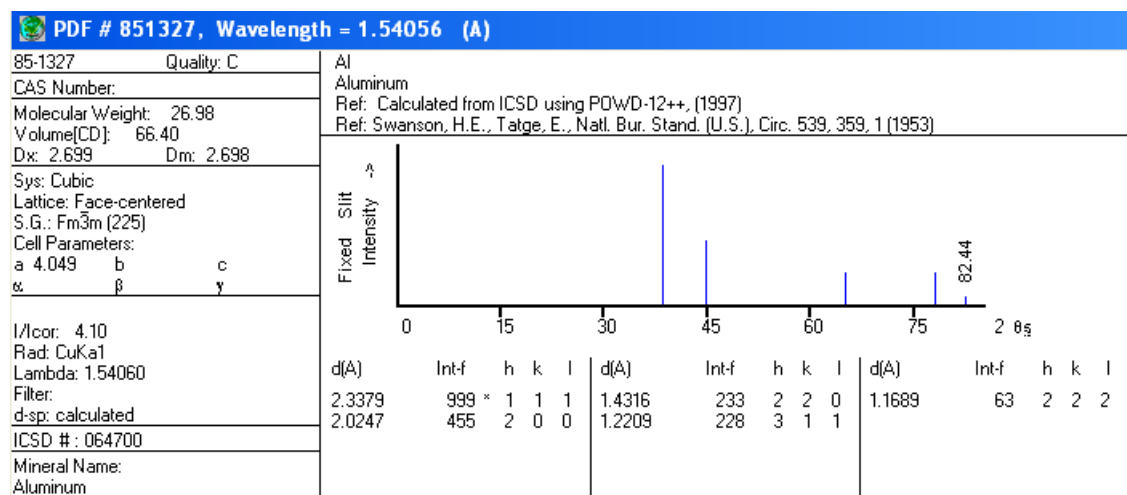
ภาคผนวก ข

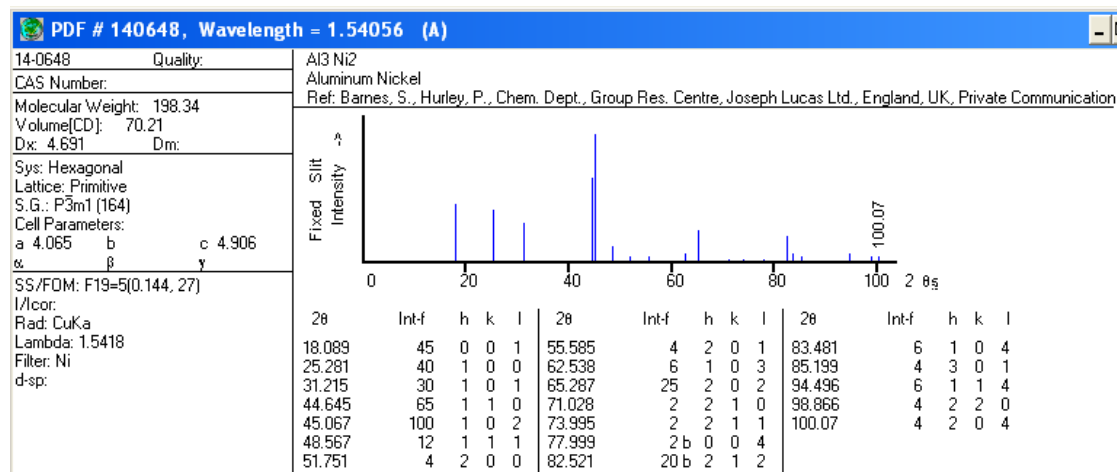
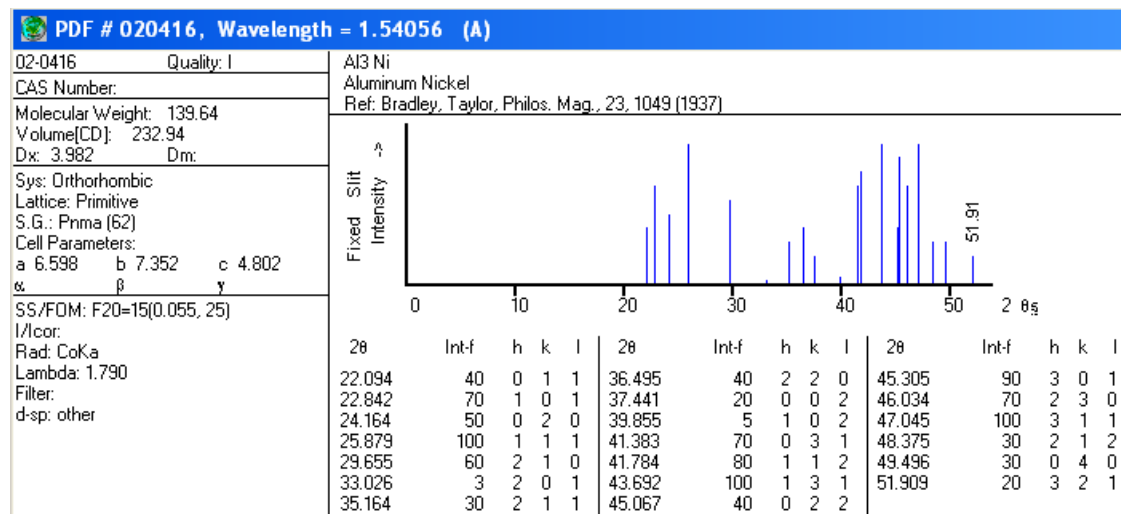
ตาราง ข. Reference pattern ของ Ni, Al, Ni₂Al₃ และ NiAl₃

Nickel (Ni)



Aluminum (Al)



Aluminum Nickel (Ni_2Al_3)Aluminum Nickel (NiAl_3)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

- ชื่อ - นามสกุล** : นางสาวปัสตา กิรติมาศ
- วัน - เดือน - ปีเกิด** : วันเสาร์ที่ 14 มีนาคม 2530
- วุฒิการศึกษา** : เข้าศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนบุรีรัมย์พิทยาคม ปีการศึกษา 2542
- : เข้าศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2549
- : เข้าศึกษาระดับปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2553
- อีเมล** : Pasuta.k@hotmail.com