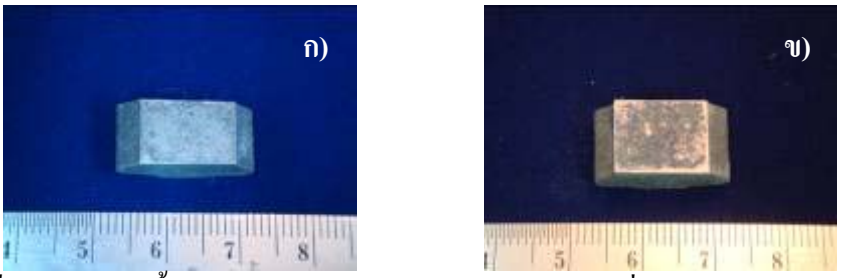
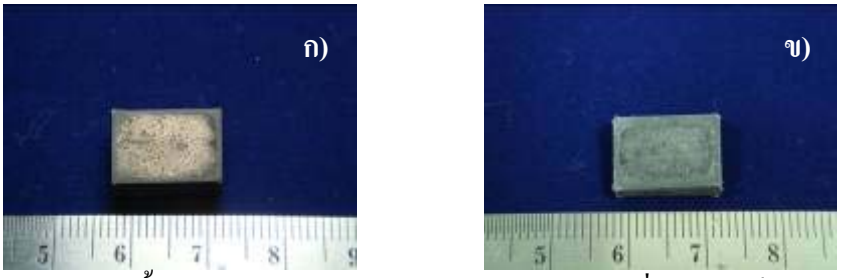
4.1.2 ผลของเวลาต่อรูปร่างและลักษณะพื้นผิวชั้นเคลือบ

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ผ่านการเคลือบผิว ด้วยอุณหภูมิ 900องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง ชิ้นงานหลังจากเคลือบผิวแล้วมีลักษณะภายนอกคล้ายกัน คือ ขนาดของชิ้นงานจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง และ ผิวหน้ามีลักษณะหยาบ ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.3 ก.) และ 4.3 ข.)



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิไนซิงบน IN 738 ที่ 900 ^{O}C เป็นเวลา ก.) 1 และ ข.) 6.25 ชั่วโมง

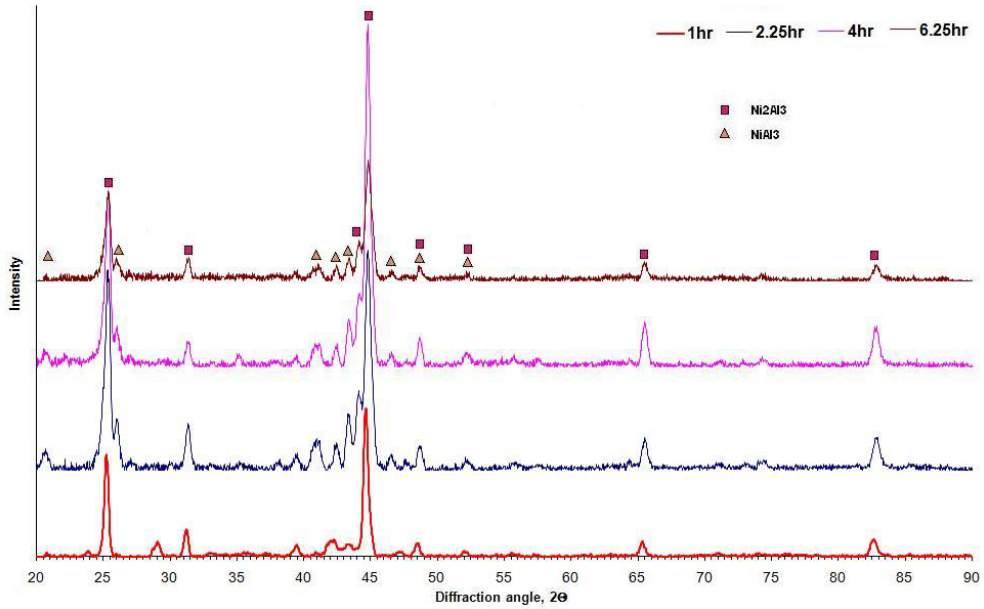


รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิไนซิงบน GTD 111 ที่ 900 ^{O}C เป็นเวลา ก.) 1 และ ข.) 6.25 ชั่วโมง

ในส่วนของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง พิจารณารูปที่ 4.4 ก.) และ 4.4 ข.) พบว่าชิ้นงานมีขนาดคงเดิมและผิวหน้ามีลักษณะหยาบเช่นเดียวกับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ดังนั้นการเพิ่มเวลาในการเคลือบผิวจะไม่ส่งผลต่อขนาดและลักษณะผิวของชิ้นงานหลังจากผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธีอะลูมิไนซิงแบบผงเมื่อใช้อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสและต่ำกว่า

4.2 ผลการตรวจสอบเชิงคุณภาพของชั้นเคลือบก่อนอบเป็นเนื้อเดียว

4.2.1 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738

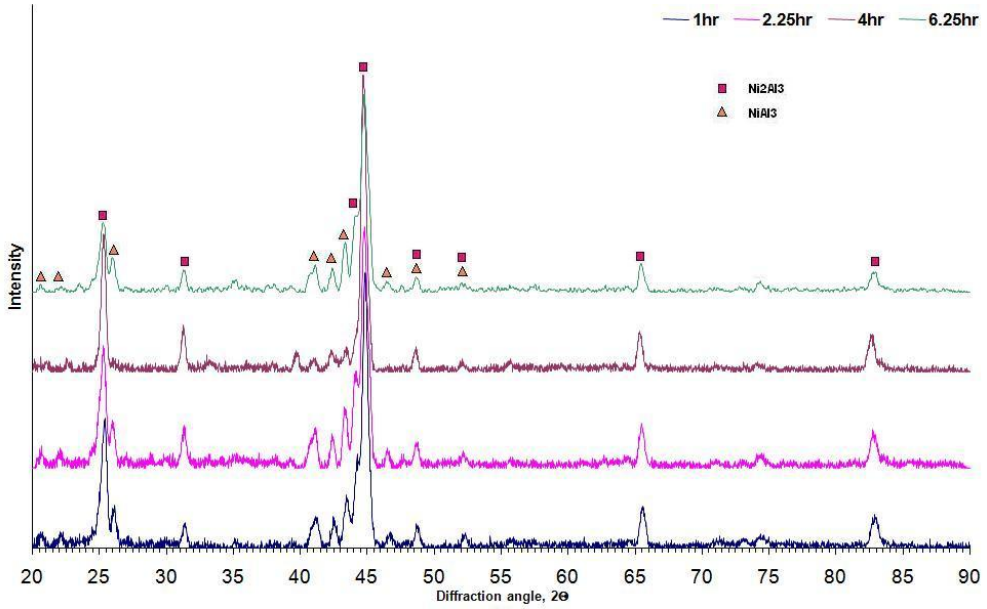


รูปที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิไนซิงบน IN 738 ที่ 800°C เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD

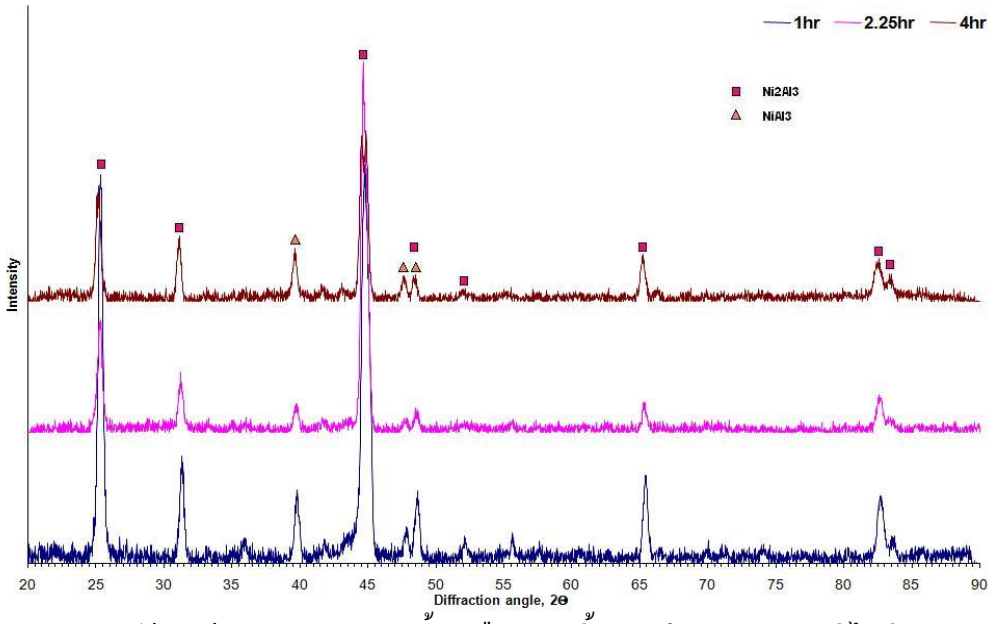
จากรูปที่ 4.5 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลด้วย XRDแบบ GIXD ที่มุม 5 องศา เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ประกอบด้วยเฟส 2 เฟส คือ เฟส Ni_2Al_3 และ $NiAl_3$ (JCPDS No. 03-1052 และ 02-0416) โดยความเข้มสัมพัทธ์ของเฟสที่มีความเข้มสัมพัทธ์สูงสุดคือเฟส Ni_2Al_3 จากนั้นเมื่อเพิ่มเวลาของการเคลือบผิวจะเห็นว่าผลของการตรวจสอบด้วย GIXD ที่เกิดขึ้นมีลักษณะคงเดิม โดยยังคงมีเฟส Ni_2Al_3 มีความเข้มสัมพัทธ์สูงสุด แสดงให้เห็นว่าเฟสหลักที่เกิดขึ้นบริเวณผิวชั้นเคลือบเมื่อทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสโดยใช้เวลาในการเคลือบไม่เกิน 6.25 ชั่วโมงเป็นเฟส Ni_2Al_3

เมื่อทำการตรวจสอบชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง ด้วย GIXD ที่มุม 5 องศา (รูปที่ 4.6) พบว่าลักษณะของผลการตรวจสอบของชิ้นงานทั้ง 4 เวลา จะมีลักษณะเป็นไปในทางเดียวกับชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่ 800 องศาเซลเซียส โดยโครงสร้างชั้นเคลือบประกอบด้วย 2 เฟส คือ เฟส Ni_2Al_3 และ$NiAl_3$ (JCPDS No. 03-1052 และ 02-0416) ซึ่งเฟส Ni_2Al_3 จะมีค่าความเข้มสัมพัทธ์สูงสุด แสดงให้เห็นว่าเฟสหลักที่เกิดขึ้นบริเวณผิวชั้นเคลือบเมื่อทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ที่เวลาใช้เวลาในการเคลือบไม่เกิน 6.25 ชั่วโมง เป็นเฟส Ni_2Al_3 เช่นเดียวกัน ซึ่งหากพิจารณาผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของทั้งสองอุณหภูมิ จะพบว่าแม้เวลาใน

การเคลือบผิวเพิ่มขึ้น ลักษณะของผลที่ได้มีลักษณะเช่นเดิม โดยเฟสที่เกิดขึ้นจะมี Ni_2Al_3 เป็นเฟสหลักและมี $NiAl_3$ เป็นเฟสรอง



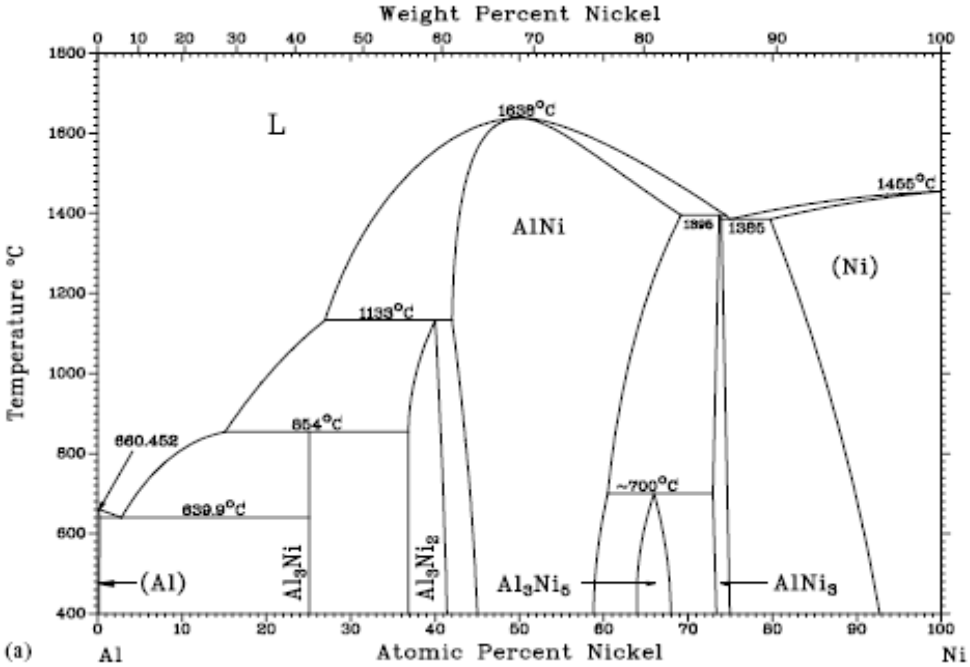
รูปที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิไนซิงบน IN 738 ที่ $900^{O}C$ เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD



รูปที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิไนซิงบน IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD

สำหรับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง เมื่อนำมาทำการตรวจสอบด้วย GIXD ที่มุม 5 องศา จะ

พบเฟส 2 เฟส คือเฟส Ni_2Al_3 และเฟส $NiAl_3$ โดยพบว่าเฟสที่มีความเข้มสัมพัทธ์สูงสุดคือ เฟส Ni_2Al_3 เช่นกัน (รูปที่ 4.7) แต่เมื่อพิจารณาความเข้มสัมพัทธ์ของชิ้นงานโดยเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่ 800 และ 900 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าความเข้มสัมพัทธ์ของพีคของเฟส $NiAl_3$ ลดลง แสดงให้เห็นว่าเฟสหลักที่เกิดขึ้นในชั้นเคลือบหลังจากผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธีอะลูมิไนซิงแบบผงที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส คือ Ni_2Al_3 และมีปริมาณของเฟส $NiAl_3$ ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งจากแผนภูมิสมดุลของนิกเกิลและอะลูมิเนียมในรูปที่ 4.8 จะพบว่าเฟส $NiAl_3$ ไม่เสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 854 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อทำการเคลือบผิวชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ทำให้มีเฟส Ni_2Al_3 เป็นหลัก และพบเฟส $NiAl_3$ เล็กน้อยซึ่งอาจเกิดระหว่างการเย็นตัว ดังจะเห็นได้จากความเข้มสัมพัทธ์ของเฟส $NiAl_3$ มีค่าลดลงมากเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่ 800 และ 900 องศาเซลเซียส จึงกล่าวได้ว่า สารประกอบ $NiAl_3$ จึงมีปริมาณลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้น โดยเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 854 องศาเซลเซียสจึงไม่สามารถเกิดเฟส $NiAl_3$ ได้ อย่างไรก็ตามเฟส $NiAl_3$ ที่พบอาจเกิดขึ้นระหว่างการเย็นตัวของชิ้นงานหลังจากการเคลือบซึ่งเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ภายในเตา จึงทำให้ยังคงพบสารประกอบ $NiAl_3$ ได้ในชิ้นงานที่ผ่านการทำอะลูมิไนซิงแบบผงที่อุณหภูมิสูงกว่า 854 องศาเซลเซียส

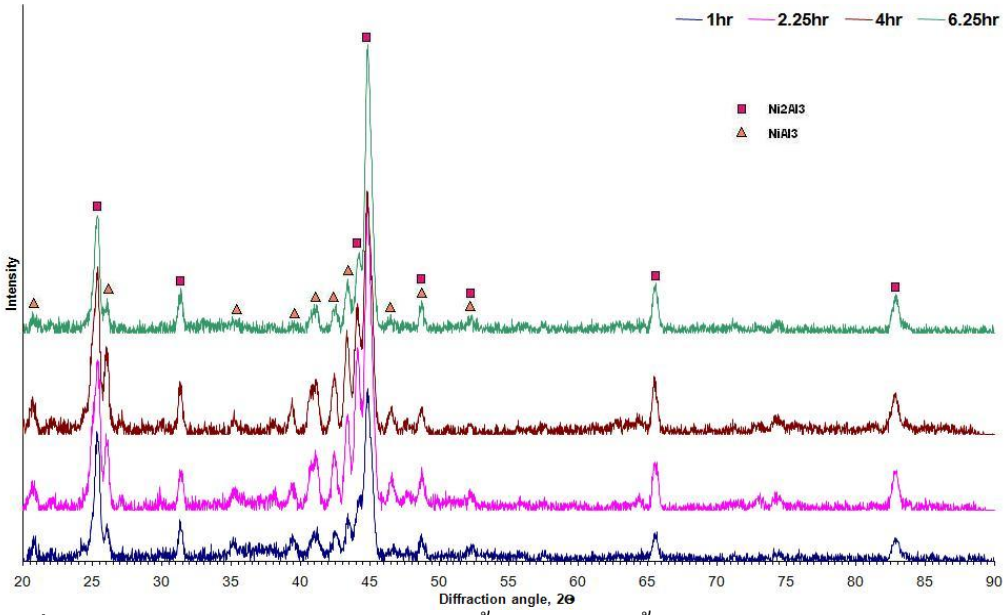


รูปที่ 4.8 แผนภูมิสมดุลของนิกเกิลและอะลูมิเนียม

4.2.2 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111

เนื่องจากผลการตรวจสอบรูปร่างและลักษณะพื้นผิวของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่ 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆ แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส จะมีลักษณะชั้นเคลือบที่หนา มี

การแตกและหลุดร่อนได้ง่าย ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่อุณหภูมิเดียว คือ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆ จากนั้นเมื่อนำมาตรวจสอบชั้นเคลือบด้วย GIXD ที่มุม 5 องศา ได้ผลดังรูปที่ 4.9 ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า มีลักษณะคล้ายกับผลการตรวจสอบที่ได้จากโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส โดยชั้นเคลือบประกอบด้วยเฟส 2 เฟส คือ เฟส Ni_2Al_3 และ $NiAl_3$ (JCPDS No. 03-1052 และ 02-0416) และโดยเฟส Ni_2Al_3 มีค่าความเข้มสัมพัทธ์สูงที่สุด แสดงว่า เฟสหลักที่เกิดขึ้นบริเวณผิวชั้นเคลือบเมื่อทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างๆ เป็นเฟส Ni_2Al_3



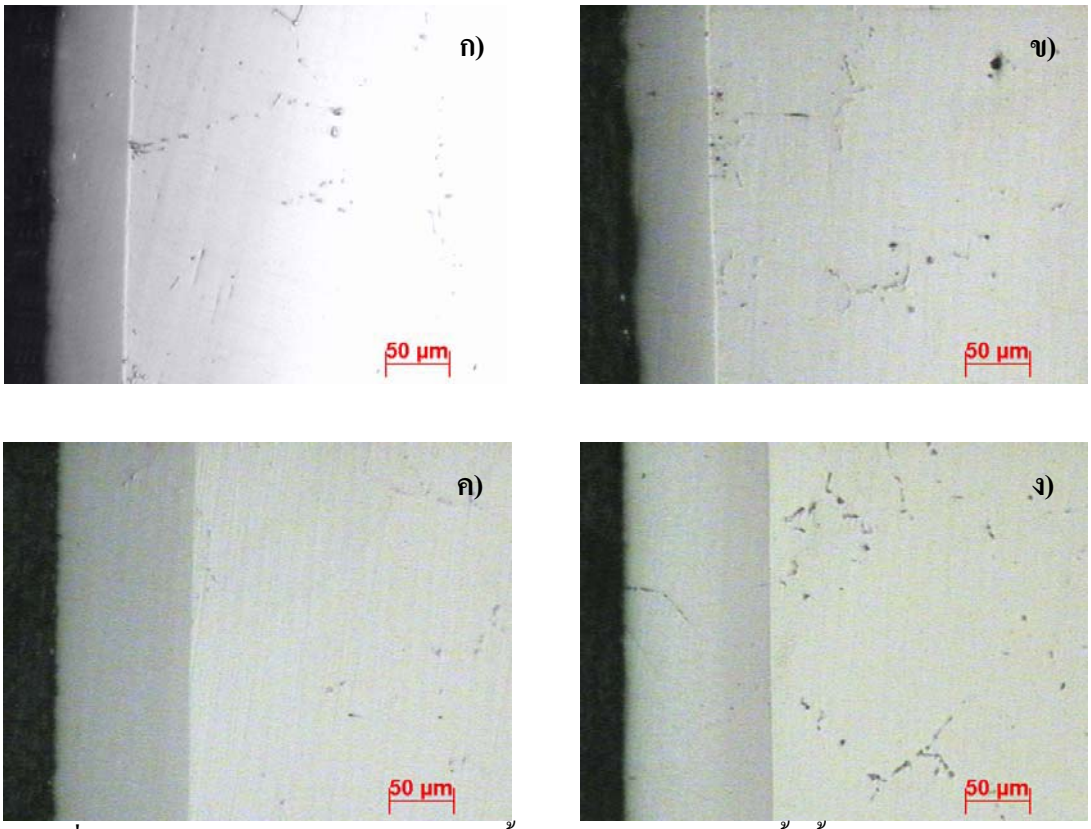
รูปที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิไนซิงบน GTD 111 ที่ 900°C เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD

เฟสที่เกิดขึ้นในชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 มีลักษณะคล้ายกับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 กล่าวคือ เกิดสารประกอบเฟส Ni_2Al_3 เป็นหลักและพบ $NiAl_3$ เนื่องจากโลหะผสมพิเศษทั้งสองชนิดมีส่วนผสมหลักคือ นิกเกิลในปริมาณที่ใกล้เคียงกันจึงเกิดเฟสนิกเกิลอะลูมิไนด์เป็นหลักเช่นเดียวกัน และเกิดเฟส เฟส Ni_2Al_3 เป็นหลักเนื่องจากเฟส $NiAl_3$ นั้นไม่เสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 854 องศาเซลเซียส แต่อาจเกิดขึ้นเฟส $NiAl_3$ ขึ้นระหว่างการเย็นตัวเช่นเดียวกับที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2.1 ส่วนสารประกอบอื่นที่เกิดขึ้นก็มีลักษณะไม่แตกต่างจากโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 เนื่องจากมีธาตุผสมทางเคมีที่คล้ายกันและมีปริมาณใกล้เคียงกัน จึงทำให้เมื่อทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิเดียวกัน พีคที่เกิดขึ้นมีลักษณะเหมือนกัน

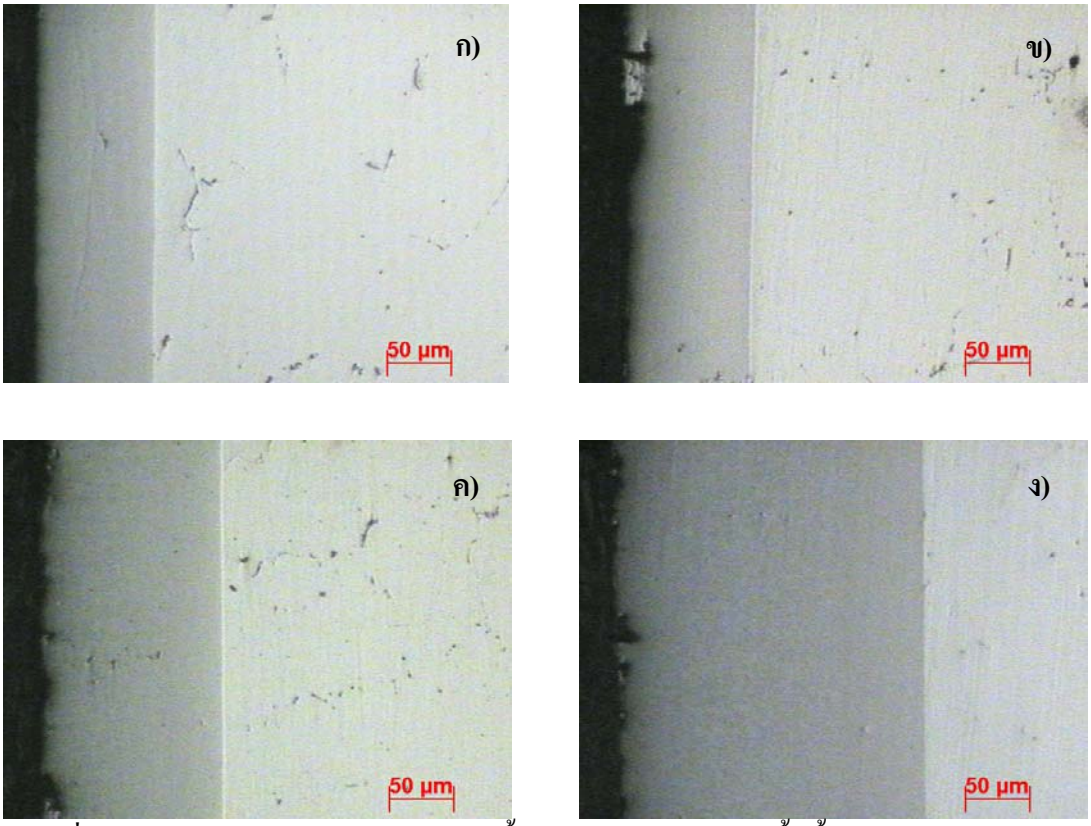
4.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบก่อนอบเป็นเนื้อเดียว

4.3.1 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738

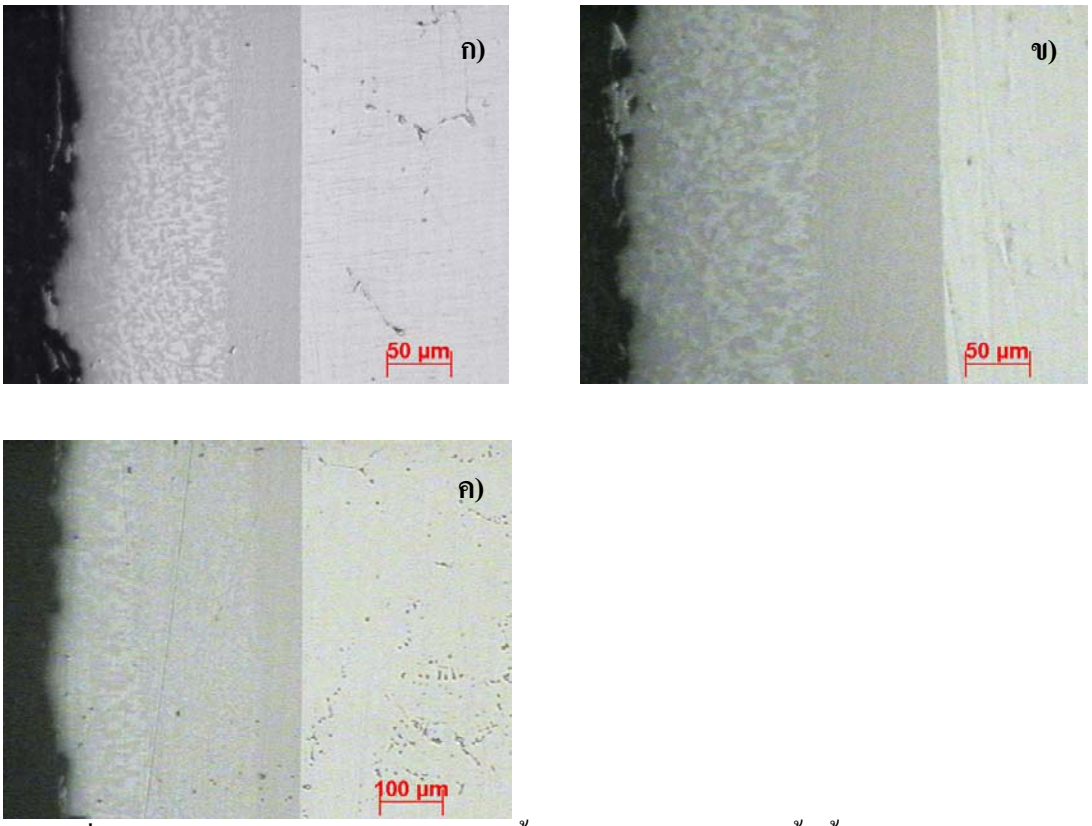
เมื่อนำโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบในภาคตัดขวางด้วยกล้อง Optical Microscope จะเห็นว่าชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่ 800 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ด้วยเวลาต่างๆ ลักษณะชั้นเคลือบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ชั้นเคลือบด้านนอกจะมีสีเทาเข้มและสีเทาอ่อนขนาดเล็กสลับกัน และชั้นเคลือบด้านในจะมีสีเทาเข้ม ดังรูปที่ 4.10 4.11และ 4.12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายโครงสร้างบริเวณกลางชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวที่ 800 ^{O}C เป็นเวลา ก.) 1 ข.) 2.25 ค.) 4 และ ง.) 6.25 ชั่วโมง



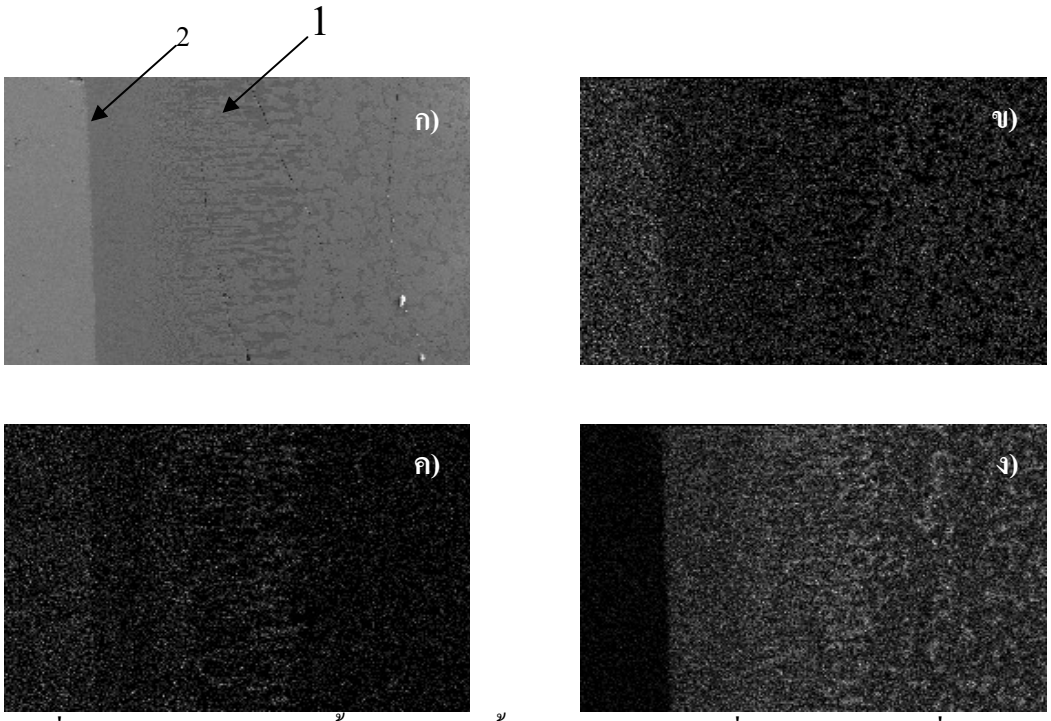
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายโครงสร้างบริเวณกลางชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวที่ 900 ^{O}C เป็นเวลา ก.) 1 ข.) 2.25 ค.) 4 และ ง.) 6.25 ชั่วโมง



รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายโครงสร้างบริเวณกลางชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวที่ 1000 ^{O}C เป็นเวลา ก.) 1 ข.) 2.25 และ ค.) 4 ชั่วโมง

ในชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีปริมาณส่วนสีเทาอ่อนมากขึ้นและเห็นได้ชัดเจนกว่าชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่ 800 และ 900 องศาเซลเซียส ในส่วนของบริเวณชั้นเคลือบด้านในจะมีสีเทาเข้มเช่นเดียวกัน และเมื่อเวลาในการเคลือบผิวเพิ่มขึ้นบริเวณที่มีสีเทาเข้มสลับสีเทาอ่อนจะเพิ่มขึ้น

จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคตัดขวาง พบว่า เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว จะไม่มีผลต่อลักษณะชั้นเคลือบมากนัก กล่าวคือ ชั้นเคลือบประกอบด้วยสองเฟส คือ เฟส Ni_2Al_3 และ $NiAl_3$ โดยการเพิ่มเวลาขึ้นในแต่ละอุณหภูมิยังคงได้เฟสที่พบในโครงสร้างจุลภาคไม่แตกต่างกันแต่จะได้ความหนาชั้นเคลือบที่แตกต่างกันซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยวิธี XRD แบบ GIXD ที่พีคของชิ้นงานที่เคลือบผิวในแต่ละอุณหภูมิมีลักษณะเหมือนกัน แม้เวลาในการเคลือบผิวจะแตกต่างกัน

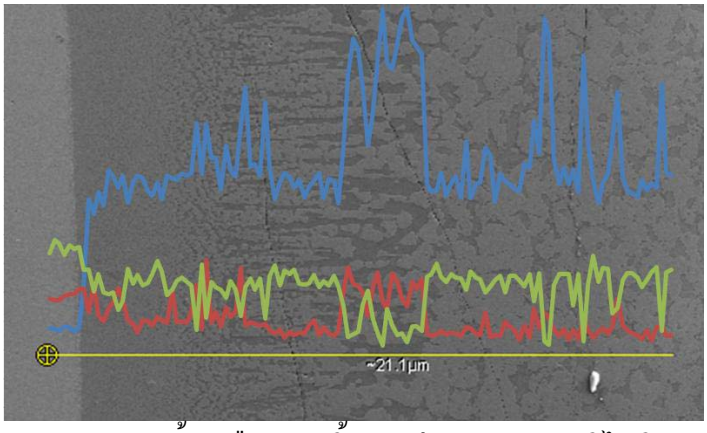


รูปที่ 4.13 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวที่ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยวิธี Mapping EDS ก.) SEM ข.) นิกเกิล ค.) โครเมียม และ ง.)อะลูมิเนียม

ในขณะที่อุณหภูมิในการเคลือบผิวจะมีผลต่อลักษณะชั้นเคลือบ คือ ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ชั้นเคลือบด้านนอกจะมีโครงสร้างสีเทาเข้มและสีเทาอ่อนที่มีขนาดใหญ่กว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส กล่าวคือ ขนาดเกรนแต่ละเฟสมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการทำอะลูมิไนซิงที่สูงขึ้น และ ช่วงการเย็นตัวจากอุณหภูมิอะลูมิไนซิงถึงอุณหภูมิห้องภายในเตา ซึ่งที่อุณหภูมิอะลูมิไนซิงสูงจะนานกว่าที่อุณหภูมิอะลูมิไนซิงต่ำ อย่างไรก็ตามจากผลการตรวจสอบด้วย XRD แบบ GIXD ในรูปที่ 4.5-4.7 แสดงให้เห็นว่าเฟสที่เกิดขึ้นยังคงเป็นเฟส Ni_2Al_3 และ $NiAl_3$ ทั้งที่การเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 800, 900 และ

1000 องศาเซลเซียส จึงได้เลือกชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อตรวจสอบเชิงปริมาณของธาตุต่างๆในโครงสร้างจุลภาคของชั้น โดยได้ทำการตรวจสอบเฟสสีเทาเข้มและสีเทาอ่อนในโครงสร้างจุลภาคตัดขวางด้วยวิธี EDS แสดงผลแบบ Mapping ในรูปที่ 4.13 จากผลการตรวจสอบพบว่า บริเวณหมายเลข 1 (สีเทาเข้ม) จะมีปริมาณของนิกเกิลน้อยกว่าบริเวณหมายเลข 2 (สีเทาอ่อน)ในขณะที่ปริมาณอะลูมิเนียมและโครเมียมบริเวณหมายเลข 1 จะมีมากกว่าบริเวณหมายเลข 2

หลังจากนั้นทำการตรวจสอบด้วยวิธี EDS แบบ Linescan พบว่า ผลที่ได้มีลักษณะเหมือนกัน คือ ปริมาณนิกเกิลจะมีมากที่บริเวณเนื้อพื้น และมีค่าลดลงในบริเวณชั้นเคลือบหมายเลข 2 (สีเทาอ่อน) และหมายเลข 1 (สีเทาเข้ม) ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณของอะลูมิเนียมจะมีจำนวนมากที่สุดในบริเวณที่มีสีเทาเข้ม และจะมีปริมาณลดลงในบริเวณเทาอ่อนและเนื้อพื้นตามลำดับ และปริมาณของโครเมียมจะมีมากในบริเวณชั้นเคลือบที่มีสีเทาเข้ม (รูปที่ 4.14)



รูปที่ 4.14 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิไนซิงบนโลหะนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ 1000 ^{O}C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยวิธี EDS แบบ Linescan (สีฟ้า-อะลูมิเนียม, สีเหลือง-นิกเกิล, สีแดง-โครเมียม)

จากผลของลักษณะชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง บริเวณชั้นเคลือบด้านนอกจะมีปริมาณของชั้นเคลือบสีเทาเข้ม (หมายเลข1) จำนวนมาก และเมื่อตรวจสอบปริมาณนิกเกิลในชั้นเคลือบสีเทาเข้ม (หมายเลข 1) ก็พบว่ามีปริมาณที่น้อยกว่าชั้นเคลือบสีเทาอ่อน (หมายเลข 2) ในขณะที่ปริมาณอะลูมิเนียมในชั้นเคลือบสีเทาเข้ม (หมายเลข 1) มีปริมาณสูงกว่าชั้นเคลือบสีเทาอ่อน (หมายเลข 2) ดังนั้น บริเวณชั้นเคลือบด้านนอกจึงมีโครงสร้างเป็นเฟส $NiAl_3$ และ ชั้นเคลือบด้านในจะมีโครงสร้างเป็นเฟส Ni_2Al_3 ซึ่งเมื่อตรวจสอบด้วย XRD แบบ GIXD จึงพบพีคของ 2 เฟส คือ เฟส Ni_2Al_3 และ $NiAl_3$ นอกจากนี้การตรวจสอบในรูปที่ 4.14 พบว่าในเฟส $NiAl_3$ มีปริมาณโครเมียมผสมอยู่ และจากผล XRD ไม่พบพีคของโครเมียมอะลูมิไนด์ จึงสรุปได้ว่าโครเมียมละลายอยู่ในเฟส $NiAl_3$ โดยไม่ตกผลึกออกมาเป็นสารประกอบโครเมียมอะลูมิไนด์

เนื่องจากลักษณะชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส มีลักษณะที่เหมือนกับลักษณะชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่ 1000 องศาเซลเซียส จึงอาจกล่าวได้ว่า บริเวณชั้นเคลือบด้านนอกจึงมีโครงสร้างเป็นเฟส $NiAl_3$ และ ชั้นเคลือบด้านในจะมีโครงสร้างเป็นเฟส Ni_2Al_3 ซึ่งเมื่อตรวจสอบด้วย XRD แบบ GIXD จึงพบพีคของ 2 เฟส คือ เฟส Ni_2Al_3 และ $NiAl_3$ เช่นเดียวกัน

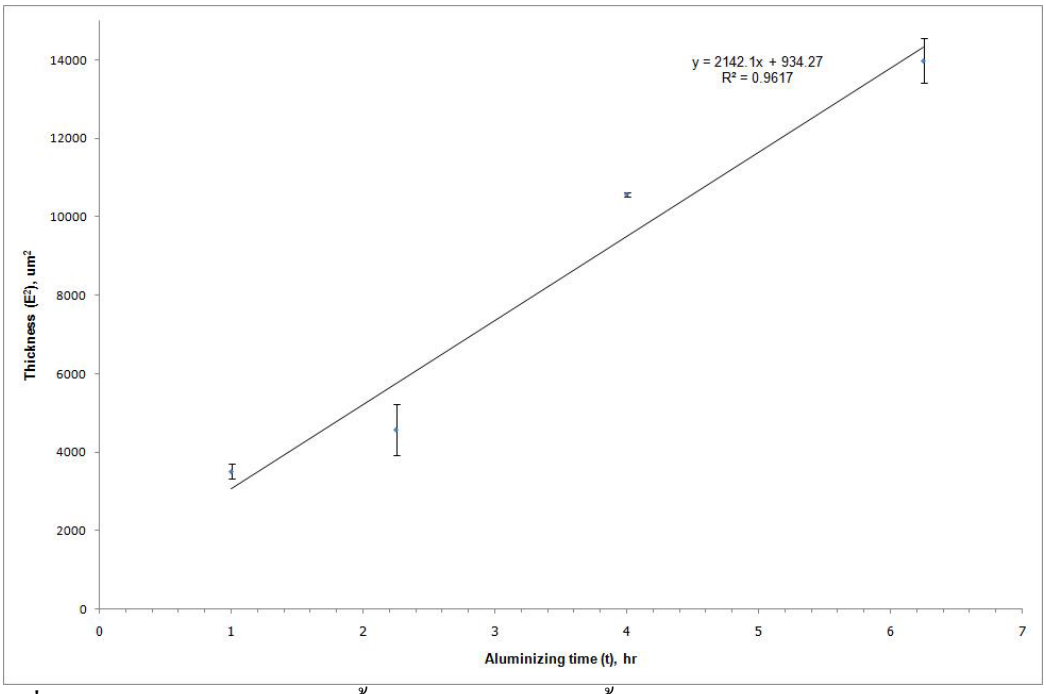
4.4 ผลการตรวจสอบความหนาชั้นเคลือบ

4.4.1 ความหนาชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738

เมื่อนำโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง มาทำการวัดความหนาชั้นเคลือบ จะพบว่าเมื่อเวลาในการเคลือบผิวเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความหนาของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าความหนาเฉลี่ยเป็น 59.23, 67.55, 102.86 และ 118.25 μm ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) จากนั้นเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าความหนาชั้นเคลือบยกกำลังสองต่อเวลาในการทำการเคลือบผิว พบว่าจะได้กราฟที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 4.21 โดยความชันของกราฟที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 2142.1

ตารางที่ 4.1 แสดงความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิไนซิงบน IN 738 ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง

เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ (μm)	SD
1.00	59.23	1.57
2.25	67.55	4.66
4.00	102.86	0.26
6.25	118.25	2.41

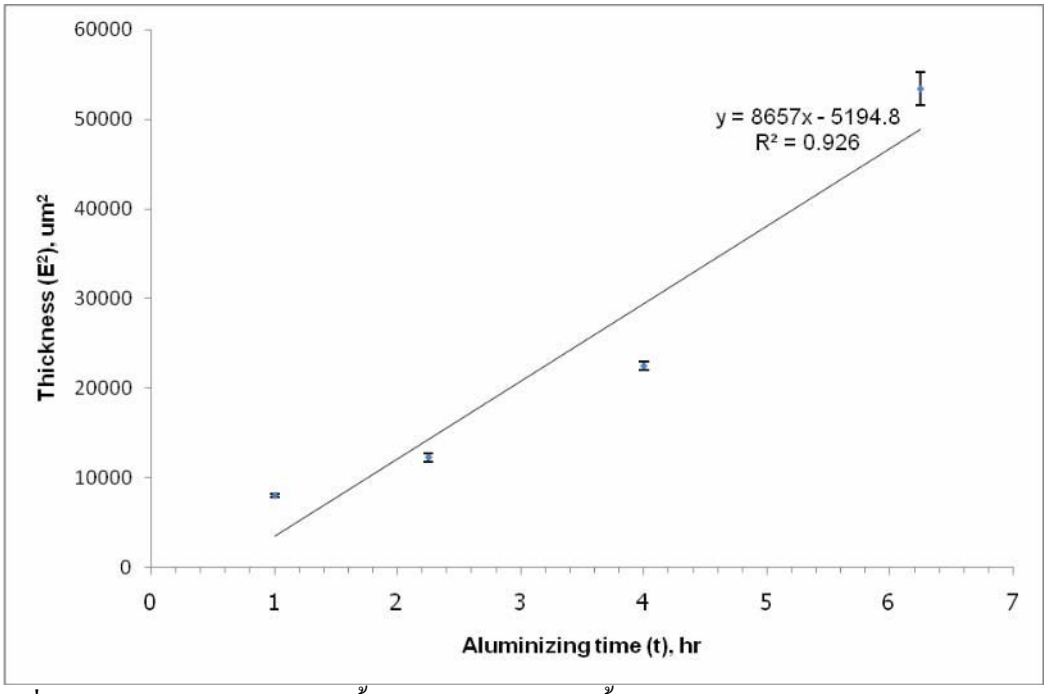


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความหนาชั้นเคลือบต่อเวลาของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิไนซิงบน IN 738 ที่อุณหภูมิ 800°C

จากนั้นทำการตรวจสอบความหนาของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง พบว่า เมื่อเวลาในการเคลือบผิวเพิ่มขึ้น จะมีค่าความหนาเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยจะมีความหนาเฉลี่ยเป็น 89.41, 110.71, 149.85 และ 231.02 μm ตามลำดับ (ตารางที่ 4.2) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าความหนาชั้นเคลือบยกกำลังสองและเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว จะพบว่า กราฟที่ได้มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.22 โดยความชันของกราฟ มีค่า เท่ากับ 8657

ตารางที่ 4.2 แสดงความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิไนซิงบน IN 738 ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง

เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ (μm)	SD
1.00	89.41	1.07
2.25	110.71	2.14
4.00	149.85	1.68
6.25	231.02	3.98

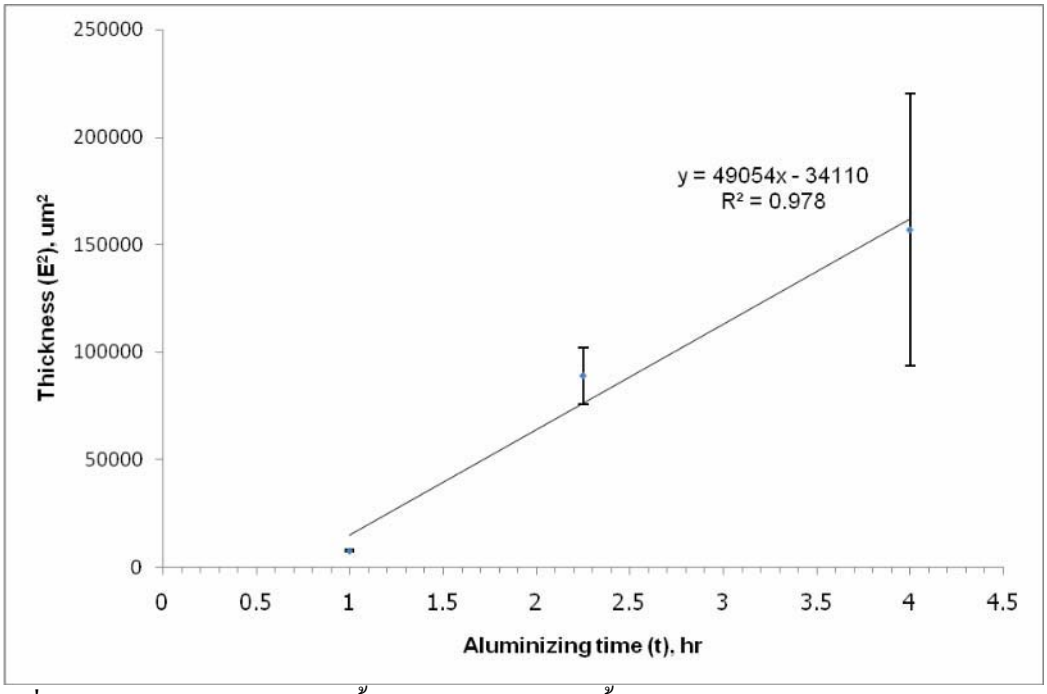


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความหนาชั้นเคลือบต่อเวลาของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิไนซิงบน IN 738 ที่อุณหภูมิ 900°C

ในส่วนของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง เมื่อทำการตัดชิ้นงานแล้ววัดความหนา จะได้ว่าค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบจะเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการเคลือบผิวเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความหนาเฉลี่ยที่ตรวจสอบได้มีค่าเท่ากับ 86.65, 297.68 และ 389.56 μm ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.3 จากนั้นเมื่อนำค่าความหนาเฉลี่ยยกกำลังสองและเวลาในการเคลือบผิวมาเขียนกราฟ ก็จะได้กราฟที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 4.23 และมีค่าความชันของกราฟเท่ากับ 49054

ตารางที่ 4.3 แสดงความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิไนซิงบน IN 738 ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง

เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ (μm)	SD
1.00	86.65	3.15
2.25	297.68	22.70
4.00	389.56	82.01
6.25	-	-



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความหนาชั้นเคลือบต่อเวลาของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิไนซิงบน IN 738 ที่อุณหภูมิ 1000°C

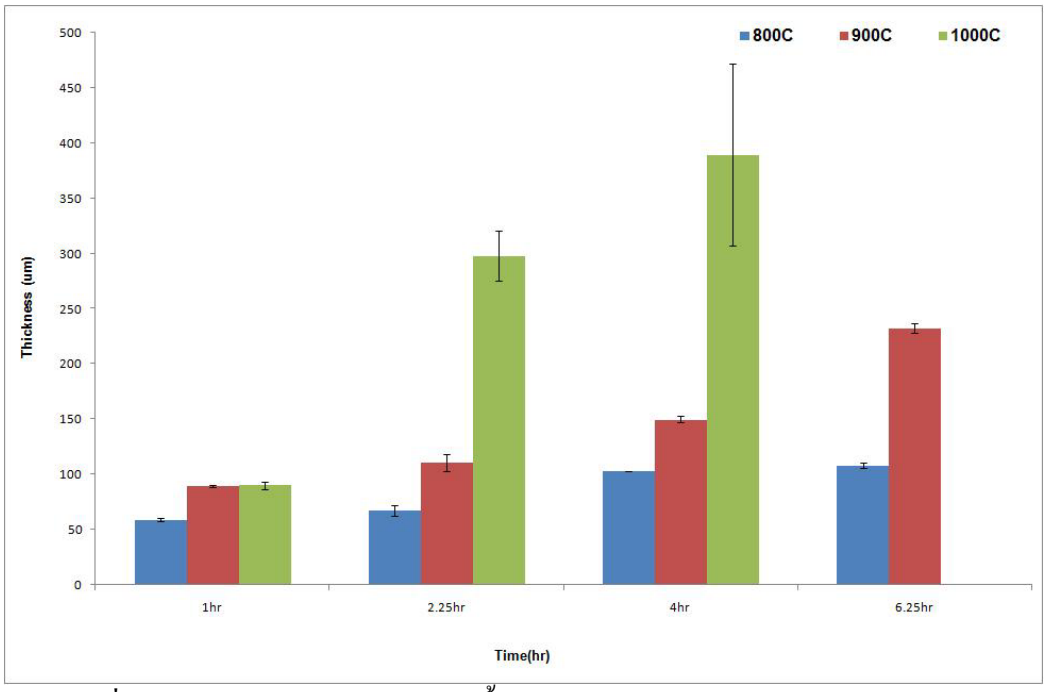
จากผลการตรวจสอบกราฟระหว่างค่าความหนาชั้นเคลือบยกกำลังสองต่อเวลาในการเคลือบผิวของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ข้างต้นพบว่า ค่าความหนาเฉลี่ยยกกำลังสอง (E^2) จะมีค่าแปรผันตามอุณหภูมิ (t) ดังนั้นกลไกการเกิดชั้นเคลือบในกระบวนการ Pack-Aluminizing จึงเป็นแบบ Diffusion Control โดยมีอะลูมิเนียมแพร่ในนิกเกิล ดังที่ Wagner ได้ทำการศึกษาไว้ว่า เมื่อกลไกการเกิดชั้นเคลือบเป็นแบบ Diffusion control ความหนาที่ได้จะมีค่าเป็นสัดส่วนกับเวลา ดังสมการที่ 5.1

$$E^2 = 2k't \qquad (5.1)$$

โดยค่า k' คือ ค่า Tammann's constant และเมื่อเปรียบเทียบสมการของ Wagner กับ สมการของกราฟที่ได้จากการเคลือบผิวโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ด้วยอุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส จะได้ว่า ความชันของกราฟมีค่า 2k' ดังนั้นค่า Tammann's constant ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส จะมีค่าเท่ากับ 1071.05, 4328.5 และ 24527 ตามลำดับ

จากผลการตรวจความหนาชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 เมื่อทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการเคลือบเพิ่มมากขึ้น ความหนาชั้นเคลือบจะเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการแพร่เป็นปรากฏการณ์ที่อาศัยเวลาดังนั้นเมื่อใช้เวลาในการเคลือบผิวนานขึ้นทำให้มีเวลาสำหรับอะลูมิเนียมที่จะแพร่เข้าสู่ชิ้นงาน ดังนั้นเมื่อ

เวลานานขึ้นความหนาของชั้นเคลือบจึงสูงขึ้น ดังผลการทดลองที่พบว่าความหนาชั้นเคลือบแปรผันตามเวลาในการเคลือบผิว



รูปที่ 4.24 กราฟแท่งแสดงความหนาชั้นเคลือบต่ออุณหภูมิในการทำการเคลือบผิว ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738

จากนั้นเมื่อพิจารณาค่า Tammann's constant ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 พบว่า ที่เวลาในการเคลือบผิวเท่ากัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเคลือบผิวจะส่งผลให้ค่า Tammann's constant เพิ่มขึ้น โดยมีสาเหตุเนื่องจาก ที่เวลาในการเคลือบผิวเท่ากัน หากทำการเพิ่มอุณหภูมิในการเคลือบผิวความหนาชั้นเคลือบจะมีค่ามากขึ้น ดังรูปที่ 4.24 นั่นคือ อัตราการโตของชั้นเคลือบ (Growth rate) เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อัตราการโตของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมินั้นเป็นผลมาจากค่า Diffusion coefficient ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ โดยความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับค่า Diffusion coefficient สามารถแสดงได้จากสมการที่ 5.2 คือ

$$D = D_0^{\exp(-Q/RT)} \qquad (5.2)$$

จากสมการค่า D_0 และ Q จะเป็นค่าคงที่และจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อส่วนประกอบทางเคมี (Composition) เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจากสมการที่ 5.2 ข้างต้นจะอธิบายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิในการเคลือบผิวสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่า Diffusion coefficient เพิ่มขึ้น ดังนั้นอัตราการโตของชั้นเคลือบจึงเพิ่มขึ้น และจากการที่อัตราการโตของชั้นเคลือบเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่า Tammann's constant เพิ่มมากขึ้น นอกจากสาเหตุข้างแล้ว กลการเกิดชั้นเคลือบด้วยวิธี Aluminizing ก็มีผลต่อความหนาและลักษณะชั้นเคลือบ จากข้อมูลที่ได้ทำการศึกษาพบว่า การทำ Aluminizing จะเกิดกลไก ได้ 2 แบบ คือ Inward diffusion และ Outward diffusion ซึ่งกลไกการเกิด inward diffusion จะเกิดเมื่อใช้

อุณหภูมิในการทำการเคลือบผิวในช่วง 700-950 องศาเซลเซียส อะลูมิเนียมจะมีการแพร่เข้าสู่ผิวชิ้นงาน จะทำให้เกิดโครงสร้าง Ni_2Al_3 และจะพบว่าเนื่องจากอะลูมิเนียมแพร่เข้าสู่ชิ้นงาน จึงทำให้ชิ้นงานไม่มีการเปลี่ยนขนาด ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบลักษณะชิ้นงานในหัวข้อ 4.1.1 ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดชิ้นงาน

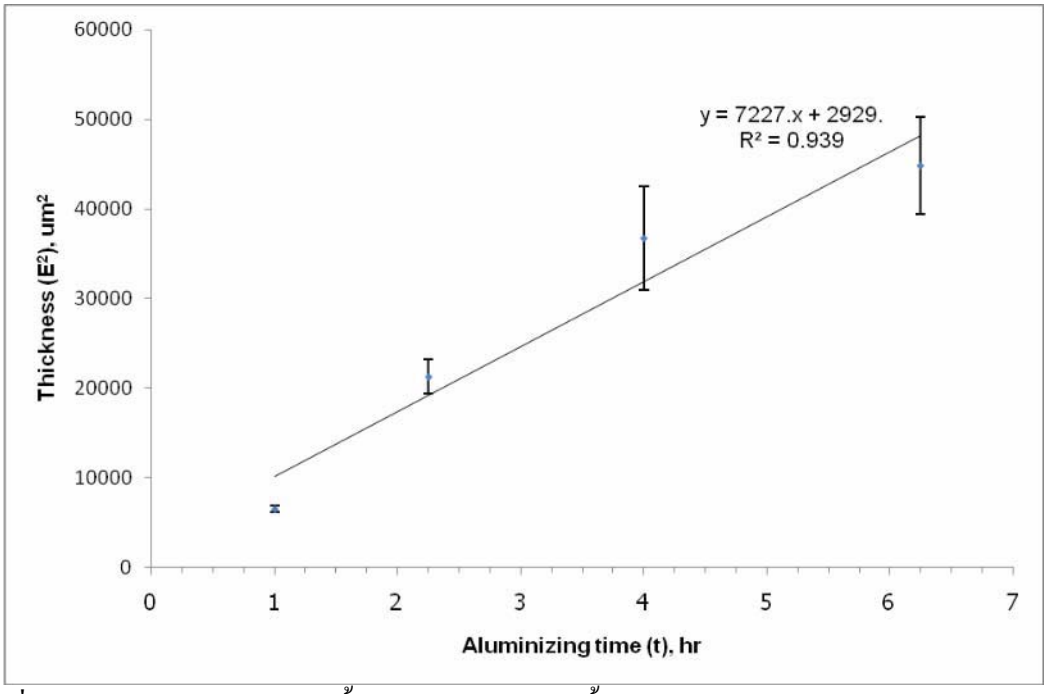
ขณะที่กลไกการเกิด outward diffusion จะเกิดเมื่อใช้อุณหภูมิในการเคลือบผิวประมาณ 1000-1100 องศาเซลเซียส ซึ่งนิกเกิลจะมีการแพร่ออกจากเนื้อพื้นสู่ผิวชิ้นงาน ทำให้ชั้นเคลือบเกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานเดิม ส่งผลให้ชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงขนาด นอกจากนี้ ชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีอัตราการโตสูงทำให้ความหนามาก โครงสร้างชั้นเคลือบนั้นเป็นเฟสที่มีคุณสมบัติที่เปราะ แตกและหลุดร่อนได้ง่าย จึงทำให้เมื่อทำการวัดความหนาชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส จะได้ค่าความหนาที่ค่อนข้างแตกต่างกัน ทำให้ค่าเบี่ยงเบนของความหนาของชิ้นงานมีค่าสูง ดังแสดงในกราฟแผนภูมิแท่ง รูปที่ 4.24

4.4.2 ความหนาชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 เมื่อเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง แล้วนำมาทำการตัดขวางและตรวจสอบความหนาชั้นเคลือบ ได้ว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 เพิ่มขึ้น ความหนาของชั้นเคลือบก็จะเพิ่มขึ้น โดยค่าความหนาเฉลี่ยของชิ้นงานมีค่าเป็น 80.56, 145.68, 191.20 และ 211.42 μm ตามลำดับ (ตารางที่ 4.4) จากนั้นนำความหนาเฉลี่ยที่ได้ มาเขียนกราฟระหว่างความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบยกกำลังสองต่อเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว จะได้ว่ากราฟที่ได้มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงเช่นเดียวกับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ดังรูปที่ 4.25 โดยมีค่าความชันของกราฟเท่ากับ 7227

ตารางที่ 4.4 แสดงความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิไนซิงบน GTD 111 ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง

เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ (μm)	SD
1.00	80.56	2.34
2.25	145.68	6.41
4.00	191.20	14.95
6.25	211.42	12.80



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความหนาชั้นเคลือบต่อเวลาของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิไนซิงบน GTD 111 ที่อุณหภูมิ 900°C

จากผลการตรวจสอบกราฟระหว่างค่าความหนาชั้นเคลือบยกกำลังสองต่อเวลาในการเคลือบผิวของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ข้างต้นพบว่า ค่าความหนาเฉลี่ยยกกำลังสองจะมีค่าแปรผันตามอุณหภูมิ (E^2 α t) ดังนั้นกลไกการเกิดชั้นเคลือบในกระบวนการ Pack-Aluminizing จึงเป็นแบบ Diffusion Control โดยมีอะลูมิเนียมแพร่ในนิกเกิลเช่นเดียวกับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 และจากสมการของ Wagner (สมการที่ 5.1) เมื่อเปรียบเทียบกับสมการของกราฟที่ได้จากการเคลือบผิวโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 ด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จะได้ว่า ค่าความชันของกราฟ มีค่า 2k'

ดังนั้นค่า Tammann's constant ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จะมีค่าเท่ากับ 3613.5 และจากผลการตรวจความหนาชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 เมื่อทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่า เนื่องจากอัตราการแพร่ (Diffusion rate) จะแปรผันตามเวลาในการเคลือบผิว ดังนั้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวเพิ่มมากขึ้น ความหนาชั้นเคลือบจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาชั้นเคลือบระหว่าง โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลาเท่ากัน พบว่า โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 จะมีความหนาชั้นเคลือบที่น้อยกว่าโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ซึ่งอธิบายได้จากสมการที่ 5.2 โดยพบว่าค่า D_0 และ Q จะมีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อ Composition มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 นั้น

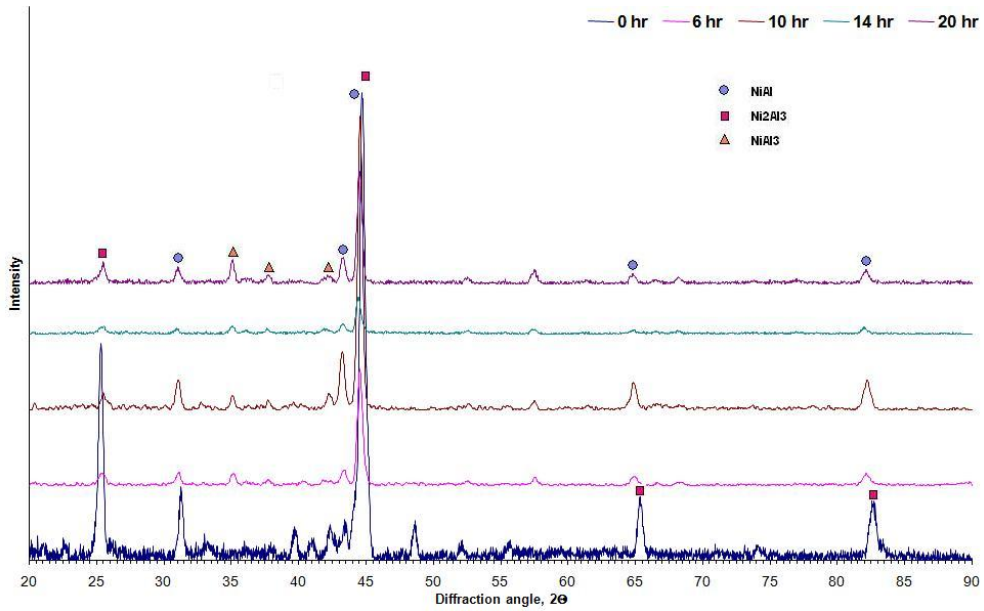
มีส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างกัน จึงทำให้ค่า D_0 และ Q มีค่าแตกต่างกัน ส่งผลให้ค่า Diffusion coefficient ของโลหะทั้งสองชนิดมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นค่า Tammann's constant หรือ อัตราการโตของชั้นเคลือบที่ได้จากโลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111จึงมีค่าแตกต่างกัน ดังจะเห็นได้จากผลการวัดความหนาของชั้นเคลือบ

4.5 ผลการตรวจสอบเชิงคุณภาพของชั้นเคลือบภายหลังการทำอบเป็นเนื้อเดียว

4.5.1 ผลการตรวจสอบโดย XRD

4.5.1.1 ผลการตรวจสอบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738

รูปที่ 4.26 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ผ่านการทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อนำมาทำการอบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสัมพัทธ์ (relative intensity) ของเฟส Ni_2Al_3 และ $NiAl_3$ ซึ่งพีคของเฟส Ni_2Al_3 บางพีคจะมีค่าความเข้มสัมพัทธ์ลดลง ส่วนพีคของเฟส $NiAl_3$ ก็จะหายไป โดยมีพีคใหม่เกิดขึ้นคือ พีคของเฟส NiAl (JCPDS No. 02-1261)ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่า พีคที่มีความเข้มสัมพัทธ์สูงสุดจะเป็นพีคของเฟส NiAl



รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบหลังทำการอบเป็นเนื้อเดียวที่ 1000 ^{O}C ที่เวลา 0, 6, 10, 14 และ 20 ชั่วโมง ของชิ้นงานที่ทำอะลูมิไนซิงบน IN 738 ที่ 900°C เวลา 4 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD

จากผลการตรวจสอบข้างต้นทำให้ทราบว่า ภายหลังจากการทำการอบเป็นเนื้อเดียว โครงสร้างหลักของชั้นเคลือบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากเฟส Ni_2Al_3 ไปเป็นเฟส NiAl เนื่องจากการทำอบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานจะทำให้ปริมาณอะลูมิเนียมใน

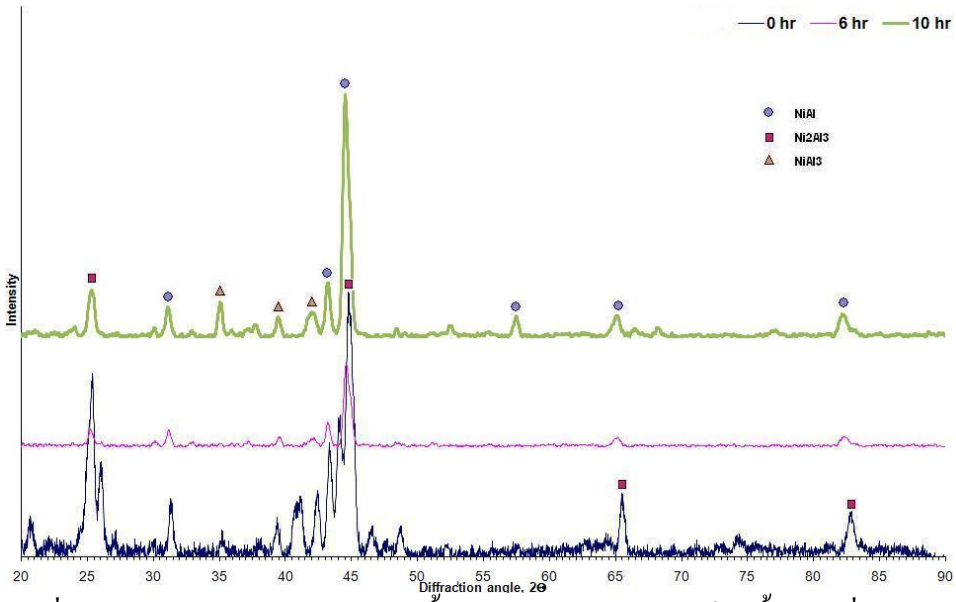
ชั้นเคลือบซึ่งมีมาก สามารถเกิดการแพร่เข้าสู่พื้นผิว (Substrate) ชิ้นงาน (มีปริมาณอะลูมิเนียมน้อยกว่า) ทำให้ปริมาณอะลูมิเนียมในชั้นเคลือบลดลง เมื่อปริมาณของอะลูมิเนียมลดลง ก็จะทำให้โครงสร้างเปลี่ยนแปลงจากเฟส Ni_2Al_3 เป็นเฟส NiAl ดังแผนภูมิสมดุลของนิกเกิลและอะลูมิเนียม รูปที่ 4.8

จากนั้นทำการตรวจสอบชิ้นงานที่ทำการอบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง พบว่า พีคที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน คือ มีพีคของเฟส $NiAl_3$ และ NiAl เกิดขึ้น โดยพีคที่มีค่าความเข้มสัมพัทธ์สูงสุดคือพีคของเฟส NiAl ดังนั้นชั้นเคลือบจึงมีโครงสร้างหลักเป็นเฟส NiAlเมื่อพิจารณาความเข้มสัมพัทธ์ของพีค Ni_2Al_3 ที่ได้พบว่าจะมีค่าน้อยลง เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ทำการอบเป็นเนื้อเดียวเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งหมายความว่า เมื่อทำการอบเป็นเนื้อเดียวชิ้นงานเป็นเวลา 6 ชั่วโมงจะยังคงมีปริมาณของ Ni_2Al_3 เหลืออยู่ ดังนั้นเมื่อเพิ่มเวลาในการอบเป็นเนื้อเดียวเป็น 10 ชั่วโมง ปริมาณเฟส Ni_2Al_3 จึงลดลงไปอีก

และทำการตรวจสอบชิ้นงานที่ทำการอบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 และ 20 ชั่วโมง พบว่าพีคที่ได้ประกอบไปด้วยพีคของเฟส $NiAl_3$ และ NiAl โดยพีคที่มีค่าความเข้มสัมพัทธ์สูงสุดคือพีคของเฟส NiAl ดังนั้นชั้นเคลือบจึงมีโครงสร้างหลักเป็นเฟส NiAl แต่เมื่อพิจารณาค่าความเข้มสัมพัทธ์ของพีค Ni_2Al_3 จะเห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ทำการอบเป็นเนื้อเดียวที่เวลา 10 ชั่วโมง นั่นแสดงว่า การทำการอบเป็นเนื้อเดียวชิ้นงานเป็นเวลา 14 และ 20 ชั่วโมง ทำให้ชั้นเคลือบที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไม่แตกต่างกับการอบเป็นเนื้อเดียวชิ้นงานเป็นเวลา 10 ชั่วโมง

4.5.1.2 ผลการตรวจสอบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.27 โลหะผสมเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อนำมาทำการอบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่า มีลักษณะกราฟคล้ายกับของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิดIN 738 โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสัมพัทธ์ (relative intensity) ของเฟส Ni_2Al_3 และ$NiAl_3$ ซึ่งพีคของเฟส Ni_2Al_3 บางพีคจะมีค่าความเข้มสัมพัทธ์ลดลง และบางพีคก็จะหายไป ส่วนพีคของเฟส $NiAl_3$ ก็จะหายไปเช่นกัน โดยมีพีคใหม่เกิดขึ้นคือ พีคของเฟส NiAl ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่าพีคที่มีความเข้มสัมพัทธ์สูงสุดจะเป็นพีคของเฟส NiAl จากผลการตรวจสอบข้างต้นทำให้ทราบว่า ภายหลังจากการทำการอบเป็นเนื้อเดียวโครงสร้างหลักของชั้นเคลือบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากเฟส Ni_2Al_3 ไปเป็นเฟส NiAl เช่นเดียวกันกับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738



รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบหลังทำการอบเป็นเนื้อเดียวที่ 1000 ^{O}C ที่เวลา 0, 6 และ 10 ชั่วโมง ของชิ้นงานที่ทำอะลูมิไนซิงบน GTD 111ที่ 900°C เวลา 4 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD

จากนั้นได้ทำการอบเป็นเนื้อเดียวชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เนื่องจากต้องการนำไปทำการศึกษาเปรียบเทียบผลด้านความต้านทานการเกิดออกซิเดชันพบว่า มีลักษณะกราฟคล้ายกับกราฟของชิ้นงานที่ทำการอบเป็นเนื้อเดียวเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสัมพัทธ์ (relative intensity) ของเฟส Ni_2Al_3 และ $NiAl_3$ ซึ่งพีคของเฟส Ni_2Al_3 บางพีคจะมีค่าความเข้มสัมพัทธ์ลดลง และบางพีคก็จะหายไปเช่นเดียวกัน ส่วนพีคของเฟส $NiAl_3$ ก็จะหายไปเช่นกัน โดยมีพีคใหม่เกิดขึ้นคือ พีคของเฟส NiAl ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่า พีคที่มีความเข้มสัมพัทธ์สูงสุดจะเป็นพีคของเฟส NiAl

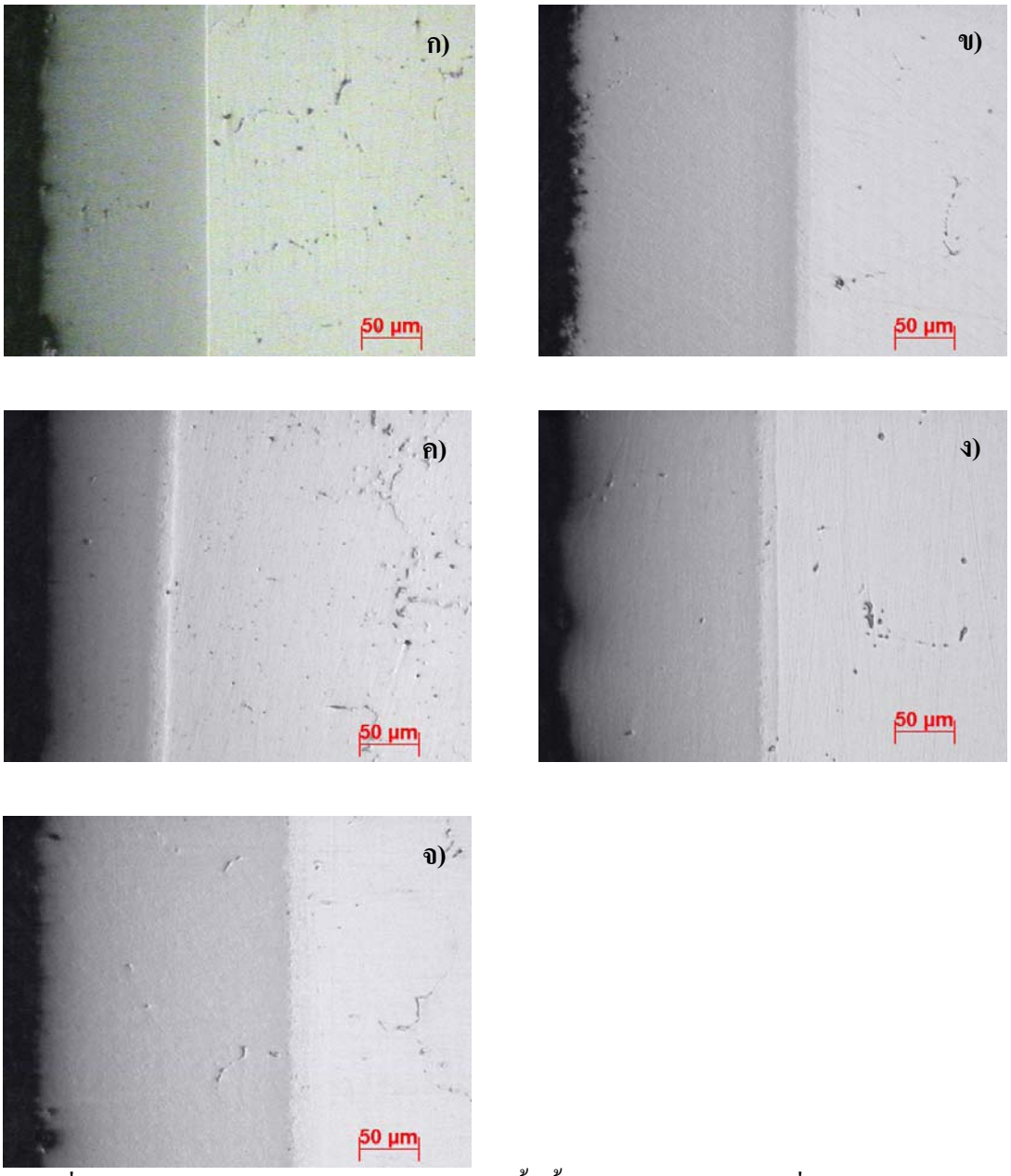
เมื่อพิจารณาความเข้มสัมพัทธ์ของพีค Ni_2Al_3 ที่ได้พบว่าจะมีค่าน้อยลง เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ทำการอบเป็นเนื้อเดียวเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งหมายความว่า เมื่อทำการอบเป็นเนื้อเดียวชิ้นงานเป็นเวลา 6 ชั่วโมงจะยังคงมีปริมาณของ Ni_2Al_3 เหลืออยู่ ดังนั้นเมื่อเพิ่มเวลาในการอบเป็นเนื้อเดียวเป็น 10 ชั่วโมง ปริมาณเฟส Ni_2Al_3 จึงลดลงไปอีกภายหลังจากการทำการอบเป็นเนื้อเดียว โครงสร้างหลักของชั้นเคลือบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากเฟส Ni_2Al_3 ไปเป็นเฟส NiAl

4.5.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของชั้นเคลือบหลังทำการอบเป็นเนื้อเดียว

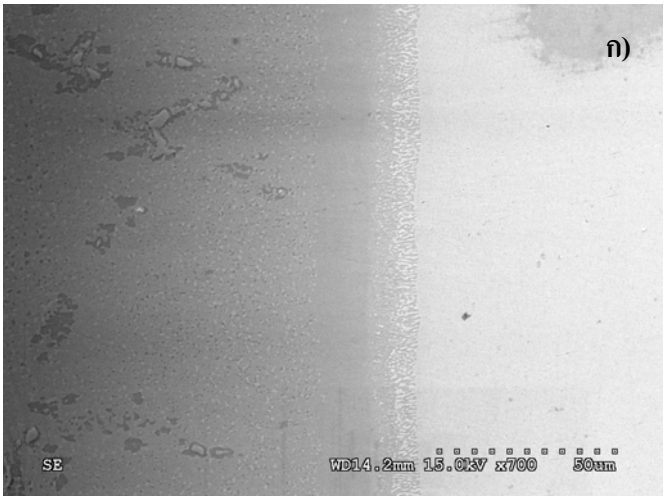
4.5.2.1 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738

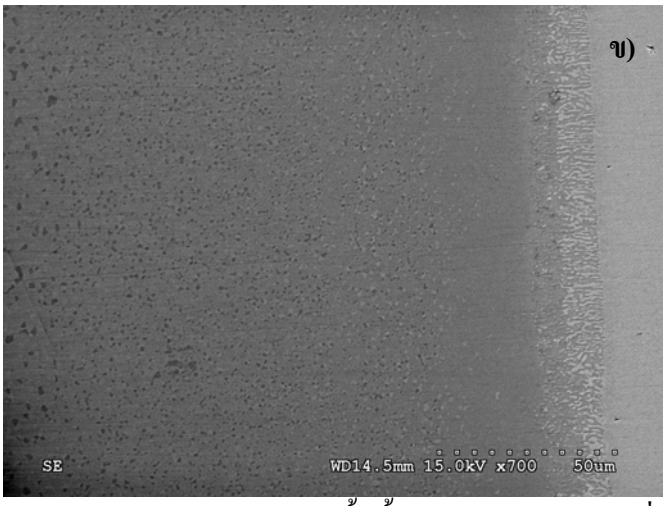
จากรูปที่ 4.28 เมื่อพิจารณาโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง แล้วนำไปทำการอบเป็นเนื้อเดียว โดยนำมา

ตัดขวาง แล้วทำการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยกล้อง Optical Microscope จะเห็นว่าชิ้นงานที่ทำการอบเป็นเนื้อเดียว จะมีลักษณะชั้นเคลือบเป็นชั้นเดียวกัน โดยมีลักษณะคือ จะมีสีเทาเข้มและสีเทาอ่อนขนาดเล็กสลับกัน และกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ เมื่อทำการตรวจสอบด้วยกล้อง SEM จะพบว่าชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นรูพรุน โดยมีสีเทาเข้มและสีเทาอ่อนขนาดเล็กสลับกัน ดังรูป 4.29 ซึ่งจากผล XRD ได้ตรวจพบพีคของเฟส NiAl ซึ่งเป็นเฟสหลัก ดังนั้น โครงสร้างชั้นเคลือบที่ได้ภายหลังจากการอบเป็นเนื้อเดียวจะเป็นเฟส NiAl โดยมีเฟส $NiAl_3$ ผสมอยู่บ้างเล็กน้อย



รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายโครงสร้างโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่เคลือบผิว 900 ^{O}C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วทำการอบเป็นเนื้อเดียวเป็นเวลา ก.) 0 ข.) 6 ค.) 10 ง.) 14 และ จ.) 20 ชั่วโมง



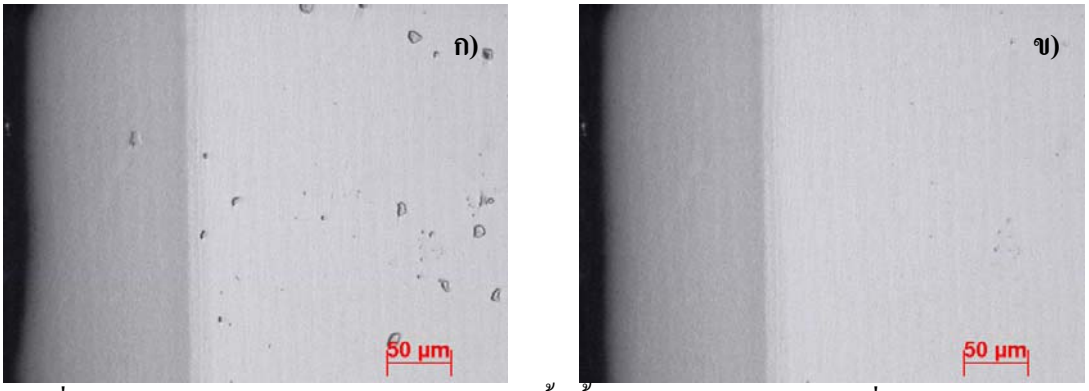


รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายโครงสร้างโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่เคลือบผิว 900 ^{O}C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วทำการอบเป็นเนื้อเดียวเป็นเวลา ก.) 10 และ ข.) 20 ชั่วโมง ด้วยกล้อง SEM

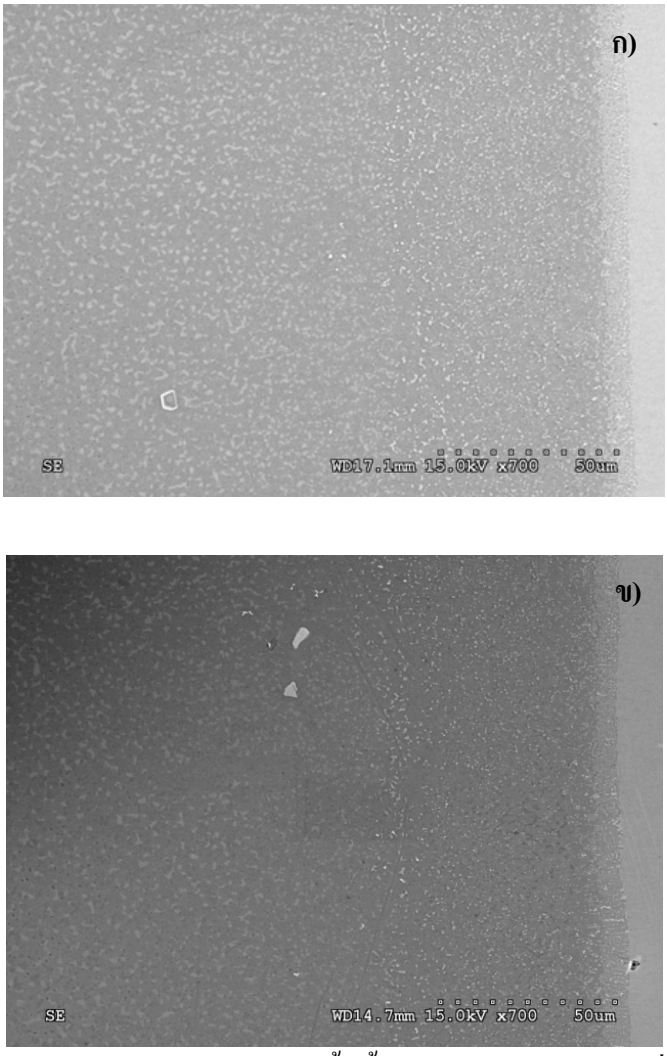
4.5.2.2 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111

จากรูปที่ 4.30 เมื่อพิจารณาโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง แล้วนำไปทำการอบเป็นเนื้อเดียว โดยนำมาตัดขวาง แล้วทำการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยกล้อง Optical Microscope จะเห็นว่าชิ้นงานที่ทำการอบเป็นเนื้อเดียวจะมีลักษณะชั้นเคลือบเป็นชั้นเดียวกัน โดยมีลักษณะคือ จะมีสีเทาเข้มและสีเทาอ่อนขนาดเล็กสลับกันและกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ เมื่อทำการตรวจสอบด้วยกล้อง SEM จะพบว่า

ดังรูป 4.31 ซึ่งจากผล XRD ได้ตรวจพบพีคของเฟส NiAl ซึ่งเป็นเฟสหลัก ดังนั้น โครงสร้างชั้นเคลือบที่ได้ภายหลังจากการอบเป็นเนื้อเดียวจะเป็นเฟส NiAl โดยมีเฟส $NiAl_3$ ผสมอยู่บ้างเล็กน้อย



รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายโครงสร้างโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่เคลือบผิว 900 ^{O}C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วทำการอบเป็นเนื้อเดียวเป็นเวลา ก.) 6 และ ข.) 10 ชั่วโมง



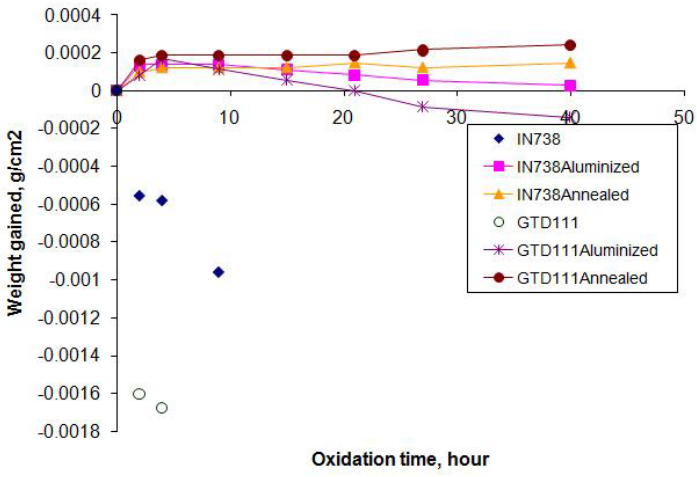
รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายโครงสร้างโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่เคลือบผิว 900 $^{\circ}$C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วทำการอบเป็นเนื้อเดียวเป็นเวลา ก.) 6 และ ข.) 10 ชั่วโมง ด้วยกล้อง SEM

บทที่ 6 ผลการตรวจสอบความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน

6.1 ผลการตรวจสอบน้ำหนักหลังทดสอบออกซิเดชัน

6.1.1 ผลการตรวจสอบน้ำหนักของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738

พิจารณารูปที่ 6.1 ผลการตรวจสอบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวด้วยกระบวนการ Pack-Aluminizing จะมีน้ำหนักลดลง ในขณะที่ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวและชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวและอบอ่อนจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น สำหรับชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวโลหะพื้นนิกเกิลจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศได้ดีที่อุณหภูมิสูงและสามารถเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ที่ผิว ออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้มีความหนาแน่นต่ำและพรุน ทำให้ออกซิเจนสามารถแพร่ผ่านชั้นออกไซด์และทำปฏิกิริยาทำให้ชั้นออกไซด์เกิดขึ้นต่อไปและมีความหนาที่เพิ่มขึ้น เมื่อชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นหนามากก็จะเกิดการหลุดร่อนออกจากผิวชิ้นงานได้ ทำให้น้ำหนักของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวมีน้ำหนักลดลง เนื่องจากเกิดการหลุดร่อน ของฟิล์มออกไซด์บางส่วน แต่สำหรับชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวและชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียวจะมีชั้นเคลือบนิกเกิลอะลูมิไนด์ (NiAl) เคลือบผิว ซึ่งที่อุณหภูมิสูงและบรรยากาศออกซิเจนในอากาศจะเกิดปฏิกิริยากับชั้นเคลือบ ทำให้เกิดสารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์ซึ่งเป็นฟิล์มที่มีความหนาแน่นสูงไม่มีรูพรุน ทำให้ออกซิเจนสามารถแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม อะลูมิเนียมออกไซด์นี้ได้ยากทำให้ช่วยยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน และเนื่องจากฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วจึงส่งผลให้น้ำหนักชิ้นงานทั้งสองเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6.1 แสดงการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000°C ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111

จากนั้นพิจารณาเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลที่ผ่านการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว และโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลที่ผ่านการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียว เมื่อทำการทดสอบเป็นเวลา 4 และ 9 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวโดยไม่ทำการอบเป็นเนื้อเดียวจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นมากกว่าชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียว เนื่องจากชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวโดยไม่ได้ทำการอบเป็นเนื้อเดียวมีการเกิดฟิล์มออกไซด์มากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียว ดังนั้นน้ำหนักจึงเพิ่มมากกว่า และเมื่อพิจารณาความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน เมื่อทำการทดสอบเป็นเวลา 15 ชั่วโมง พบว่า ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวจะมีน้ำหนักของชิ้นงานลดลง ในขณะที่ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวและผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวจะยังคงมีน้ำหนักคงเดิม นั่นหมายความว่า ออกไซด์บนชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวเริ่มมีการหลุดร่อน ขณะที่ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวและผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวยังไม่มีการหลุดร่อนของฟิล์มออกไซด์ นั่นแสดงว่า ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียวจะต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ดีกว่าชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวและชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวตามลำดับ

6.1.2 ผลการตรวจสอบน้ำหนักของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111

จากรูปที่ 6.1 ผลการตรวจสอบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่ไม่ได้เคลือบผิวจะมีน้ำหนักลดลง ในขณะที่ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวและชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียว จะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ซึ่งมีสาเหตุจากโลหะบนผิวชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศได้ดี เกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ที่ผิว ซึ่งออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเกิดการหลุดร่อนออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย ทำให้น้ำหนักของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวมีน้ำหนักลดลง ขณะที่ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวและชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียวจะมีชั้นเคลือบช่วยป้องกัน ซึ่งชั้นเคลือบจะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนจะเกิดเป็นฟิล์มออกไซด์ที่หลุดร่อนได้ยากกว่า ส่งผลให้น้ำหนักชิ้นงานทั้งสองเพิ่มขึ้น

จากนั้นพิจารณาเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลที่ผ่านการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว และโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลที่ผ่านการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียว เมื่อทำการทดสอบเป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวโดยไม่ทำการอบเป็นเนื้อเดียวจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นมากกว่าชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียว เนื่องจากชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวโดย

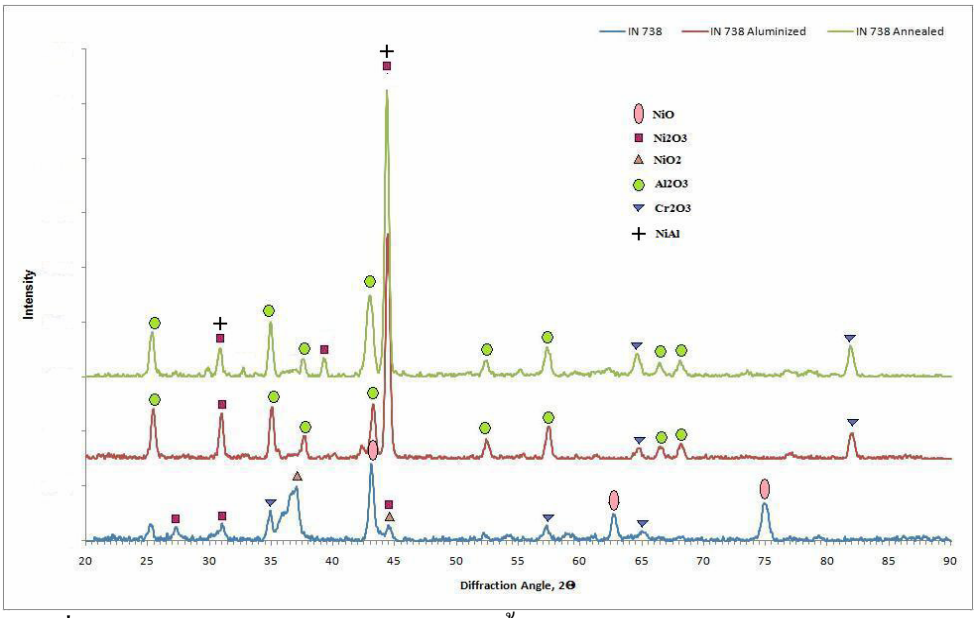
ไม่ได้ทำการอบเป็นเนื้อเดียวมีการเกิดฟิล์มออกไซด์มากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียว น้ำหนักชิ้นงานจึงเพิ่มมากกว่า นั่นหมายความว่า ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียวจะสามารถป้องกันการเกิดออกไซด์ฟิล์มได้ดีกว่าชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวแต่ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว

และเมื่อพิจารณาความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน เมื่อทำการทดสอบเป็นเวลา 9 และ 15 ชั่วโมง พบว่า ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวจะมีน้ำหนักของชิ้นงานลดลง ในขณะที่ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวและผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวจะยังคงมีน้ำหนักคงเดิม นั่นหมายความว่าออกไซด์บนชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวเริ่มมีการหลุดร่อน ขณะที่ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวและผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวยังไม่มีการหลุดร่อนของฟิล์มออกไซด์ นั่นแสดงว่า ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียวจะต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ดีกว่าชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวและชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวตามลำดับ

6.2 ผลการตรวจสอบเชิงคุณภาพหลังการทดสอบออกซิเดชัน

6.2.1 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบภายหลังการทำการทดสอบออกซิเดชันของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738

รูปที่ 6.2 เมื่อทำการตรวจสอบชั้นเคลือบโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวภายหลังทำการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง พบว่า โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวจะมีกราฟซึ่งประกอบไปด้วยพีคของเฟส Ni_2O_3, NiO_2 , NiO และ Cr_2O_3 (JCPDS No. 14-0481, 85-1977, 04-0835, และ 38-1479)โดยพีคที่มีค่าความเข้มสัมพัทธ์สูงที่สุด คือ พีคของเฟส NiO ดังนั้นเมื่อนำโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวมาทดสอบออกซิเดชันจะเกิดออกไซด์ของนิกเกิลเป็นส่วนใหญ่ โดยมีเฟส NiO เป็นเฟสหลัก และเมื่อทำการตรวจสอบชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ได้อบเป็นเนื้อเดียวและชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียว พบว่า กราฟที่ได้จะประกอบไปด้วยพีคของเฟส NiAl, Ni_2O_3, Al_2O_3 (JCPDS No. 46-1212) และ Cr_2O_3 โดยพีคที่มีค่าความเข้มสัมพัทธ์สูงที่สุดคือ พีคของเฟส NiAl



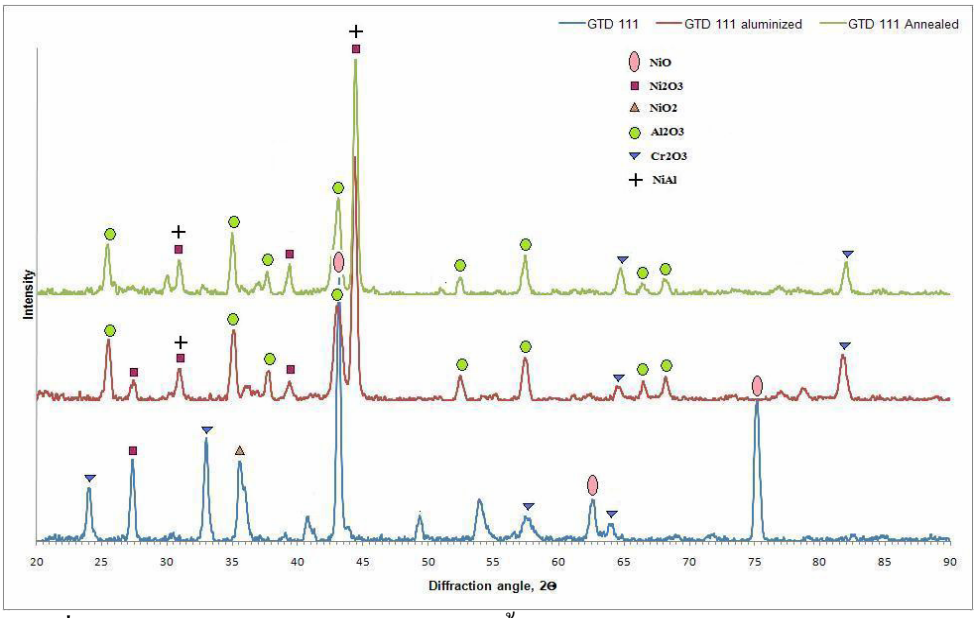
รูปที่ 6.2 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบหลังทำการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ด้วยวิธี GIXD

จากผลการตรวจสอบชั้นเคลือบพบว่า โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 เมื่อนำไปทำการทดสอบออกซิเดชันจะพบว่าเกิดออกไซด์ของนิกเกิลเป็นส่วนใหญ่ แต่เมื่อทำการเคลือบผิวพบว่า ชั้นเคลือบที่ได้จะช่วยลดการเกิดออกไซด์ของนิกเกิลได้ โดยจะเกิดเป็นออกไซด์ของอะลูมิเนียมขึ้นแทน ชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์นี้ทำตัวเป็นชั้นขัดขวางการแพร่ของออกซิเจน ทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันถูกหน่วงหรือขัดขวาง ทำให้ชั้นฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้จึงเป็นเพียงชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่บางมาก และเมื่อตรวจสอบด้วย GIXD ที่มุมตกกระทบ 5 องศา รังสีเอกซ์สามารถทะลุผ่านชั้นฟิล์มออกไซด์ ทำให้ยังคงพบพีคของเฟส NiAl เป็นพีคหลักร่วมกับพีคของเฟสอะลูมิเนียมออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 6.2

6.2.2 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบภายหลังการทำการทดสอบออกซิเดชันของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111

รูปที่ 6.3 เมื่อทำการตรวจสอบชั้นเคลือบโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวภายหลังทำการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง พบว่า ชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวจะมีกราฟซึ่งประกอบไปด้วยพีคของเฟส Ni_2O_3, NiO_2 , NiO และ Cr_2O_3 โดยพีคที่มีค่าความเข้มสัมพัทธ์สูงที่สุด คือพีคของเฟส NiO ดังนั้นเมื่อนำโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวมาทดสอบออกซิเดชันพบว่าจะเกิดออกไซด์ของนิกเกิลเป็นส่วนใหญ่ โดยมีเฟส NiO เป็นเฟสหลัก และเมื่อทำการตรวจสอบชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ได้อบเป็นเนื้อเดียวและชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิว

และอบเป็นเนื้อเดียว พบว่า กราฟที่ได้จะประกอบไปด้วยพีคของเฟส NiAl, Ni_2O_3, Al_2O_3 และ Cr_2O_3 โดยพีคที่มีค่าความเข้มสัมพัทธ์สูงที่สุดคือ พีคของเฟส NiAl



รูปที่ 6.3 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบหลังทำการทดสอบออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 ด้วยวิธี GIXD

ดังนั้น โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 เมื่อนำไปทำการทดสอบออกซิเดชันจะพบว่าเกิดออกไซด์ของนิกเกิลเป็นส่วนใหญ่ แต่เมื่อทำการเคลือบผิว พบว่าชั้นเคลือบที่ได้จะช่วยลดการเกิดออกไซด์ของนิกเกิลได้ โดยจะเกิดเป็นออกไซด์ของอะลูมิเนียมขึ้น เช่นเดียวกับที่พบในชิ้นงาน IN 738 ดังนั้นโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่เคลือบและผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวจึงสามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ โดยการเกิดฟิล์มของอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นชั้นป้องกันการเกิดออกซิเดชัน โดยทำหน้าที่ขัดขวางการแพร่ของออกซิเจนและหน่วงการเกิดออกซิเดชัน

บทที่ 7 สรุปผลการทดลอง

7.1 ในการเคลือบผิวโลหะผสมพิเศษนิกเกิล IN738 และ GTD111 ด้วยวิธี pack aluminizing และ powder liquid coating สร้างชั้นเคลือบนิกเกิลอะลูมิไนด์ที่มีความหนาในระดับ 50 ถึง 500 ไมโครเมตร โดยมีเฟส Ni_2Al_3 เป็นหลักและมีเฟส $NiAl_3$ และ $AlCr_2$ตกผลึกร่วม

7.2 การเกิดชั้นเคลือบในกระบวนการ pack aluminizing มีกลไกการแพร่เป็นกลไกสำคัญในการควบคุมการโตของชั้นเคลือบโดยการเกิดชั้นเคลือบเมื่อใช้อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส จะมีการแพร่ของอะลูมิเนียมเข้าสู่วัสดุพื้น สำหรับอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสมีการแพร่ของนิกเกิลออกสู่ผิวชิ้นงานร่วมด้วย อุณหภูมิส่งผลถึงอัตราการโตของชั้นเคลือบโดยจะมีค่าเพิ่มขึ้น 1071.05, 4328.5 และ 24527 $\mu m^2/h$ ในโลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN738 เมื่อใช้อุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียสตามลำดับ สำหรับโลหะผสม GTD111 มีอัตราการโตของชั้นเคลือบต่ำกว่า IN738 คือ 3613.5 $\mu m^2/h$ มื่อใช้อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

7.3 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบด้วยกระบวนการ pack aluminizing ในงานวิจัยนี้ คือ การเคลือบที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง และใช้อัตราการส่วนผสมของอะลูมิเนียมต่ออะลูมินาและแอมโมเนียมคลอไรด์เป็น 5 ต่อ 80 ต่อ 15 โดยน้ำหนัก

7.4 การเคลือบผิวด้วยวิธี powder liquid coating ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสมีกลไกการเกิดชั้นเคลือบเกิดจากการแพร่ของนิกเกิลออกสู่ผิวชิ้นงานโดยละลายเข้าสู่อะลูมิเนียมหลอมเหลว และเกิดการตกผลึกเป็นชั้นเคลือบที่รอยต่อของโลหะพื้นกับอะลูมิเนียมเหลวจากนั้นนิกเกิลจะแพร่ผ่านชั้นเคลือบเข้าสู่อะลูมิเนียมเหลวและเกิดชั้นเคลือบ โดยการเปียกของอะลูมิเนียมบนนิกเกิลเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมลักษณะของชั้นเคลือบ การเกิดชั้นเคลือบที่สม่ำเสมอไปสามารถเกิดขึ้นได้โดยการเลือกใช้ผงอะลูมิเนียมขนาดเล็กและเลือกอัตราส่วนในการผสมกับผงอะลูมินาเพื่อให้เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ชั้นเคลือบที่ได้จากการเคลือบด้วยวิธี powder liquid coating ประกอบด้วยเฟส Ni_2Al_3 เป็นหลัก โดยมีเฟส $NiAl_3$ และ $AlCr_2$ ตกผลึก เช่นเดียวกับชั้นเคลือบที่ได้จากวิธี pack aluminizing ทั้งในโลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN738 และ GTD111

7.5 สภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบ คือ อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 2.25 ชั่วโมง และใช้ผงอะลูมิเนียมขนาด 3 ไมโครเมตรโดยมีอัตราส่วนของผงอะลูมิเนียมต่ออะลูมินา 7 ต่อ 3 โดยน้ำหนัก

7.6 เมื่อชิ้นงานผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส จะเกิดการแพร่ของอะลูมิเนียมจากชั้นเคลือบเข้าสู่เนื้อพื้นโลหะผสมนิกเกิลทำให้สารประกอบ Ni_2Al_3 แตกตัวเป็นสารประกอบ NiAl ในการทดลองนี้พบว่า เวลาที่ใช้ในการอบเป็นเนื้อเดียวที่เหมาะสมคือ 10 ชั่วโมง

7.7 ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวและการเคลือบผิวตามด้วยการอบเป็นเนื้อเดียวจะมีฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ซึ่งมีความหนาแน่นสูงและป้องกันการแพร่ของออกซิเจนได้ดีเกิดขึ้นที่ผิวช่วย

เพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชันโดยฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์นี้เกิดจากปฏิกริยาระหว่างอะลูมิเนียมในชั้นเคลือบกับออกซิเจนในบรรยากาศ สำหรับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวพบว่ามีฟิล์มนิกเกิลออกไซด์จึงไม่สามารถยับยั้งการแพร่ของออกซิเจนและไม่เพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน

รายการอ้างอิง

[1] ปัญญวัชร์ วังยาว. เอกสารประกอบ TECHNICAL TRAINING, วิศวกรรมงานโลหะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ) เอ็มเทค(, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 24 กุมภาพันธ์ 2548.

[2] C.T. SIMS. SUPERALLOYS II. New York: Wiley, 1987.

[3] ปัญญวัชร์ วังยาว. เอกสารประกอบการสอน วิชา High temperature Materials. ภาควิชาวิศวกรรมโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

[4] H. K. D. H. Bhadeshia. Nickel Based Superalloys. Available from : http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/ 2003/Superalloys/superalloys.html [2006, May 12

[5] C.T. SIMS and W.C. HAGEL. The Superalloys. New York : Wiley, 1972.

[6] S.A. Sajjadi, S. Nategh. A High Temperature deformation mechanism map for the high performance Ni-base superalloy GTD-111. Materials Science and Engineering A307. (2001) : 158-164

[7] Y. Tsuchida, S. Kirihara and Y. Tomota. Functionally Graded Coating for Steels by Reaction Diffusion. ISIJ International, vol. 40 ,No. 2. (2000) : 1029-1034

[8] T. Sourmail. Coatings for Turbine Blades. Available from : http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/ 2003/Superalloys/coatings/index.html [2006, May 12]

[9] Crystal Structures of the Al-Ni System. Crystal Lattice Structures. Naval Research Laboratory, Materials Science and Technology Division, Washington DC. Available from : http://cst-www.nrl.navy.mil/lattice/alloys/alni.html [2007,Jan 20]

[10] Z. Yu, D.D. Hass and H.N.G. Wadley. NiAl bond coats made by a directed vapor deposition approach. Materials Science and Engineering A394. (2005) : 43-52.

[11] T. Sourmail. Coatings for Turbine Blades. Available from : http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2003/Superalloys/coatings/index.html [2007,Jan 20]

[12] A.M. Hodge and D.C. Dunand. Synthesis of nickel-aluminide forms by pack-aluminization of nickel foams. Intermetallics 9. (2001) : 581-589.

[13] Xin Ren, Fuhui Wang and Xin Wang. High-temperature oxidation and hot corrosion behaviors of the NiCr-CrAl coating on a nickel-based superalloy. Surface & Coatings Technology 198. (2005) : 425-431.

[14] Koji Murakami, Norihide Nishida, Kozo Osamura and Yo Tomata. Aluminization of high purity iron by powder liquid coating. Acta Meterialia 52. (2004) : 1271-1281.

[15] C. Houngninou, S. Chevalier and J.P. Larpin. Synthersis and characterisation of pack cemented aluminide coatings on metals. Applied Surface Science 236. (2004) : 256-269.

[16] S.A. Sajjadi, S. Nategh and Roderick I. L. Guthrie. Study of microstructure and mechanical properties of high performance Ni-base superalloy GTD-111. Materials Science and Engineering A325. (2002) : 484-489

[17] B. Grushko, W. Kowalski, D. Pavlyuchkov, B. Przepi´orzy´nski and M. Surowiec. A contribution to the Al–Ni–Cr phase diagram. Journal of Alloys and Compound. (ARTICLE IN PRESS)

Output ที่ได้จากโครงงานวิจัย

ข้อมูลจากการวิจัยนี้เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนากระบวนการเคลือบผิวโลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN738 และ GTD111 โดยใช้ผงอะลูมิเนียมในการเคลือบผิวด้วยวิธี pack aluminizing และ powder liquid coating ทำให้ช่วยปรับปรุงความสามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้อย่างมีนัยสำคัญ ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ได้จริงทั้งในการเคลือบผิวและการซ่อมแซมในบางส่วนโดยอาศัยวิธีการสองวิธีข้างต้น งานวิจัยนี้ยังประสบความสำเร็จในการหาตัวแปรในการบวนการเคลือบที่เหมาะสมทั้งในวิธี pack aluminizing และ powder liquid coating อีกทั้งองค์ความรู้ที่ได้สามารถใช้ในเผยแพร่ในการเรียนการสอนนิสิตระดับปริญญาบัณฑิต และบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เนื่องจากเป็นองค์ความรู้ที่ได้เป็นองค์ความรู้ใหม่ ผู้วิจัยได้ส่งผลงานการวิจัยนี้เข้านำเสนอแบบบรรยายในที่ประชุมนานาชาติ Thailand Metallurgy Conference ซึ่งจะจัดขึ้นระหว่างวันที่ 1516 ตุลาคม 2550 ประเทศไทย และ The 17th International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering (IFHTSE) Congress ซึ่งจะจัดขึ้นระหว่างวันที่ 27-30 ตุลาคม 2551 ที่ประเทศญี่ปุ่น โดยงานวิจัยนี้ได้รับพิจารณาเข้าสู่ในรอบสุดท้าย(จำนวน 10 ผลงาน)เพื่อคัดเลือกนักวิจัยรุ่นใหม่ดีเด่นของการประชุมวิชาการนี้ด้วย นอกจากนี้ยังมีผลงานที่ตีพิมพ์แล้วและกำลังพิจารณาเพื่อตีพิมพ์ในวารสารตามเอกสารแนบ

ผลงานที่เผยแพร่

การประชุมวิชาการ

1. Effect of temperature and time on pack aluminizing of nickel base superalloy grade Inconel 738, S. Chansaksoong, P. Visuttipitukul, P. Wangyao, Thailand Metallurgy Conference 2007, Thailand

2. Feasibility study of surface modification of nickel base superalloys grade IN738 by aluminizing using powder liquid coating, N. Limvanutpong, P. Visuttipitukul, P. Wangyao, Thailand Metallurgy Conference 2007, Thailand

3. Aluminizing of Nickel-based Superalloys Grade IN 738 by Powder Liquid Coating, P.Visuttipitukul, N. Limvanutpong, P. Wangyao, the 17th International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering (IFHTSE) Congress 2008, Japan

วารสาร

1. P.Visuttipitukul, N. Limvanutpong,V. Krongthong, P. Wangyao, Microstructural Characterization of Aluminum Powder Liquid Coating on IN738 Superalloy, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, Vol. 17 No 1, 2007, 75-79, Impact factor -, อยู่ในฐานข้อมูล Cambridge Abstract.

2. Aluminization of high purity nickel by powder liquid coating, P.Visuttipitukul, N. Limvanutpong, P.Wangyao, P.Sricharoenchai, Metallic Materials, Impact factor 1.3, (submitted on 5/9/2008)

3. Aluminizing of Nickel-based Superalloys Grade IN 738 by Powder Liquid Coating, P.Visuttipitukul, N. Limvanutpong, P.Wangyao, P.Sricharoenchai, Reviews on Advance Materials, Impact factor 1.3 (in process)