

การเคลือบสีนาเมลบนเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC ที่ผ่านการลดปริมาณคาร์บอน



นายมารุต บุญประเสริฐ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4955-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PORCELAIN ENAMEL COATING ON DECARBURIZED SPCC GRADE COLD ROLLED STEEL SHEET



Mr. Marut Bunprasert

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4955-4

มารุต บุญประเสริฐ : การเคลือบอีนาเมลบนเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC ที่ผ่านการลดปริมาณคาร์บอน (PORCELAIN ENAMEL COATING ON DECARBURIZED SPCC GRADE COLD ROLLED STEEL SHEET) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย, 62 หน้า. ISBN 974-17-4955-4

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้คือศึกษาการเคลือบอีนาเมลบนเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้วด้วยกระบวนการเคลือบแบบ 2 ชั้น/เผา 2 ครั้ง เวลาในการกัดกรดแปรผันในช่วง 2 ถึง 6 นาที เวลาในการจุ่มนิกเกิลแปรผัน 0 ถึง 8 นาที อุณหภูมิการเคลือบผิวคือ 820°C เวลาการเผาคือ 3 และ 4 นาที ในการเผาทั้งสองชั้น โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อระหว่างอีนาเมลกับเหล็กและอนุภาคซีเมนไตต์ถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง วิเคราะห์ปริมาณธาตุบริเวณรอยต่อด้วยวิธี EDS และวิธี X-ray mapping ทดสอบการเกาะติดทางกลด้วยวิธีทดสอบการกระแทกตามมาตรฐาน ASTM B 916-01 และตรวจสอบการเกาะติดทางโครงสร้างจุลภาคด้วยวิธีการนักร้อง ตรวจสอบข้อบกพร่องที่ผิวด้วยตาเปล่า

ผลการทดลองพบว่าเวลาในการกัดกรดไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหยาบของผิวเหล็กในกลุ่มตัวอย่างที่ไม่จุ่มนิกเกิล ในกลุ่มตัวอย่างที่ผ่านการจุ่มนิกเกิล พบความหยาบของผิวเหล็กลดลงเมื่อเวลาในการกัดกรดเพิ่มขึ้น การจุ่มนิกเกิลปรับปรุงการเกาะติดของอีนาเมลกับผิวเหล็ก การจุ่มนิกเกิลในเวลาที่เหมาะสมทำให้ผิวเหล็กเกิดการกัดกร่อนเป็นร่องสม่ำเสมอตลอดผิวเหล็กในขั้นตอนการเผาซึ่งทำให้เกิดการเกาะติดของอีนาเมลกับเหล็กที่ดี เวลาในการจุ่มนิกเกิลที่เหมาะสมในการทดลองนี้คือ 4 นาที การเผาที่ 820°C เป็นเวลา 4 นาที มีการกัดกร่อนของผิวเหล็กดีกว่าการเผา 3 นาที เนื่องจากมีการกัดกร่อนที่ผิวเหล็กเกิดได้สมบูรณ์ การเคลือบอีนาเมลบนเหล็กแผ่น SPCC พบข้อบกพร่องที่ผิวเคลือบเนื่องจากก๊าซ

ภาควิชา...วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา...วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา.....2546..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4470715021 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: DECARBURIZED STEEL SHEET / ENAMEL / INTERFACE / ADHERENCE

MARUT BOONPRASERT : PORCELAIN ENAMEL COATING ON DECARBURIZED
SPCC GRADE COLD ROLLED STEEL SHEET. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.
PRASONK SRICHAREONCHAI, D.Eng., 62 pp. ISBN 974-17-4955-4

The objective of this thesis was to study porcelain enamel coating on decarburized SPCC cold rolled steel sheet by 2 coat/2 fire process. Pickling time was varied in the range of 2 – 6 minutes. Nickel dipping time was varied in the range of 0 to 8 minutes. The firing temperature was 820°C and firing time were 3 and 4 minutes for both coating processes. Microstructure at the interface of enamel and steel as well as cementite particles was investigated by light microscope. EDS and X-ray mapping method were used to analyze chemical composition at the interface. Mechanical adherence was determined by impact deformation test following ASTM B 916-01 standard and microstructure adherence was determined by anchor point count method. Coating surface defects were determined by visual inspection.

It was found that pickling time did not make any significant change on the roughness of interface in the specimens without nickel dipping. In the group of nickel dipping specimen, the roughness of steel interfaces decrease when pickling time increase. Nickel dipping improved the adherence of enamel and steel. Nickel dipping for suitable time gave anchor type due to corrosion along steel surfaces in the firing stage, which cause good adherence of enamel and steel. Nickel dip for 4 minutes was suitable time in this experiment. Firing time at 820°C for 4 minutes gave better corrosion of steel interface than firing for 3 minutes due to complete corrosion at the steel interface. Surface defect was found on SPCC steel sheet coating due to gas evolution.

Department...Metallurgical Engineering..... Student's signature.....

Field of study...Metallurgical Engineering... Advisor's signature.....

Academic year ...2003....

Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านได้ให้ทั้งความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนคำปรึกษาที่มีคุณค่ายิ่งในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยและการทำงานในอนาคต

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิฐธร ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว ด้านชัยวิจิตร กรรมการ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ขอขอบคุณบริษัท Thai Cold Roll Steel Co., LTD. และบริษัทอุตสาหกรรมสแตนเลสเคหภัณฑ์ ที่ได้เอื้อเฟื้อเหล็กแผ่นรีดเย็นและอีนาเมลที่ใช้ในการทดลอง ขอขอบพระคุณ คุณทินกร ผดุงวงศ์ ที่ได้ช่วยเหลือในการทดสอบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กแผ่นรีดเย็น ตลอดจนเพื่อนๆ และรุ่นพี่ปริญญาโททุกท่านมา ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยเสมอมา และคุณค่าอันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเป็นกตัญญูตราบูชาต่อบิดา มารดา ครูอาจารย์ ผู้มีพระคุณทุกท่าน ตลอดจนสถาบันการศึกษาอันเป็นที่รักยิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปริทรรศน์วรรณกรรม.....	4
3 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	13
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	13
3.2 กระบวนการเคลือบอีนาเมลแบบ 2 ชั้น.....	14
3.3 การทดสอบการเกาะติด.....	14
3.3.1 การทดสอบการเกาะติดของชั้นเคลือบด้วยการกระแทก.....	14
3.3.2 วิธีการวัดการเกาะติดด้วยวิธีนั้บร่อง.....	16
3.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	16
3.3.3 การตัด และเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	16
3.3.4 การกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยสารละลายเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	17
3.3.4.1 วิธีการวัดปริมาณซีเมนต์ไฮดรอกไซด์ในเหล็กแผ่นรีดเย็น.....	17
3.3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ชั้นเคลือบ.....	17
4 ผลการทดลอง.....	19
4.1 ความหายาบบริเวณรอยต่อของชั้นเคลือบอีนาเมลกับเหล็กแผ่น ที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้ว.....	19

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2	ความสามารถในการเกาะติดของอีนาเมลกับเหล็กด้วยวิธีทดสอบการกระแทก (Impact Test) ตามมาตรฐาน ASTM B 916-01.....	27
4.3	ปริมาณซีเมนต์ไต่ที่หนาที่ความลึกจากผิวถึง 210 ไมครอนในชิ้นงานของเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCCและเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCCที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้ว.....	35
4.4	การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีบริเวณรอยต่อของอีนาเมลกับเหล็กด้วยวิธี EDS และ X- RAY mapping.....	37
5	การอภิปราย.....	40
5.1	การเกาะติดกับเวลาในการกัดกรดและจุ่มนิกเกิลก่อนการเคลือบ.....	40
5.2	ผลของซีเมนต์ไต่ต่อการเกิดข้อบกพร่องที่ผิวเนื่องจากก๊าซในเหล็กแผ่นเคลือบอีนาเมล.....	44
5.3	ส่วนผสมทางเคมีบริเวณรอยต่อของอีนาเมลกับเหล็ก.....	49
6.	สรุปผลการทดลอง.....	50
	รายการอ้างอิง.....	51
	ภาคผนวก.....	52
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	62

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC และเหล็กแผ่นรีดเย็น เกรด SPCC ผ่านการลดคาร์บอนแล้ว (%โดยน้ำหนัก).....	13
ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบของอินามาเมลที่ใช้เคลือบชั้นแรกและชั้นที่สอง	13
ตารางที่ 4.1 จำนวนร่องของเหล็กแผ่นรีดเย็นที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้ว ที่สภาวะก่อน การเคลือบต่างกัน เมาเคลือบที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที.....	23
ตารางที่ 4.2 การวัดจำนวนร่องของเหล็กแผ่นรีดเย็นที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้ว เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการเผาต่างกัน เวลาที่ใช้กัดกรด 2 นาที อุณหภูมิ 820 °C.....	26
ตารางที่ 4.3 การทดสอบการเกาะติดด้วยการกระแทกของเหล็กแผ่นรีดเย็นที่ผ่านการ ลดคาร์บอนแล้วที่สภาวะก่อนการเคลือบต่างกัน เวลาเผาเคลือบ 4 นาที อุณหภูมิ 820 °C	32
ตารางที่ 4.4 การทดสอบการเกาะติดด้วยการกระแทกของเหล็กแผ่นรีดเย็นที่ผ่านการ ลดคาร์บอนแล้ว เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการเผาต่างกัน เวลาที่ใช้กัดกรด 2 นาที อุณหภูมิ 820 °C.....	34
ตารางที่ 4.5 ปริมาณซีเมนต์ไฮดรอกไซด์ในเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCCและเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้ว ที่ความลึกจากผิวแตกต่างกัน	35
ตารางที่ 4.6 ส่วนผสมทางเคมีส่วนที่เป็นเนื้อเหล็กบริเวณรอยต่อของเหล็กแผ่นรีดเย็น เคลือบอินามาเมลด้วยวิธี EDS.....	39

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	กระบวนการเคลือบอีนาเมลแบบ 2 ชั้น (Two coat/Two fire).....	4
รูปที่ 2.2	ซีเมนต์ที่ผิวในเหล็กแผ่นรีดเย็น อบที่ อุณหภูมิ 970 °C เป็นเวลา 10 นาที เย็นตัวในอากาศถึง 700 °C จากนั้นเย็นตัว 100 °C/ ชั่วโมง ความแข็ง 90 HV กัดผิวหน้าด้วย 1%ไนตอล+พิครัล กำลังขยาย 2000 เท่า.....	5
รูปที่ 2.3	แสดงลักษณะการเกาะติดระหว่างชั้นเหล็กออกไซด์กับอีนาเมล.....	9
รูปที่ 2.4	แสดงผลของนิกเกิดต่อการเกาะติดเมื่อเวลาในการเผาที่อุณหภูมิ 1550 °F เพิ่มขึ้น.....	10
รูปที่ 2.5	แสดงความแตกต่างของการกัดกร่อนของผิวเหล็กโดยอีนาเมลชั้นแรก	11
รูปที่ 2.6	แสดงวิธีการวัดความหยาบบริเวณรอยต่อของอีนาเมลกับเหล็ก.....	12
รูปที่ 3.1	การจัดระดับการเกาะติดของการเคลือบ 2 ชั้น เผา 1 ครั้ง (Two Coat-One Fire) ตามมาตรฐาน ASTM B916-01.....	15
รูปที่ 3.2	ตัวอย่างการวัดจำนวนร่องบริเวณรอยต่อระหว่างอีนาเมลกับเหล็ก กำลังขยาย 1000 เท่า.....	18
รูปที่ 4.1	ความหยาบบริเวณรอยต่อ เหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล เวลากัดกรด 2 นาที ไม่จุ่มนิกเกิด เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที.....	20
รูปที่ 4.2	ความหยาบบริเวณรอยต่อ เหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล เวลากัดกรด 4 นาที ไม่จุ่มนิกเกิด เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที.....	20
รูปที่ 4.3	ความหยาบบริเวณรอยต่อ เหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล เวลากัดกรด 6 นาที ไม่จุ่มนิกเกิด เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที.....	21
รูปที่ 4.4	ความหยาบบริเวณรอยต่อ เหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล เวลากัดกรด 2 นาที จุ่มนิกเกิด 4 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที.....	21
รูปที่ 4.5	ความหยาบบริเวณรอยต่อ เหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล เวลากัดกรด 4 นาที จุ่มนิกเกิด 4 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที.....	22
รูปที่ 4.6	ความหยาบบริเวณรอยต่อ เหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล เวลากัดกรด 6 นาที จุ่มนิกเกิด 4 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที.....	22

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.7 ความหยابบริเวณรอยต่อ เหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล
เวลากัดกรด 2 นาที จุ่มนิกเกิล 8 นาที เเผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที..... 24

รูปที่ 4.8 ความหยابบริเวณรอยต่อ เหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล
เวลากัดกรด 4 นาที จุ่มนิกเกิล 8 นาที เเผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที..... 24

รูปที่ 4.9 ความหยابบริเวณรอยต่อ เหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล
เวลากัดกรด 4 นาที จุ่มนิกเกิล 8 นาที เเผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที.....25

รูปที่ 4.10 ความหยابบริเวณรอยต่อ เหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล
เวลากัดกรด 2 นาที จุ่มนิกเกิล 4 นาที เเผาที่อุณหภูมิ 820 °C 3 นาที..... 25

รูปที่ 4.11 ความหยابบริเวณรอยต่อ เหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล
เวลากัดกรด 2 นาที จุ่มนิกเกิล 8 นาที เเผาที่อุณหภูมิ 820 °C 3 นาที..... 26

รูปที่ 4.12 พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทกของตัวอย่างเหล็กแผ่น
ลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล กัดกรด 2 นาที ไม่จุ่มนิกเกิล
เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที แสดงการเกาะติดระดับ 27

รูปที่ 4.13 พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทกของตัวอย่างเหล็กแผ่น
ลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล กัดกรด 4 นาที ไม่จุ่มนิกเกิล
เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที แสดงการเกาะติดระดับ 1..... 28

รูปที่ 4.14 พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทกของตัวอย่างเหล็กแผ่น
ลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล กัดกรด 6 นาที ไม่จุ่มนิกเกิล
เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที แสดงการเกาะติดระดับ 0..... 28

รูปที่ 4.15 พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทกของตัวอย่างเหล็กแผ่น
ลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล กัดกรด 2 นาที จุ่มนิกเกิล 4 นาที
เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที แสดงการเกาะติดระดับ..... 29

รูปที่ 4.16 พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทกของตัวอย่างเหล็กแผ่น
ลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล กัดกรด 4 นาที จุ่มนิกเกิล 4 นาที
เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที แสดงการเกาะติดระดับ 4..... 29

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.17	พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทกของตัวอย่างเหล็กแผ่น ลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล กัดกรด 6 นาที จุ่มนิกเกิล 4 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที แสดงการเกาะติดระดับ 2.....	30
รูปที่ 4.18	พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทกของตัวอย่างเหล็กแผ่น ลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล กัดกรด 2 นาที จุ่มนิกเกิล 8 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที แสดงการเกาะติดระดับ 3.....	31
รูปที่ 4.19	พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทกของตัวอย่างเหล็กแผ่น ลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล กัดกรด 4 นาที จุ่มนิกเกิล 8 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที แสดงการเกาะติดระดับ 0.....	31
รูปที่ 4.20	พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทกของตัวอย่างเหล็กแผ่น ลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล กัดกรด 6 นาที จุ่มนิกเกิล 8 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที แสดงการเกาะติดระดับ 1	32
รูปที่ 4.21	พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทกของตัวอย่างเหล็กแผ่น ลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล กัดกรด 2 นาที จุ่มนิกเกิล 4 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 3 นาที แสดงการเกาะติดระดับ 3.....	33
รูปที่ 4.22	พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทกของตัวอย่างเหล็กแผ่น ลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล กัดกรด 2 นาที จุ่มนิกเกิล 8 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 3 นาที แสดงการเกาะติดระดับ	34
รูปที่ 4.23	แสดงลักษณะซีเมนไต์บาง (Thin film) ในเหล็กแผ่นรีดเย็น.....	36
รูปที่ 4.24	แสดงลักษณะซีเมนไต์หนา (Thick film) ในเหล็กแผ่นรีดเย็น.....	36
รูปที่ 4.25	ปริมาณซีเมนไต์หนาที่วัดได้ในเหล็กแผ่นรีดเย็น 2 ชนิด ที่ความลึกจากผิว แตกต่างกัน.....	37
รูปที่ 4.26	แสดงตำแหน่งการวัดปริมาณธาตุด้วยวิธี EDS ในตัวอย่างเหล็กแผ่น SPCC.....	38

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.27 แสดงตำแหน่งการวัดปริมาณธาตุด้วยวิธี EDS ในตัวอย่างเหล็กที่ลดคาร์บอนแล้ว.....	38
รูปที่ 4.28 การทดสอบปริมาณธาตุด้วยวิธี X-RAY Mapping บริเวณรอยต่อของเหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้ว กำลังขยาย 800 เท่า.....	39
รูปที่ 4.29 การทดสอบปริมาณธาตุด้วยวิธี X-RAY Mapping บริเวณรอยต่อของเหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้ว กำลังขยาย 2000 เท่า	39
รูปที่ 5.1 ความหยาบบริเวณรอยต่อของเหล็กแผ่นรีดเย็นเคลือบอีนาเมลที่ได้จากการกัดกรดและการจุ่มเคลือบนิกเกิล ที่เวลาต่างๆ กัน.....	41
รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบจำนวนร่องที่วัดได้ที่เวลาในการกัดกรดและจุ่มเคลือบนิกเกิลต่างกัน.....	42
รูปที่ 5.3 ผลการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทก เปรียบเทียบผลจากการกัดกรดและการจุ่มเคลือบนิกเกิล ที่เวลาต่างๆ กัน.....	43
รูปที่ 5.4 ความหยาบบริเวณรอยต่อที่ได้จากการจุ่มเคลือบนิกเกิลที่เวลาเผาเคลือบต่างๆ กัน อุณหภูมิในการเผาเคลือบ 820 °C.....	45
รูปที่ 5.5 ผลการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธี Impact test เปรียบเทียบผลจากเวลาในการเผาและการจุ่มนิกเกิล ที่เวลาต่างๆ กัน.....	46
รูปที่ 5.6 พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทกของตัวอย่างเหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล กัดกรด 4 นาที จุ่มนิกเกิล 8 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที พบข้อบกพร่องที่ผิวที่เกิดจากก๊าซ.....	47
รูปที่ 5.7 โครงสร้างจุลภาคเปรียบเทียบปริมาณซีเมนไตต์ที่ความลึกจากผิวต่างกัน.....	48

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

การเคลือบอีนาเมล (Porcelain Enamel Coating) เป็นเทคโนโลยีการเคลือบแก้วที่สำคัญในการเคลือบผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่น, เหล็กหล่อและอะลูมิเนียม เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความสวยงามและปกป้องพื้นผิวของโลหะ โดยมีการใช้งานการเคลือบอีนาเมลบนเหล็กแผ่นรีดเย็น (Cold Rolled Steel Sheet) เป็นหลัก เนื่องจากมีสมบัติการยึดในแนวลึก (Deep Drawing) ดีและมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม โดยมีผลิตภัณฑ์เคลือบที่สำคัญคือ อุปกรณ์ภายในบ้าน, เครื่องสุขภัณฑ์ ดังเก็บน้ำร้อนและอุปกรณ์เครื่องครัว เป็นต้น⁽¹⁾ การเคลือบอีนาเมลยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของผิวเคลือบให้สอดคล้องกับการใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีลักษณะพิเศษ เช่น ความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากบรรยากาศและสารเคมี, ความต้านทานต่อการเสียดสี, ความต้านทานต่อความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

การเคลือบอีนาเมลที่มีคุณภาพต้องมีสมบัติหลักที่สำคัญ 2 ข้อคือ ผิวเคลือบอีนาเมลต้องไม่มีข้อบกพร่องและมีสมบัติในการเกาะติดกับเหล็กที่ดี (Good Adherence) ข้อบกพร่องที่พบบ่อยในเหล็กแผ่นรีดเย็นคือ การหลุดร่อนออกของชั้นเคลือบเนื่องจากก๊าซบริเวณผิวของเหล็กแผ่นเนื่องจากคาร์บอนที่ผิวของเหล็กรวมตัวกับออกซิเจนทำให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์และผลจากก๊าซไฮโดรเจน เมื่อความดันก๊าซสูงขึ้นจะดันออกสู่บรรยากาศทำให้เกิดข้อบกพร่องดังกล่าว

ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมปริมาณคาร์บอนในเหล็กแผ่นรีดเย็นให้มีปริมาณต่ำมาก เพื่อลดโอกาสการเกิดก๊าซบริเวณผิวของเหล็กแผ่นรีดเย็น โดยวิธีการลดปริมาณคาร์บอนทำได้โดยทำให้มีคาร์บอนปริมาณน้อยในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าและเติมธาตุผสมที่มีสมบัติในการรวมตัวกับธาตุคาร์บอนได้ดีในเหล็กแผ่นรีดเย็น ธาตุผสมเหล่านี้ได้แก่ Ti หรือ Nb ซึ่งจะรวมตัวกับคาร์บอนเกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะทำให้ลดปริมาณคาร์บอนอิสระในเหล็กแผ่นรีดเย็นให้ลดน้อยลง กระบวนการลดปริมาณคาร์บอนในเหล็กสามารถทำได้ด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) ในบรรยากาศที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาลดคาร์บอนจากเหล็ก (Decarburization) ซึ่งกระบวนการนี้สามารถลดปริมาณคาร์บอนในเหล็กได้ต่ำกว่า 0.008%⁽³⁾ ในขณะที่สมบัติในการเกาะติดที่ดีเกิดได้จากหลายปัจจัย เช่น ขั้นตอนการทำความสะอาดก่อนการเคลือบที่เหมาะสม, คุณภูมิในการเผา, การจุ่มนิกเกิล เป็นต้น

เนื่องจากสามารถทำการลดปริมาณคาร์บอนในระหว่างการทำ Batch Annealing ได้ โดยการควบคุมบรรยากาศให้เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาลดคาร์บอนจากเหล็ก ดังนั้นการหาสภาวะที่เหมาะสมไม่ว่าจะเป็น เวลาในการอบอ่อน,บรรยากาศภายในเตาและอุณหภูมิในการอบอ่อน เพื่อให้มีปริมาณคาร์บอนในเหล็กต่ำกว่า 0.008% และหาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้การเกาะติดของอีนามัลกับเหล็กแผ่นที่ลดปริมาณคาร์บอนแล้วดีที่สุด จึงเป็นประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมเหล็ก เนื่องจากการลดปริมาณการนำเข้าของเหล็กแผ่นที่เติมธาตุผสม Ti หรือ Nb ซึ่งมีราคาแพง โดยใช้เหล็กแผ่นรีดเย็นที่ผลิตได้ในประเทศโดยผ่านกระบวนการลดคาร์บอนแล้วทดแทนเหล็กแผ่นที่เติมธาตุผสมซึ่งมีราคาแพง โดยมีสมบัติในการเกาะติดของอีนามัลกับเหล็กแผ่นที่ดีและปราศจากข้อบกพร่องที่ผิว เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าเพิ่มให้กับเหล็กแผ่นรีดเย็นในประเทศและลดต้นทุนในการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นเคลือบอีนามัลในประเทศด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการเคลือบอีนามัลแบบ 2 ชั้น บนเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ที่ผ่านการลดปริมาณคาร์บอนแล้ว
- 1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการเคลือบอีนามัลบนเหล็กแผ่นให้มีการเกาะติดที่ดีและไม่มีข้อบกพร่องที่ผิวของเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ที่ผ่านการลดปริมาณคาร์บอนแล้ว

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 ศึกษาผลของตัวแปรในการเพิ่มความสามารถในการเกาะติดของอีนามัล ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการกัดกรด (Pickling Time) และเวลาในการจุ่มนิกเกิล (Nickel Dip Time)
- 1.3.2 ศึกษาผลของเวลาในการเผาเคลือบทั้งสองชั้นที่อุณหภูมิ 820 °C แปรผันเวลาในการเผาเคลือบ 3 และ 4 นาที
- 1.3.3 ทดสอบความสามารถในการเกาะติดของเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนามัลด้วยการทดสอบการกระแทกและตรวจสอบด้วยการนับจำนวนร่อง
- 1.3.4 เปรียบเทียบปริมาณซีเมนต์ไฮดรอกไซด์ของเหล็กแผ่นเกรด SPCC และเหล็กแผ่นเกรด SPCC ที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้วตั้งแต่ผิวถึง 210 ไมครอน
- 1.3.5 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและวิเคราะห์ธาตุบริเวณรอยต่อของเหล็กแผ่นรีดเย็นเคลือบอีนามัล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถเลือกใช้เวลาในการกัฏกรต, เวลาในการจุ่มนิกเกิลและอุณหภูมิในการเผาที่เหมาะสมกับแผ่นเหล็กรีดเย็น SPCC ที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้ว ให้มีการเกาะติดดีที่สุดและไม่มีข้อบกพร่องที่ผิวเคลือบ
- 1.4.2 ทราบถึงผลและปัญหาที่เกิดขึ้นในการเคลือบอีนาเมลบนเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ที่ลดคาร์บอนแล้วด้วยกระบวนการเคลือบแบบ 2 ชั้น เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาการเคลือบอีนาเมลบนเหล็กแผ่นรีดเย็นชนิดนี้ต่อไป



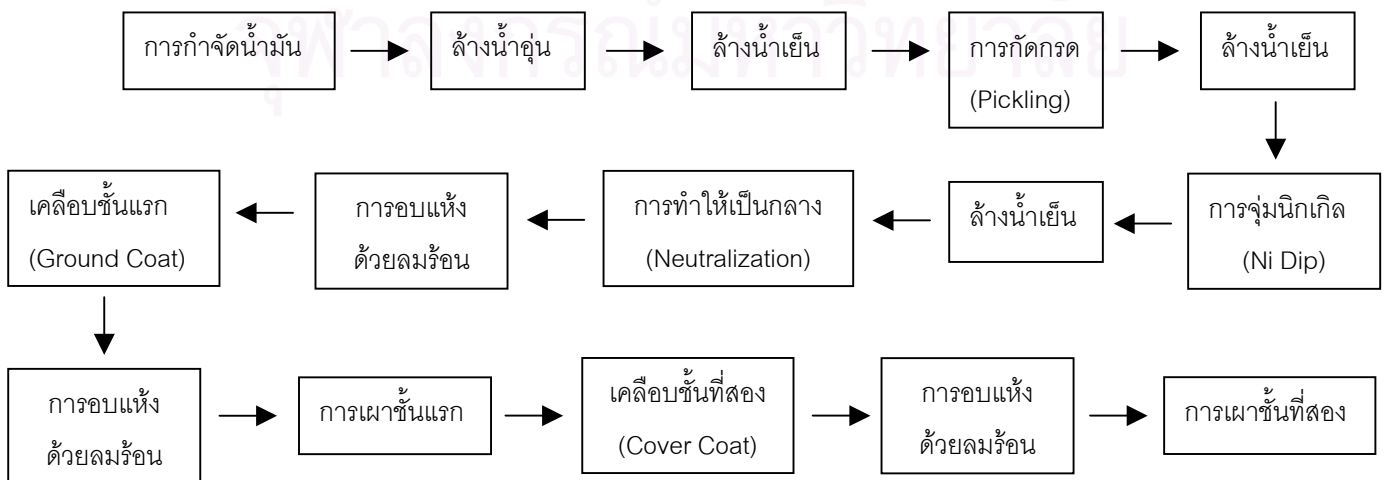
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรม

กระบวนการเคลือบอีนาเมลเป็นการเคลือบผิวที่มีความสำคัญในการเคลือบเหล็กแผ่นรีดเย็นในปัจจุบัน ทำให้พื้นผิวของงานเคลือบมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น ในด้านความต้านทานความร้อน, ความต้านทานต่อการกัดกร่อนและความสวยงามของผิวเคลือบ โดยมีการนำเหล็กแผ่นเคลือบอีนาเมลไปใช้งานมากในผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับสุขภัณฑ์และเครื่องครัว กระบวนการเคลือบอีนาเมลบนเหล็กแผ่นรีดเย็นใช้การเคลือบแบบ 2 ชั้น (Two Coat / Two Fire) เป็นส่วนมาก⁽¹⁾ อีนาเมลที่ใช้ในการเคลือบแต่ละชั้นมีสมบัติที่แตกต่างกัน อีนาเมลที่ใช้ในการเคลือบชั้นแรก(Ground Coat) ต้องมีสมบัติในการเกาะติดดี โดยต้องมีส่วนผสมของโคบอลต์หรือนิกเกิลออกไซด์เพื่อเพิ่มความสามารถในการเกาะติด ในขณะที่การเคลือบชั้นที่สอง(Cover Coat) มีจุดประสงค์เพื่อปกป้องข้อบกพร่องที่เกิดจากผิวเคลือบชั้นแรกและปรับปรุงสมบัติผิวเคลือบให้เหมาะสมในการนำไปใช้งาน

อีนาเมลที่ใช้เคลือบประกอบด้วยโบโรซิลิเกตเป็นส่วนผสมหลักรวมกับส่วนผสมของออกไซด์อื่นอีกหลายชนิด ชนิดของอีนาเมลที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่นำมาเคลือบและสมบัติที่ต้องการในการนำไปใช้งาน การผลิตอีนาเมลเริ่มจากการหลอมส่วนผสมของวัสดุทนไฟกับฟลักซ์ทั้งหมดเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิ 1100 – 1400 °C⁽²⁾ แก้วที่ถูกหลอมรวมกันแล้วชุบลงในน้ำ จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า ฟริต (Frit) มีลักษณะเป็นแก้วเปราะ จากนั้นนำมาบดด้วยลูกบดให้มีขนาดเล็กละเอียดตามต้องการ โดยในขณะบดผสมน้ำในปริมาณที่เหมาะสมจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะคล้ายครีมเรียกว่า สลิป (Slip) ซึ่งใช้ในกรรมวิธีการพ่นเคลือบแบบเปือก ก่อนการนำไปใช้งานต้องผสมสารเพิ่มเติม (Mill Addition) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของอีนาเมลให้เหมาะสมในการเคลือบ เช่น เบนโทไนท์และอิเลคโทรไลต์ เพื่อให้ครีมอีนาเมลคงตัวและมีความหนืดที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน กระบวนการเคลือบอีนาเมลแสดงในรูปที่ 2.1

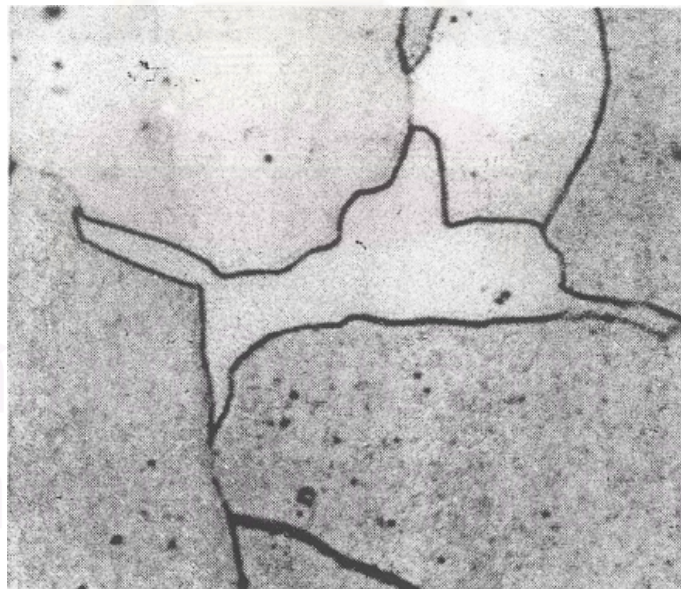


รูปที่ 2.1 กระบวนการเคลือบอีนาเมลแบบ 2 ชั้น (Two coat/Two fire)⁽³⁾

ในอุตสาหกรรมการเคลือบอีนาเมลในปัจจุบัน ใช้เหล็กแผ่นรีดเย็นในการเคลือบเป็นหลัก แต่เหล็กแผ่นรีดเย็นโดยทั่วไป (Common Cold Roll Steel) เหมาะสำหรับงานที่ไม่ต้องการความสวยงามที่ผิวมากนัก เนื่องจากในระหว่างการเผาในช่วงอุณหภูมิ 800 – 850 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิเผาเคลือบอีนาเมล เหล็กแผ่นจะเกิดการบิดงอ (Distortion) เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิของสแตนท์ไนท์ ซึ่งมีสแตนท์ไนท์ส่วนหนึ่งเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมินี้ทำให้เกิดการบิดงอดังกล่าว ยิ่งเหล็กมีปริมาณคาร์บอนสูงก็ทำให้เกิดสแตนท์ไนท์สูงตามไปด้วย นอกจากนี้ยังมีก๊าซเกิดขึ้นในระหว่างเคลือบจากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์ไตต์บริเวณใกล้ผิวกับออกไซด์ในอีนาเมลและก๊าซในบรรยากาศทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ดังปฏิกิริยา^(4,5)



ซึ่งหากอนุภาคซีเมนต์ไตต์มีขนาดใหญ่และมีปริมาณมากตามปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น เกิดก๊าซเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดข้อบกพร่องที่ผิว เรียกว่า การเดือดของคาร์บอน (Carbon Boiling) โดยขนาดของซีเมนต์ไตต์ซึ่งเป็นแหล่งที่ทำให้เกิดก๊าซมีความหนา 2 ไมครอนแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ซีเมนต์ไตต์ที่ผิวในเหล็กแผ่นรีดเย็น อบที่อุณหภูมิ 970 °C เป็นเวลา 10 นาที เย็นตัวในอากาศถึง 700 °C แล้วหลังจากนั้นเย็นตัว 100 °C/ชั่วโมง ความแข็ง 90 HV กัดผิวหน้าด้วย 1%ไนตอล+พิครัล กำลังขยาย 2000 เท่า

นอกจากนี้ซีเมนไตต์ที่จับตัวเกิดขึ้นในเหล็กกล้า ทำให้เกิดช่องว่างที่จะดูดซับก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดข้อบกพร่องเนื่องจากการเกิดก๊าซไฮโดรเจน^(1,4) โดยก๊าซไฮโดรเจนเกิดในขั้นตอนการเผา จากปฏิกิริยา $Fe + H_2O = FeO + H_2$ โดยเมื่อเหล็กถูกเผาที่อุณหภูมิสูงความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนในเหล็กเพิ่มมากขึ้นทำให้มีการสะสมของไฮโดรเจนในเหล็ก เมื่อเหล็กเย็นตัวลงความสามารถในการละลายไฮโดรเจนในเหล็กลดลง ก๊าซไฮโดรเจนแพร่ออกมาเป็นจำนวนมากบริเวณรอยต่อของเหล็กกับอิनाเมล เมื่อความดันของก๊าซสูงพอจะทำให้ชั้นเคลือบแตกออกเกิดข้อบกพร่องที่เรียกว่า Fishscale

ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเหล็กกล้าเคลือบอิनाเมลที่มีคาร์บอนต่ำมาก โดยทำการลดคาร์บอนในเหล็กกล้าด้วยกระบวนการ Open Coil Annealing ซึ่งจะใช้เหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนอยู่ในช่วง 0.02-0.05% โดยทำการคลายม้วนเหล็กให้หลวมแล้วอบอ่อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติล่าง (เส้น A_1) เล็กน้อย ในบรรยากาศที่ทำให้เกิดการลดคาร์บอนในเหล็ก ซึ่งประกอบด้วยไฮโดรเจน, ไนโตรเจนและไอน้ำ ด้วยเวลาที่เพียงพอ จะลดคาร์บอนในเหล็กได้ต่ำกว่า 0.005%^(2,5,6) ซึ่งจะลดข้อบกพร่องที่เกิดจากก๊าซและปรับปรุงสมบัติการดึงขึ้นรูปอีกด้วย เหล็กที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้วจะให้ผลการเคลือบอิनाเมลที่ดี เนื่องจากลดการเกิดก๊าซขณะเผาและต้านทานการบิดขณะเผาได้ดี

เหล็กที่พัฒนาขึ้นอีกชนิดหนึ่งสำหรับเคลือบอิनाเมล เป็นเหล็กแผ่นรีดเย็นที่มีธาตุคาร์บอนต่ำมากและมีธาตุผสมที่มีความสามารถรวมตัวกับคาร์บอนและไนโตรเจนอิสระได้ดี เรียกว่า Interstitial Free Steel มีสมบัติในการยืดในแนวลึกดีเลิศ เหล็กชนิดนี้มีธาตุผสมพวกไทเทเนียมหรือไนโอเบียมซึ่งจะจับกับคาร์บอนและไนโตรเจนอิสระเกิดเป็นสารประกอบคาร์ไบด์และไนไตรด์ ทำให้ลดการเกิดข้อบกพร่องจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เนื่องจากมีการจับตัวของไนไตรด์ในเหล็กกล้าชนิดนี้ด้วย ดังนั้นจึงไม่ค่อยเกิดข้อบกพร่องชนิด Fishscale เพราะไฮโดรเจนเกิดพันธะเคมีกับธาตุผสมในเหล็ก⁽¹⁾

ในการเคลือบอินาเมลบนเหล็กแผ่นรีดเย็นที่ลดคาร์บอนแล้วให้มีการเกาะติดที่ดีนั้น ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ทั้งขั้นตอนการเตรียมผิวเหล็กและขั้นตอนการเผาต้องควบคุมให้เหมาะสม

การกัดกรดมีจุดประสงค์เพื่อกำจัดสนิมออกจากผิวหลังจากขั้นตอนกำจัดน้ำมันแล้ว การกัดกรดก็ทำให้ผิวเหล็กมีความหยาบด้วย ซึ่งช่วยเพิ่มการเกาะติดของอินาเมลกับเหล็ก

การจุ่มนิกเกิล เป็นการเคลือบที่ใช้ความแตกต่างทางศักย์ไฟฟ้าเคมีของเหล็กกับนิกเกิล การเคลือบนิกเกิลบนผิวเหล็กเพื่อเพิ่มความสามารถในการเกาะติดของอินาเมลกับเหล็ก กระบวนการนี้เป็นวิธีการเคลือบแบบไร้ไฟฟ้า เกิดขึ้นเมื่อจุ่มเหล็กในสารละลายนิกเกิลซัลเฟต นิกเกิลจะสะสมบนผิวเหล็กเนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดยศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของ Fe/Fe^{2+} ที่ 20 °C มีค่า -0.44 และ Ni/Ni^{2+} ที่ 20 °C มีค่า -0.23 เกิดการสะสมของนิกเกิลบนผิว

เหล็ก ซึ่งในนิกเกิลซัลเฟตที่ 70°C จะเกิดปฏิกิริยา $\text{Fe} + \text{NiSO}_4 = \text{FeSO}_4 + \text{Ni}$ จากการศึกษาพบว่า การเกิดฟิล์มของนิกเกิลซึ่งมีลักษณะเป็นฟองน้ำ ช่วยปรับปรุงการเกาะติดระหว่างอีนามัลกับเหล็กให้ดีขึ้นมากในขั้นตอนการเผา⁽⁶⁾

Fuh Sheng Shieu, Kuen Chang Lin และ Jen Chyang Wong⁽⁷⁾ ทดลองเคลือบอีนามัลบนเหล็กแผ่นรีดเย็นคาร์บอนต่ำที่ผสมไทเทเนียมพบว่า การแปรผันเวลาในการกัดกรด 3–9 นาที ในสารละลาย 14% ของกรดกำมะถัน ไม่ทำให้มีเกิดการเปลี่ยนแปลงความหยาบบริเวณรอยต่อมากนัก ตัวอย่างที่ผ่านการจุ่มนิกเกิล แสดงให้เห็นชิ้นส่วนเล็กๆของเหล็กบริเวณรอยต่อ ชิ้นส่วนเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่ห่างจากผิวเหล็กเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาในการกัดกรดและจุ่มนิกเกิลเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์ด้วย EDS พบว่าชิ้นส่วนนี้ประกอบด้วยเหล็กและนิกเกิลเป็นส่วนใหญ่

ในขั้นตอนการเผาอีนามัลขั้นแรก เกิดปฏิกิริยาเหล่านี้ตามลำดับ คือ

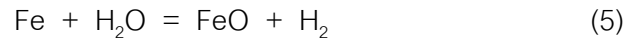
1. การเกิดออกซิเดชันของผิวเหล็ก
2. การหลอมของอีนามัลและการเป็ยกของผิวเหล็ก
3. การกัดกร่อนเนื่องจากไฟฟ้าเคมีของผิวเหล็ก ทำให้เกิดความหยาบของผิวเหล็ก
4. การละลายของซิลิกาและส่วนผสมอื่น

การพัฒนาการเกาะติดของอีนามัลกับเหล็กเกิดขึ้นในระหว่างการเผา มีหลายปฏิกิริยาที่ซับซ้อนเกิดขึ้นบริเวณผิวเหล็กและในชั้นเคลือบอีนามัลเอง มี 2 กระบวนการเกิดขึ้นระหว่างการเผาเคลือบอีนามัล ได้แก่ ขั้นตอนเริ่มต้นของการเผาจนอีนามัลเริ่มหลอมและระหว่างที่อีนามัลหลอมเหลว ในกระบวนการแรก ระหว่างการเผา ความชื้นจะระเหยจากชั้นเคลือบอีนามัล ซึ่งยังไม่ระเหยจากขั้นตอนการเผาด้วยลมร้อน ที่อุณหภูมิ 500°C ส่วนประกอบที่เป็นน้ำจะแยกตัวออกจากอีนามัล ทำให้เกิดรอยแตกเนื่องจากการหดตัว เกิดรูพรุนเกิดขึ้น ออกซิเจนในอากาศเคลื่อนสู่ผิวเหล็กได้อย่างอิสระ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน



เกิดฟิล์มของชั้นออกไซด์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ปริมาณของเหล็กออกไซด์และโครงสร้างของฟิล์มขึ้นกับเวลาในการเผาและความสามารถในการเกิดออกซิเดชันของเหล็กได้ผิวเคลือบอีนามัล ความสามารถในการเกิดออกซิเดชันของเหล็กขึ้นกับส่วนผสมทางเคมีและส่วนผสมของอีนามัลที่เผาด้วย กระบวนการนี้จะเกิดสมบูรณ์ใช้เวลาประมาณ 1–2 นาที

กระบวนการที่ 2 เมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น อีนาเมลจะเริ่มหลอมเหลว ออกซิเจนที่เคลื่อนที่อย่างอิสระเข้ามาที่ผิวเหล็กจึงเป็นไปได้ยาก ออกซิเจนจากบรรยากาศเข้าสู่ผิวเหล็กโดยกระบวนการแพร่ผ่านชั้นอีนาเมลหลอมเหลว อากาศถูกกำจัดออกจากรูพรุนเนื่องจากการแทนที่ของอีนาเมลหลอมเหลว น้ำจาก Slip ทำปฏิกิริยากับเหล็กดังนี้



ก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นและเป็นฟองก๊าซซึ่งผ่านสู่ชั้นเคลือบอีนาเมลและบางส่วนละลายในเหล็ก ผลที่ตามมาของไฮโดรเจนที่ละลายในเหล็กก่อให้เกิดข้อบกพร่องแบบ Fishscale คาร์บอนที่ผิวเหล็กเกิดปฏิกิริยากับโลหะออกไซด์ในอีนาเมลด้วยเช่นเดียวกัน



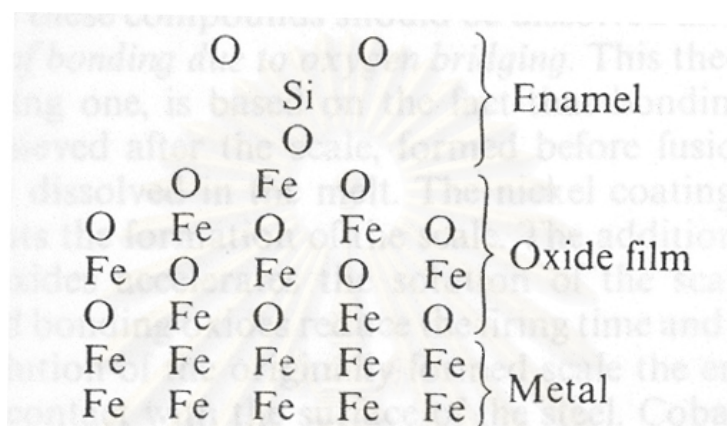
เมื่ออุณหภูมิการเผาสูงกว่า 540°C เหล็กออกไซด์ที่มีสถานะสูงกว่า Fe_2O_3 และ Fe_3O_4 ที่เกิดก่อนหน้านี้เปลี่ยนเป็น FeO ตามปฏิกิริยา



สภาวะที่จำเป็นสำหรับการเกาะติดระหว่างอีนาเมลกับเหล็ก คือ ความสามารถในการเปียกของผิวเหล็กโดยอีนาเมลหลอมเหลว เพื่อให้มีการไหลตัวของอีนาเมลชั้นแรกที่ดีต้องมีฟิล์มบางของเหล็กออกไซด์เกิดขึ้น โดยการเปียกนั้นเกี่ยวข้องกับก๊าซในบรรยากาศและอุณหภูมิเป็นอย่างยิ่ง โดยอีนาเมลเหลวมีการเปียกไม่ติดบนเหล็กในสูญญากาศและบรรยากาศรีดิวซ์ เมื่อความสามารถในการเปียกไม่เกิดการเกาะติดจะไม่เกิดขึ้น พบว่าการเปียกของผิวเหล็กดีขึ้นมากในบรรยากาศที่มีก๊าซออกซิเจน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการเปียกดีขึ้น ทำให้มีการเกาะติดระหว่างอีนาเมลกับเหล็กเกิดขึ้น การเปียกของอีนาเมลหลอมเหลวจะลดลงเมื่อระดับของการเกิดออกซิเดชันสูงขึ้น เช่น FeO มีความสามารถในการเปียกดีกว่า Fe_2O_3 ⁽⁶⁾

การเกาะติดของอีนาเมลกับเหล็กเกิดได้ในการเผาในบรรยากาศออกซิเดชัน ก่อนที่อีนาเมลจะหลอมเหลว ออกซิเจนในอากาศสามารถเจาะผ่านรูพรุนของชั้นเคลือบได้ง่าย ผิวเหล็กถูกออกซิไดซ์ เกิดฟิล์มออกไซด์บริเวณผิวเหล็ก การเกาะติดเกิดขึ้นเมื่อมีการละลายของ FeO ในอีนาเมล จากการทดลองพบว่าระหว่างการเผาอีนาเมล มีเหล็กออกไซด์ที่ละลายในอีนาเมลเป็นจำนวน

มาก การละลายของเหล็กออกไซด์ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของอีนาเมล โดยการละลายอาจสูงถึง 30% ปกติแล้วในการเผาโดยทั่วไป ปริมาณของเหล็กออกไซด์ที่ละลายในอีนาเมลมีปริมาณน้อย เหล็กออกไซด์สามารถละลายในเหล็กได้ด้วย ประมาณ 0.5% นักวิจัยหลายคนพบว่า การเกาะติดในกรณีนี้เกิดเนื่องจากฟิล์มของเหล็กออกไซด์ที่บางส่วนละลายในเหล็กและบางส่วนในอีนาเมล ทำให้เกิดการยึดติดซึ่งกันและกัน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการเกาะติดระหว่างชั้นเหล็กออกไซด์กับอีนาเมล

พบว่าเหล็กออกไซด์มีการละลายในอีนาเมล เมื่ออีนาเมลสัมผัสด้วยเหล็กออกไซด์ เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในอีนาเมล อีนาเมลเสื่อมสภาพความเป็นแก้ว ผลที่เกิดขึ้นคืออีนาเมลมีความแข็งแรงเชิงกลต่ำมากและไวต่อการเกิดข้อบกพร่องเนื่องจากไฮโดรเจน⁽⁶⁾

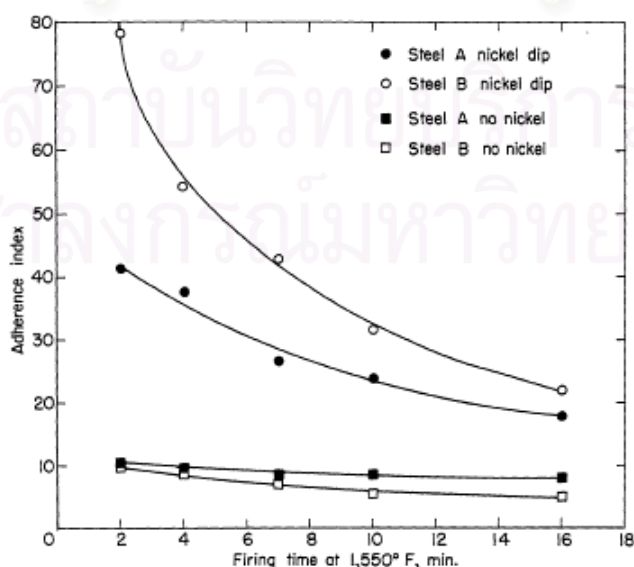
Joseph A. Pask⁽⁹⁾ พบว่าการเกาะติดทางเคมีเกิดขึ้นเมื่อมีเหล็กออกไซด์ในอีนาเมล การเกาะติดที่ดีของอีนาเมลกับผิวเหล็กเกิดขึ้นเมื่อทั้งอีนาเมลและเหล็กสัมผัสด้วยออกไซด์ของเหล็กที่ผิว อย่างไรก็ตามถ้าอุณหภูมิการเผาต่ำ ออกไซด์ไม่สามารถละลายได้หรือสูงเกินไปซึ่งทำให้สมดุลย์ของปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนแปลง ทำให้การเกาะติดไม่ดี

D. B. Clay และ R. M. Jamieson⁽¹⁰⁾ พบว่าเหล็ก (Fe) ที่ละลายในอีนาเมลเป็นตัวทำให้เกิดการเกาะติดที่ดี อย่างไรก็ตามถ้าเหล็กออกไซด์ (FeO) มีปริมาณมากบริเวณรอยต่อของอีนาเมลกับเหล็กหลังการเผา การเกาะติดจะลดลง Ralph L. Cook⁽¹¹⁾ ระบุว่าเหล็กที่ละลายในอีนาเมลขึ้นกับสถานะไอออนิก โดย Fe ละลายได้น้อยกว่า FeO

การเกาะติดเกิดขึ้นเนื่องจากการกัดกร่อนที่ผิวเหล็กในระหว่างการเผา โดยนิกเกิลออกไซด์ในอีนาเมล เกิดปฏิกิริยารีดักชันของนิกเกิลกับเหล็กโดย $Fe + NiO = FeO + Ni$ การจุ่มสารละลายนิกเกิลซัลเฟตมีจุดประสงค์เพื่อให้เกิดฟิล์มของนิกเกิลที่มีลักษณะพรุนบนผิวเหล็ก ชั้นของนิกเกิลช่วยยับยั้งการเกิดข้อบกพร่องเนื่องจากก๊าซและยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของเหล็ก⁽⁸⁾ ในระหว่าง

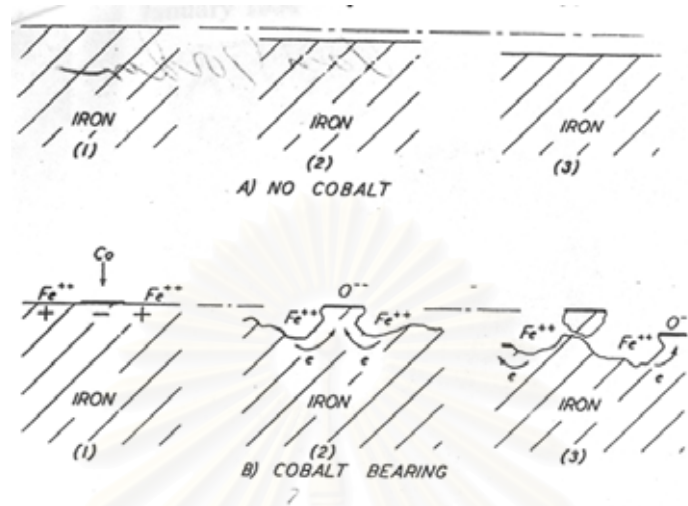
การเผา เหล็กออกไซด์ละลายในอีนาเมลหลอมเหลว ขณะที่นิเกิลในอีนาเมลหลอมเหลวตกผลึก และสะสมบนผิวเหล็ก ระหว่างบริเวณผิวที่มีนิเกิลสะสมและผิวเหล็ก เกิดเซลล์ไฟฟ้าเคมี เหล็กให้อิเลคตรอนแก่นิกเกิลและละลายในอีนาเมลหลอมเหลวในรูปของ Fe^{2+} ในทางกลับกันนิเกิลให้อิเลคตรอนแก่ออกซิเจน เกิดการละลายของเหล็กเข้าสู่สารละลายอย่างต่อเนื่อง ผิวเหล็กถูกกัดกร่อนอย่างรวดเร็ว อีนาเมลหลอมเหลวไหลสู่ร่องของเหล็กที่ถูกกัดกร่อน หลังจากแข็งตัวแล้วเกิดการเกาะติดอย่างแข็งแรงระหว่างอีนาเมลกับเหล็ก

D. G. Moore, J. W. Pitts และ W. N. Harrison⁽¹²⁾ อธิบายว่าขั้นตอนการจุ่มนิเกิล มีการสะสมของนิเกิลบนผิวเหล็กด้วยกระบวนการกัลวานิก ซึ่งปรับปรุงการเกาะติดด้วยวิธีเดียวกัน นิเกิลจากสารละลายสะสมบนพื้นที่ที่เป็นแคโทดบนผิวเหล็ก ทำให้เกิดเซลล์ไฟฟ้าซึ่งเริ่มทำงานทันทีหลังจากอีนาเมลอิเล็กโทรไลต์ละลายและเปียกบนผิวเหล็ก เกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนเป็นร่องบริเวณรอยต่ออย่างรวดเร็ว เมื่อกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้น เกิดการแตกออกของชิ้นส่วนเล็กๆ ของเหล็กบริเวณที่มีนิเกิลสะสมเข้าสู่ชั้นอีนาเมล การแตกออกของชิ้นส่วนเหล่านี้สังเกตได้ชัดเจน บริเวณผิวเหล็กที่ผ่านการจุ่มนิเกิล ทฤษฎีการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมีอธิบายว่าต้องมีจำนวนของนิเกิลที่เหมาะสมสะสมบนเหล็กที่ทำให้การเกาะติดดีที่สุด ถ้ามีปริมาณนิเกิลสะสมน้อย พื้นที่แอโนดบริเวณผิวเหล็กกว้างมาก กระแสแอโนดอ่อนเป็นผลให้เกิดการกัดกร่อนเพียงเล็กน้อย สม่ำเสมอบริเวณผิวเหล็ก ในทางกลับกันถ้ามีปริมาณนิเกิลสะสมมาก พื้นที่แอโนดบริเวณผิวเหล็กน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวทั้งหมด เป็นผลให้กระแสแอโนดสูง ให้ชนิดของการกัดกร่อนเป็นร่องตามต้องการ แต่ร่องที่เกิดขึ้นมีการกระจายกว้างตลอดผิวเหล็ก จึงทำให้การเกาะติดไม่ดีเท่าที่ควรการจุ่มนิเกิลปรับปรุงการเกาะติดให้เกิดขึ้นอย่างมากเมื่อเผาเป็นเวลาดสั้น ผลของนิเกิลต่อการเกาะติดลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเวลาในการเผาเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงผลของนิเกิลต่อการเกาะติดเมื่อเวลาในการเผาที่อุณหภูมิ 1550 ° F เพิ่มขึ้น เหล็กชนิด A เหล็กมีคาร์บอนต่ำ (0.012% C), เหล็กชนิด B มีการเติมธาตุไทเทเนียม (0.05% C, 0.3% Ti)

D. G. Moore และคณะ⁽¹³⁾ อธิบายว่ามีศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันบนผิวเหล็ก เช่น ขอบเกรน เป็นแอโนดเมื่อเทียบกับเกรนด้านใน ทำให้เกิดการสะสมของนิกเกิลบนผิวเหล็ก ปฏิกริยาการสะสมเขียนได้ดังนี้ $Fe + Ni^{++} = Fe^{++} + Ni$

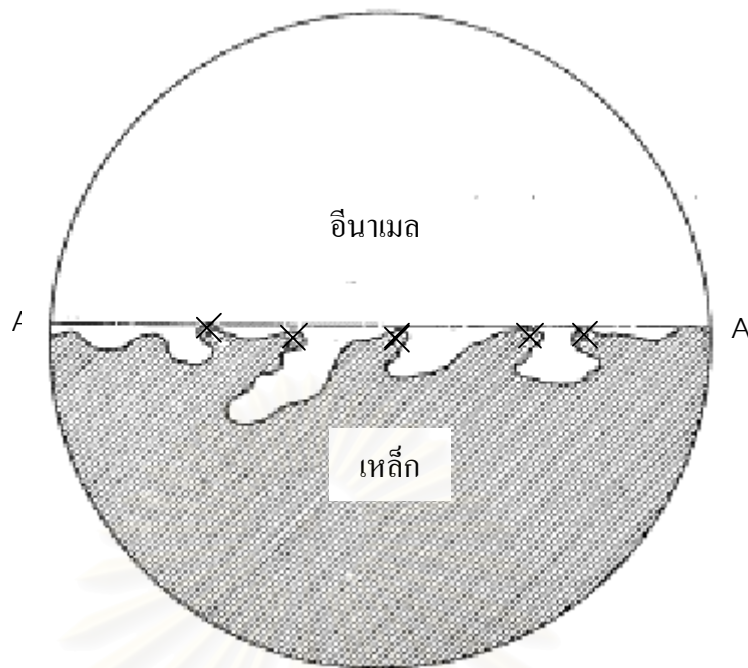


รูปที่ 2.5 แสดงความแตกต่างของการกัดกร่อนของผิวเหล็กโดยอีนามัลชั้นแรก

A) ไม่มีโคบอลต์ B) มีโคบอลต์ เวลาในการเผาเพิ่มขึ้นจากรูปซ้ายไปขวา

จากรูปที่ 2.5 B(1) ชั้นที่โคบอลต์สะสมบนเหล็ก เกิดเซลล์ไฟฟ้าเล็กๆเกิดขึ้น โดยเหล็กเป็นแอโนดและบริเวณที่โคบอลต์สะสมเป็นแคโทด อีก 2 นาทีต่อมาดังรูปที่ 2.5 B(2) เหล็กละลายในอีนามัลหลอมเหลวในรูป Fe^{++} เกิดการไหลของอิเล็กตรอนไปสู่บริเวณที่มีนิกเกิลสะสม เกิดสภาวะรีดักชัน ออกซิเจนที่ละลายในอีนามัลแล้วเปลี่ยนเป็นไอออนของ O^{--} ซึ่งง่ายต่อการถูกรีดิวซ์ด้วยออกไซด์ของโลหะหรือน้ำที่อยู่ในอีนามัล สำหรับการทำงานของเซลล์ไฟฟ้า ต้องการไอออนของ O^{--} ที่แคโทดและมี Fe^{++} ที่แอโนด ดังนั้นถ้าไม่มีออกซิเจนที่แคโทด การไหลของอิเล็กตรอนไม่สามารถไหลอย่างต่อเนื่อง การกัดกร่อนไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ในกรณีที่มีการเผาดำเนินต่อไป 4-6 นาที ดังรูปที่ 2.5 B(3) การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นเหตุให้เหล็กบริเวณผิวแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ ในอีนามัล การสะสมของโคบอลต์บนผิวเหล็กนี้ให้ผลเช่นเดียวกับการสะสมของนิกเกิล

D. G. Richmond และคณะ⁽¹⁴⁾ พบว่าการวัดความหยาบบริเวณรอยต่อของอีนามัลกับเหล็กโดยนับเป็นจำนวนร่องต่อความยาวเป็นเซนติเมตร (Anchor point/cm) มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกระหว่างการเกาะติดของอีนามัลกับเหล็กและความหยาบบริเวณรอยต่อ การวัดความหยาบบริเวณรอยต่อแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงวิธีการวัดความหยาบบริเวณรอยต่อของอีนามลกับเหล็ก
ร่องที่ถูกนับแสดงดังเครื่องหมาย X

การวัดความหยาบด้วยวิธีนี้ ใช้ภาพโครงสร้างจุลภาคที่มีกำลังขยาย 1000 เท่า สุ่มเลือกจากชิ้นงานที่เคลือบอีนามลจำนวน 20 ภาพ นับจำนวนร่อง (Anchor point) ที่ปรากฏในภาพ โดยร่องที่ทำการวัดต้องสัมผัสกับเส้นตรงที่ลากขนานกับรอยต่อตั้งเส้นตรง AA' เท่านั้น แล้วเปลี่ยนค่าที่วัดได้เป็นจำนวนร่องต่อความยาวเป็นเซนติเมตร การวัดด้วยวิธีนี้มีความสัมพันธ์กับการเกาะติดเป็นอย่างดี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (Correlation coefficients) เท่ากับ 0.786

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 เหล็กแผ่นรีดเย็น

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC และเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้ว กว้าง 6 cm ยาว 7 cm หนา 0.7 mm มีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC และเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC ที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้ว (% โดยน้ำหนัก)

ชนิดของเหล็ก	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu
SPCC	0.0423	0.2530	0.0094	0.0118	0.0043	0.0318	0.0070
SPCC ลดคาร์บอน	0.0037	0.2546	0.0097	0.0114	0.0050	0.0344	0.0078

3.1.2 อีนาเมล (Enamel Slip)

อีนาเมลที่ใช้ในเคลือบการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ อีนาเมลที่ใช้เคลือบชั้นแรก (Ground Coat) และอีนาเมลที่ใช้เคลือบชั้นที่สอง (Cover Coat) มีส่วนประกอบดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบของอีนาเมลที่ใช้เคลือบชั้นแรกและชั้นที่สอง

ส่วนผสมของอีนาเมล			
ชั้นแรก	%	ชั้นที่สอง	%
2505	33.33	Wr.3508	100
2506	33.33	Clay 15	6
2563	33.33	K ₂ CO ₃	0.35
Clay 15	7	Bentonite	0.15
Quartz	27	FA 3120	0.03
NaNO ₂	0.15	FA 3130	0.065
Borax	0.5	FA 9150	0.01
Water	45	Quartz	4
		Water	41

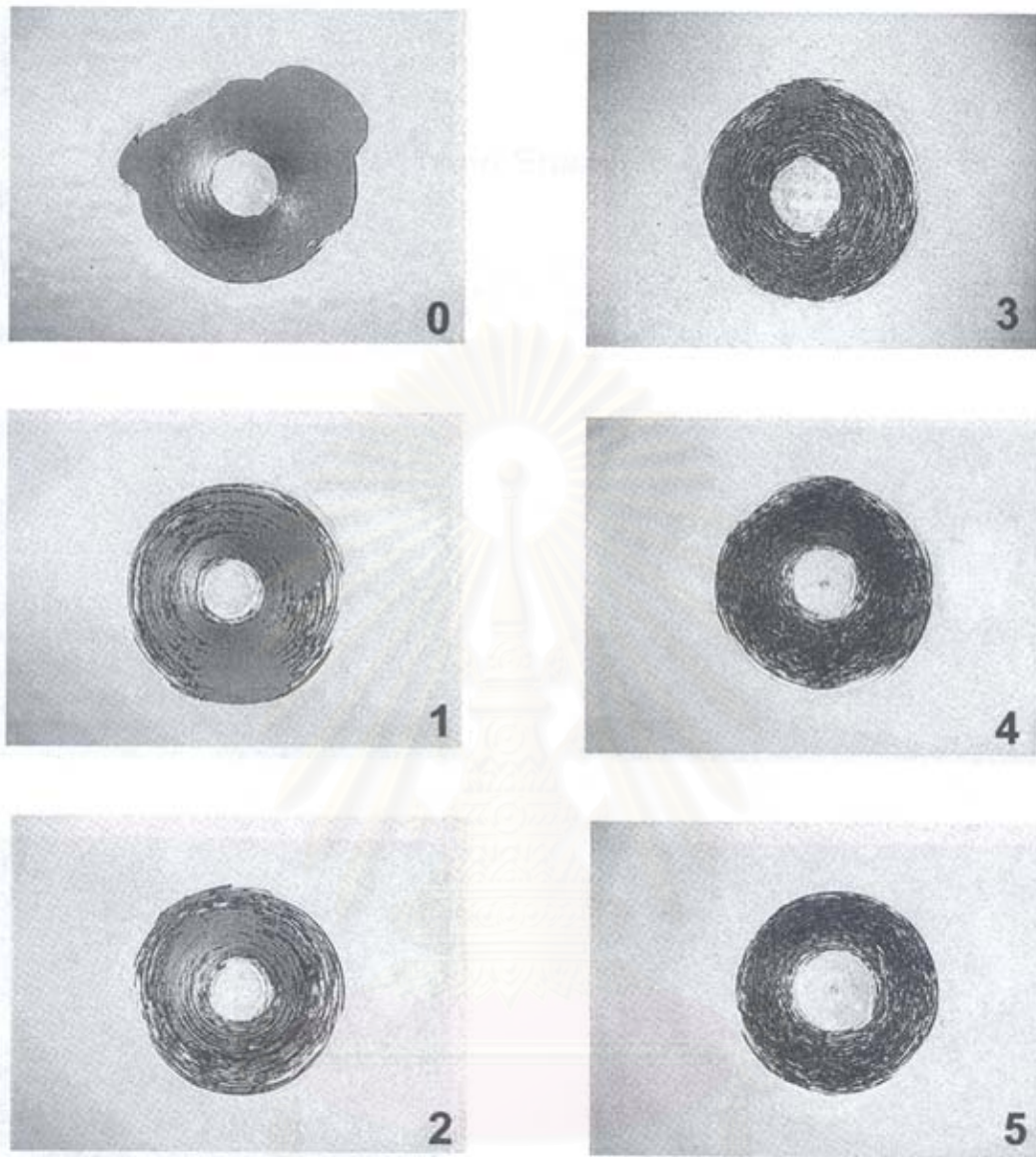
3.2 กระบวนการเคลือบอีนาเมลแบบ 2 ชั้น เคลือบโดยบริษัทอุตสาหกรรม สแตนเลสเคหภัณฑ์

- 3.1.1 ขั้นตอนการกำจัดน้ำมันที่ผิวเหล็กในสารละลาย T714 ความเข้มข้น 6.51% ที่อุณหภูมิ 77 °C เป็นเวลา 15 นาที สองครั้ง
- 3.1.2 ผ่านการล้างด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 77 °C เป็นเวลา 7 นาทีและล้างด้วยน้ำเปล่าที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 นาที
- 3.1.3 ขั้นตอนการกัดกรดด้วยสารละลาย 7% H₂SO₄ แปรผันเวลา 2, 4 และ 6 นาทีแล้วล้างด้วยน้ำเปล่าที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 นาที
- 3.1.4 ผ่านการจุ่มนิกเกิลในสารละลายนิกเกิลซัลเฟต (NiSO₄) pH 3.08 เป็นเวลา 4 และ 8 นาที แล้วล้างด้วยน้ำเปล่าที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 นาที
- 3.1.5 ผ่านอ่างสารละลายที่ทำให้เป็นกลาง (Neutrallization) ที่อุณหภูมิ 63 °C pH 9.51 เป็นเวลา 5 นาที
- 3.1.6 ผ่านการเป่าให้แห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 63 °C เป็นเวลา 15 นาที
- 3.1.7 ทำการเคลือบด้วยวิธีพ่นเคลือบ หนา 100 ไมครอน ในการเคลือบทั้งสองชั้น
- 3.1.8 ทำการเผาเคลือบด้วยอุณหภูมิ 820 °C แปรผันเวลาในการเผา 3 และ 4 นาที ในการเผาเคลือบทั้ง 2 ชั้น

3.3 การทดสอบการเกาะติด

3.3.1 การทดสอบการเกาะติดของชั้นเคลือบด้วยการกระแทก เป็นการทดสอบการเกาะติดด้วยการกระแทก แล้วเปรียบเทียบพื้นผิวบริเวณที่ถูกกระแทกด้วยสายตามาตรฐาน ASTM B916-01 ดังรูปที่ 3.1 โดยจัดระดับของการเกาะติดดังนี้

ระดับการเกาะติด 0	ไม่มีการเกาะติด พบเพียงพื้นผิวเหล็กเท่านั้น อีนาเมลอาจมีการหลุดร่อนออกนอกบริเวณทดสอบ
ระดับการเกาะติด 1	การเกาะติดต่ำ มีอีนาเมลเกาะติดน้อยมาก ต่ำกว่า 10%และพบเฉพาะบริเวณขอบของพื้นที่ทดสอบ
ระดับการเกาะติด 2	การเกาะติดปานกลาง อีนาเมลเกาะติดอย่างน้อย 25-30% ในบริเวณพื้นที่ทดสอบการกระแทก



รูปที่ 3.1 การจัดระดับการเกาะติดของการเคลือบ 2 ชั้น เผา 1 ครั้ง (Two Coat-One Fire) ตามมาตรฐาน ASTM B916-01

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ระดับการเกาะติด 3	การเกาะติดดี อีนาเมลเกาะติดอย่างน้อย 50-60% ในบริเวณพื้นที่ทดสอบการกระแทก
ระดับการเกาะติด 4	การเกาะติดดีมาก อีนาเมลเกาะติดอย่างน้อย 70-80% ในบริเวณพื้นที่ทดสอบการกระแทก
ระดับการเกาะติด 5	การเกาะติดดีเยี่ยม อีนาเมลเกาะติดเกือบทั้งหมดในบริเวณพื้นที่ทดสอบการกระแทก โดยอีนาเมลเกาะติดอย่างน้อย 90%

3.3.2 วิธีการวัดการเกาะติดด้วยวิธีนับร่อง

- 1) ใช้รูปตัวอย่างทั้งหมด 20 รูปที่กำลังขยาย 1000 เท่า เก็บโดยการสุ่มตัวอย่างตลอดรอยต่อของชิ้นงาน เพื่อทำการวัดจำนวนร่องเฉลี่ย
- 2) ลากเส้นตรง AA' ขนานกับรอยต่อของรูป เลือกตำแหน่งที่สัมผัสจำนวนร่องมากที่สุดเป็นเกณฑ์ ดังรูปที่ 3.2
- 3) นับจำนวนร่องที่เส้นตรง AA' ลากสัมผัส ในขณะที่ชิ้นส่วนเล็กๆของเหล็กบริเวณรอยต่อจะไม่นับเนื่องจากไม่ทำให้เกิดการเกาะติดทางกล ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.2

หมายเหตุ การเกาะติดที่ดีของอีนาเมลกับเหล็กที่ทดสอบด้วยวิธีนี้ ต้องมีจำนวนร่องมากกว่า 500 จุดต่อเซนติเมตร⁽¹⁵⁾

3.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

3.4.1 การตัดและการเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค มีขั้นตอนดังนี้

1. ตัดเหล็กแผ่นเคลือบอีนาเมลที่จะนำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อด้วยไบต์ด DISCOTOM ที่มีน้ำหล่อเย็น โดยการตัดตั้งฉากกับผิวเคลือบและต้องไม่มีการแตกออกของผิวเคลือบหลังการตัด เลือกชิ้นงานตัวอย่างบริเวณใจกลางชิ้นงาน
2. นำชิ้นงานใส่ใน castable epoxy พร้อมทั้งติดฉลากระบุชิ้นงานให้ชัดเจน
3. ชัดชิ้นงานบนกระดาษทรายน้ำซิลิกอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 220 320 400 600 800 1000 และ 1200 แล้วล้างน้ำให้สะอาด
4. ชัดชิ้นงานด้วยผ้ากำมะหยี่ ไรยหน้าด้วยผงขัดอะลูมินาแขวนลอยในน้ำ ชัดจนกระทั่งผิวระนาบของชิ้นงานเงาวาวคล้ายกระจก
5. ล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วล้างอีกครั้งด้วยแอลกอฮอล์ เป่าให้แห้งสนิทด้วยเครื่องเป่าลมร้อน

3.4.2 การกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยสารละลายเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

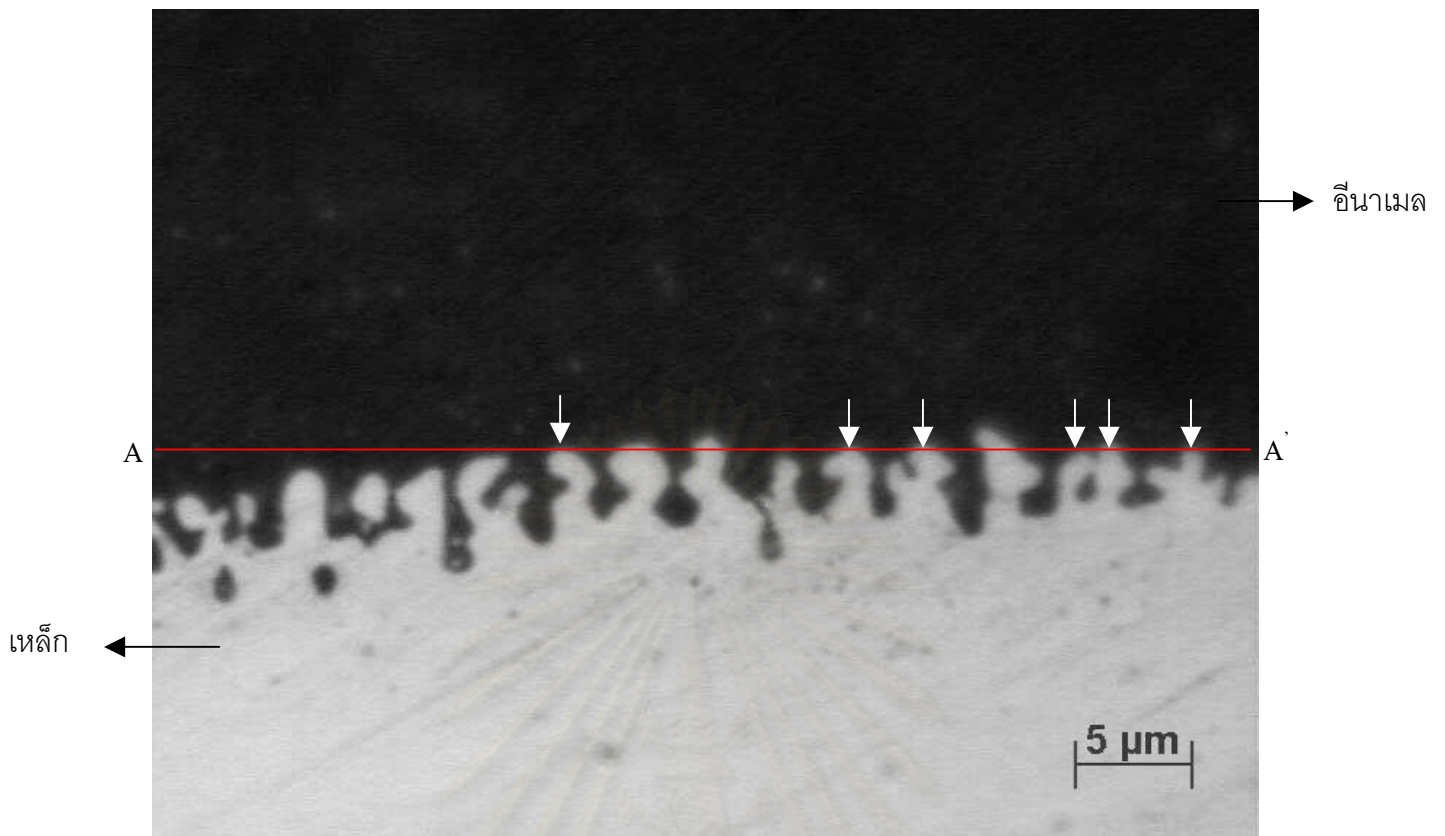
การกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยสารละลายพิครัล (Picral) นาน 30 วินาที เพื่อตรวจสอบโครงสร้างซีเมนต์ไบริเวรรอยต่อถึงความลึก 210 ไมครอนของเหล็ก โดยสารละลายพิครัลได้จากการผสมผงกรดพิคริค 4 กรัมในเอทานอล 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.4.2.1 วิธีการวัดปริมาณซีเมนต์หนาในเหล็กแผ่นรีดเย็น

- 3.4.2.1.1 ใช้รูปตัวอย่างทั้งหมด 60 รูปที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่ความลึกจากรอยต่อ - 70 ไมครอน, 70 - 140 ไมครอน และ 140 - 210 ไมครอน เก็บรูปโดยการซูมตัวอย่างตามความลึกจากผิวที่กำหนด
- 3.4.2.1.2 ทาบตาราง 100 ช่อง ขนาด 120 * 120 ไมครอน บนรูปโครงสร้างจุลภาค นับจำนวนช่องที่พบซีเมนต์

3.4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ชั้นเคลือบ

- 1) นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบอีนาเมลแบบ 2 ชั้น มาตัดตามภาคตัดขวางและอัดเป็นชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ ขัดชิ้นงานตัวอย่างด้วยกระดาษทรายและขัดเงาด้วยผงอะลูมินา
- 2) นำชิ้นงานตัวอย่างมาวิเคราะห์บริเวณรอยต่อด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM) และวิเคราะห์ธาตุชั้นเคลือบด้วยวิธี EDS และวิธี X-RAY Mapping



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการวัดจำนวนร่องบริเวณรอยต่อระหว่างอีนาเมลกับเหล็ก กำลังขยาย

ตัวอย่างการวัด

ความยาวเส้นตรง AA' = 45 μm

จำนวนร่องที่วัดได้จากภาพ = 6 จุดต่อความยาว 45 μm

จำนวนร่องที่วัดได้ต่อเซนติเมตร = 6 * (1 cm/45μm)

= 1333 จุดต่อเซนติเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

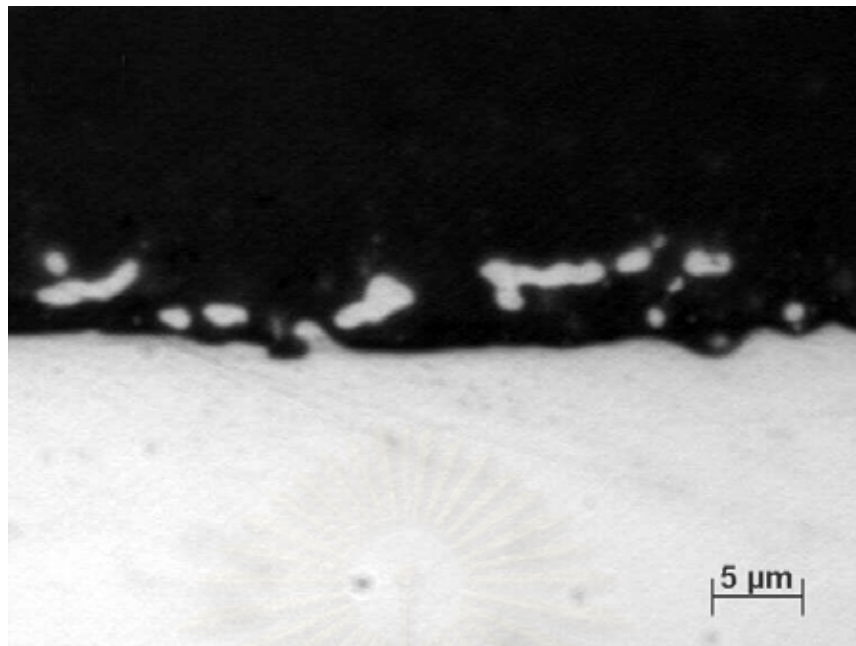
บทที่ 4

ผลการทดลอง

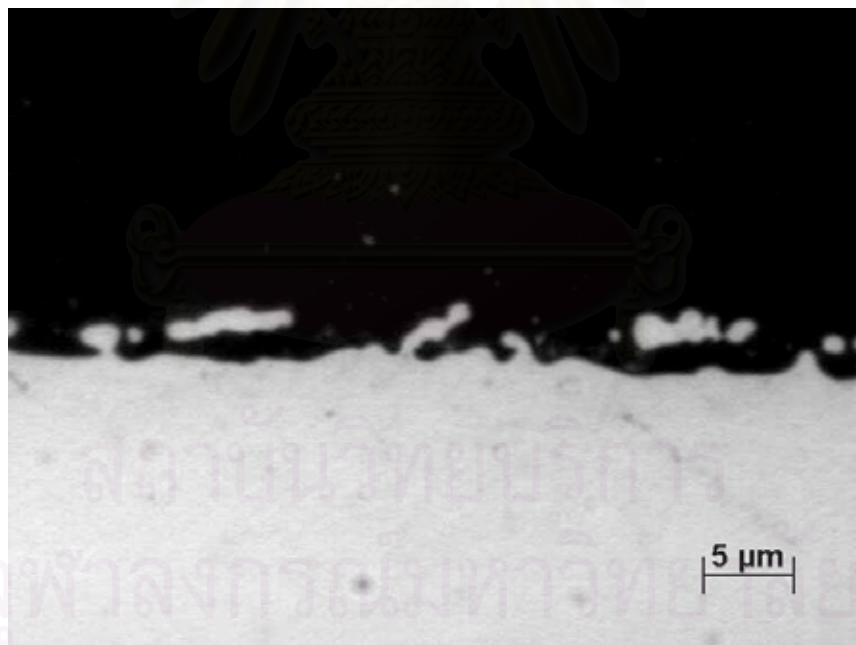
4.1 ความหยาบบริเวณรอยต่อของชั้นเคลือบอีนาเมลกับเหล็กแผ่นที่ผ่านการคาร์บอนแล้ว

โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อหลังการเคลือบอีนาเมลแบบ 2 ชั้น ที่สภาวะก่อนการเคลือบต่างกัน ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการกัดกรด 2, 4 และ 6 นาทีและไม่จุ่มนิกเกิลกับการจุ่มนิกเกิล 4 และ 8 นาที ในการเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 820 °C เป็นเวลา 4 นาที ได้ผลการวัดจำนวนร่องดังตารางที่ 4.1 พบว่า ทุกตัวอย่างที่มีเวลาในการกัดกรด 2, 4 และ 6 นาที โดยไม่ผ่านการจุ่มนิกเกิล พื้นผิวบริเวณรอยต่อมีลักษณะค่อนข้างเรียบตลอดพื้นผิวเหล็ก อีนาเมลหลอมเข้าไปในเนื้อเหล็กได้น้อยมากเนื่องจากไม่เกิดการกัดกร่อนให้เกิดร่องบริเวณผิวเหล็ก พบชิ้นส่วนเล็กๆ ของเหล็กในอีนาเมลเล็กน้อย มีความหนาขนาด 2 ไมครอน อยู่ห่างจากผิวรอยต่อประมาณ 5 ไมครอน ดังรูปที่ 4.1 – 4.3 จากการวัดการเกาะติดด้วยวิธีการนับจำนวนร่อง (Anchor point) บริเวณรอยต่อ พบว่าผลจากการแปรผันเวลาในการกัดกรด ที่เวลาในการกัดกรด 2 , 4 และ 6 นาที ในตัวอย่างที่ไม่จุ่มนิกเกิล ไม่มีผลต่อความหยาบบริเวณผิวเนื่องจากมีความแตกต่างของจำนวนร่องไม่มากนัก และวัดจำนวนร่องได้น้อยเป็นผลให้การเกาะติดต่ำ โดยการกัดกรด 2 นาที วัดได้ 411 จุด/เซนติเมตร กัดกรด 4 นาทีวัดได้ 378 จุด/เซนติเมตร และกัดกรด 6 นาที วัดได้ 311 จุด/เซนติเมตร

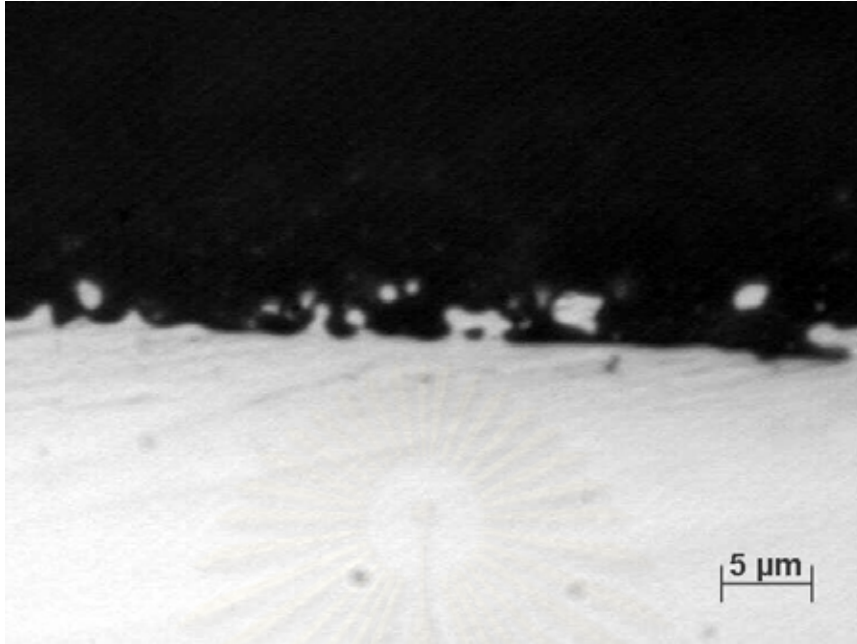
สำหรับตัวอย่างที่จุ่มนิกเกิล 4 นาที พบว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเกิดร่องเป็นจำนวนมากและสม่ำเสมอตลอดผิวเหล็ก แสดงให้เห็นการกัดกร่อนบริเวณผิวที่ดี อีนาเมลหลอมเข้าสู่เนื้อเหล็กได้ดีประมาณ 6 ไมครอน เกิดการเกาะติดทางกลที่ดี ความหยาบของผิวรอยต่อต่างจากตัวอย่างที่ไม่ผ่านการจุ่มนิกเกิลอย่างเห็นได้ชัด โดยตัวอย่างที่ผ่านการกัดกรด 2 นาที จุ่มนิกเกิล 4 นาที พบจำนวนร่องบริเวณผิวเป็นจำนวนมากและมีการแตกออกของผิวเหล็กเป็นชิ้นเล็กๆ ในอีนาเมลน้อยมาก โดยร่องเหล่านี้แสดงลักษณะเป็นร่องที่เชื่อมต่อกันซึ่งทำให้การเกาะติดดี ดังรูป 4.4 วัดจำนวนร่องได้ 700 จุด/เซนติเมตร แสดงถึงการเกาะติดที่ดี ในตัวอย่างที่ผ่านการกัดกรด 4 นาที และจุ่มนิกเกิล 4 นาทีพบลักษณะของร่องเป็นเช่นเดียวกันกับในตัวอย่างที่กัดกรด 2 นาที แต่มีจำนวนร่องและการหลอมของอีนาเมลน้อยกว่า ดังรูปที่ 4.5 วัดจำนวนร่องได้ 522 จุด/เซนติเมตร ซึ่งให้การเกาะติดปานกลาง ในตัวอย่างที่ผ่านการกัดกรด 6 นาทีและจุ่มนิกเกิล 4 นาที พบว่าบริเวณรอยต่อมีการแตกออกของผิวเหล็กเป็นชิ้นเล็กๆจำนวนมาก โดยมีความหนาประมาณ 2 ไมครอน และมีความยาวในตั้งแต่ 3 – 20 ไมครอน โดยชิ้นส่วนเหล่านี้ อยู่ห่างจากรอยต่อประมาณ 5 ไมครอน แต่ในตัวอย่างนี้ก็พบร่องอยู่บ้าง แต่มีจำนวนไม่มากนักและเกิดไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4.6 วัดจำนวนร่องได้ 456 จุด/เซนติเมตร ซึ่งมีการเกาะติดไม่ดี



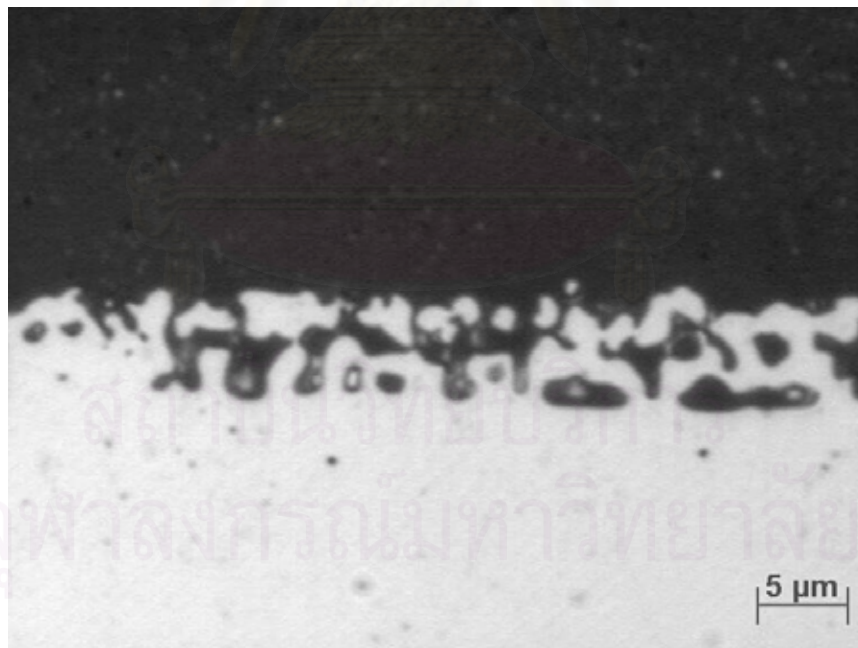
รูปที่ 4.1 ความหนาของบริเวณรอยต่อ เหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล
เวลากัดกรด 2 นาที ไม่จุ่มนิกเกิล เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที จำนวนร่อง 411 จุด/เซนติเมตร



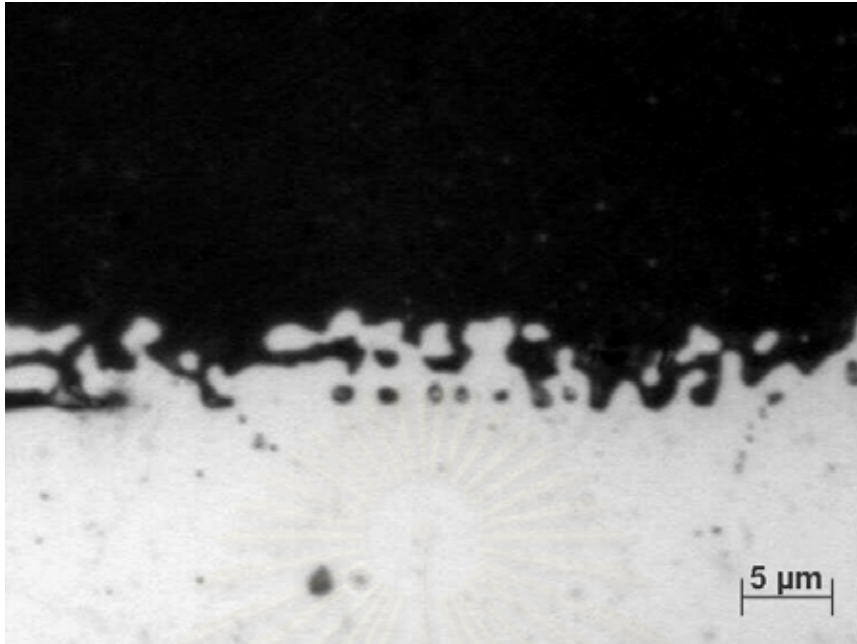
รูปที่ 4.2 ความหนาของบริเวณรอยต่อ เหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล
เวลากัดกรด 4 นาที ไม่จุ่มนิกเกิล เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที จำนวนร่อง 378 จุด/เซนติเมตร



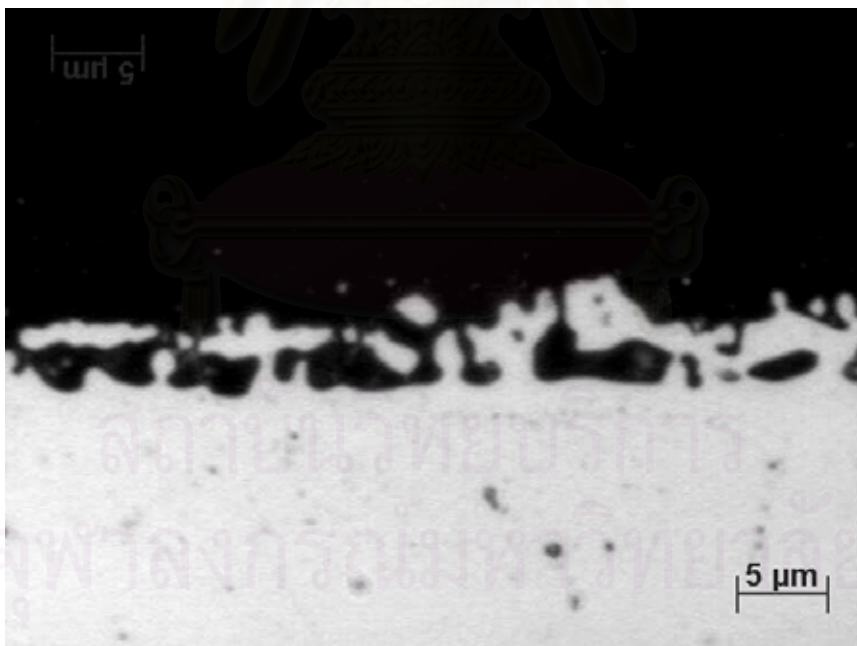
รูปที่ 4.3 ความหนาบริเวณรอยต่อ เหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล
เวลากัดกรด 6 นาที ไม่จุ่มนิกเกิด เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที จำนวนร่อง 311 จุด/เซนติเมตร



รูปที่ 4.4 ความหนาบริเวณรอยต่อ เหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล
เวลากัดกรด 2 นาที จุ่มนิกเกิด 4 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที จำนวนร่อง 700 จุด/เซนติเมตร



รูปที่ 4.5 ความหนาบริเวณรอยต่อ เหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล
เวลากัดกรด 4 นาที จุ่มนิกเกิล 4 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที จำนวนร่อง 522 จุด/เซนติเมตร

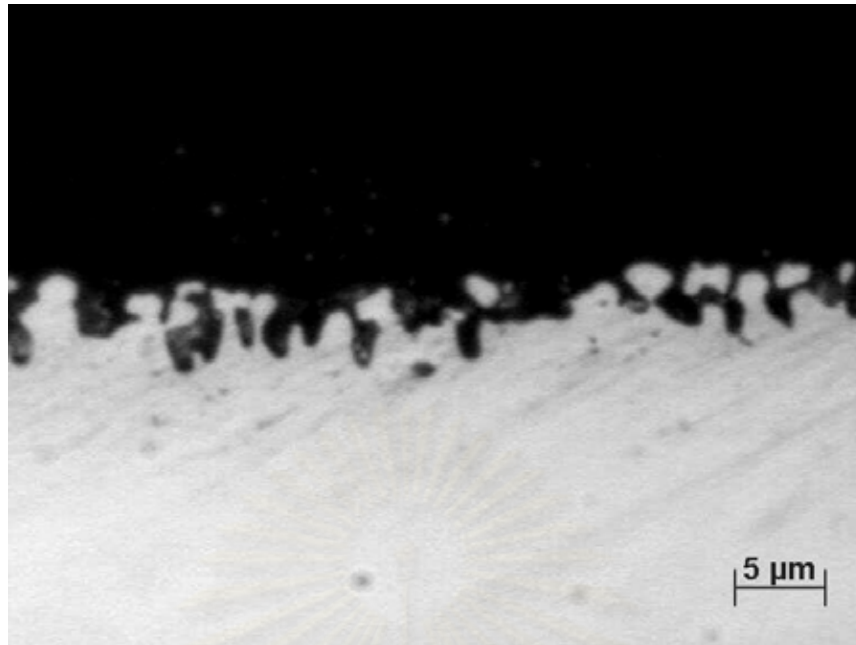


รูปที่ 4.6 ความหนาบริเวณรอยต่อ เหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล
เวลากัดกรด 6 นาที จุ่มนิกเกิล 4 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที จำนวนร่อง 456 จุด/เซนติเมตร

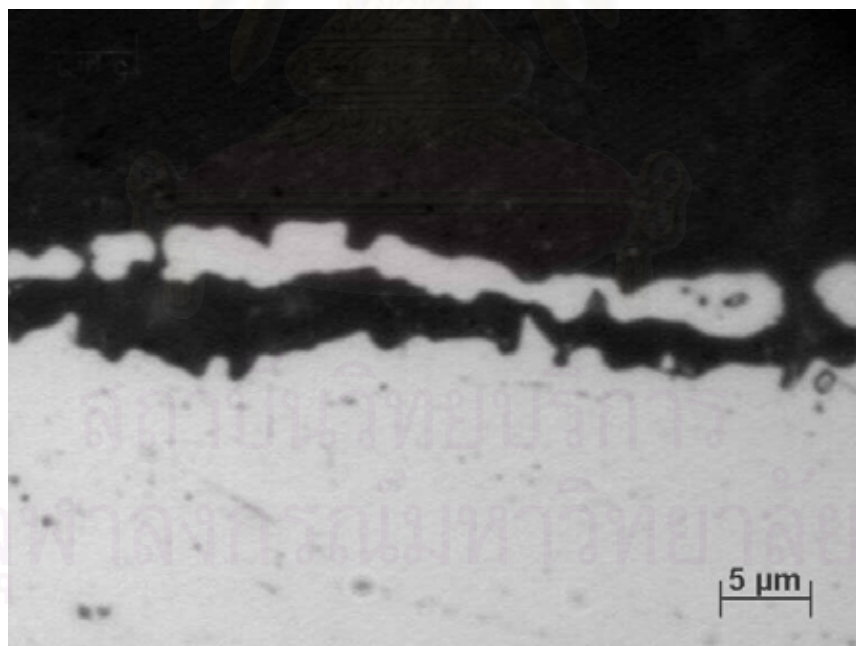
สำหรับตัวอย่างที่มีการจุ่มนิกเกิล 8 นาที พบว่าความหนาบบริเวณรอยต่อของตัวอย่างที่ผ่านการกัดกรด 2 นาที แสดงให้เห็นความหนาบบริเวณผิวที่ดีและอีนาเมลหลอมได้ลึกสม่ำเสมอตลอดผิวเหล็ก มีการแตกออกของผิวเหล็กบริเวณรอยต่อไม่มากนัก ดังรูปที่ 4.7 โดยวัดจำนวนร่องได้ 611 จุด/เซนติเมตร แสดงถึงการเกาะติดที่ดี เมื่อเวลาในการกัดกรดเพิ่มขึ้นเป็น 4 นาที พบว่าบริเวณรอยต่อมีการแตกออกของผิวเหล็กอย่างชัดเจนและมีขนาดใหญ่ มีความหนาตั้งแต่ 2-5 ไมครอนและยาว 3 – 20 ไมครอน มีความหนาที่ผิวไม่มากนัก การเกาะติดไม่ดี ดังรูปที่ 4.8 วัดจำนวนร่องได้ 400 จุด/เซนติเมตร ตัวอย่างที่กัดกรด 6 นาที พบการแตกออกของผิวเหล็กในลักษณะเดียวกัน แต่มีความหนาที่ผิวเหล็กดีกว่า ดังรูปที่ 4.9 วัดจำนวนร่องได้ 477 จุด/เซนติเมตร ตารางที่ 4.1 จำนวนร่องของเหล็กแผ่นรีดเย็นที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้ว ที่สภาวะก่อนการเคลือบต่างกัน เเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที

เวลาที่ใช้กัดกรด (นาที)	เวลาที่ใช้จุ่มนิกเกิล (นาที)	จำนวนร่อง (จุด/เซนติเมตร)
2	0	411
2	4	700
2	8	611
4	0	378
4	4	522
4	8	400
6	0	311
6	4	456
6	8	477

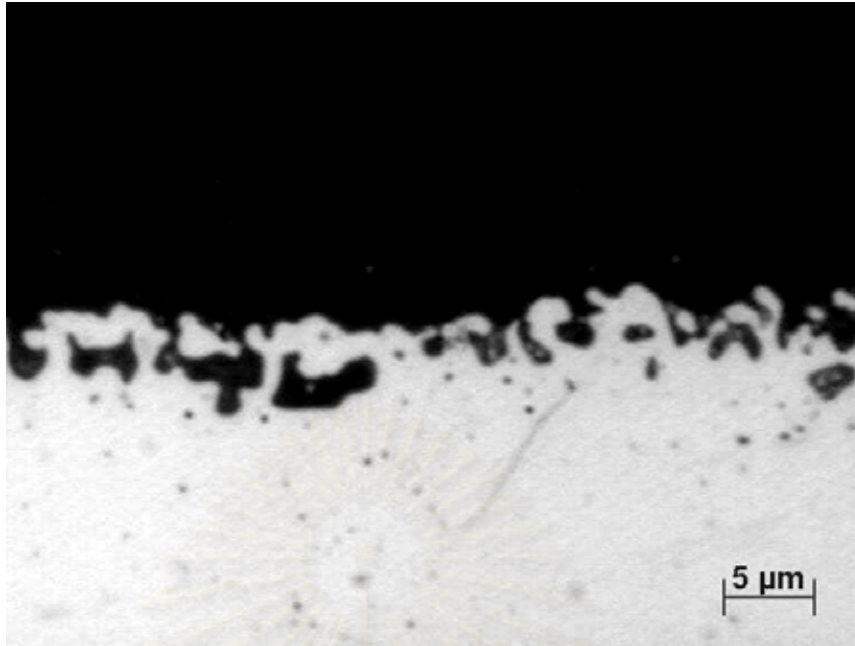
ในตัวอย่างเหล็กแผ่นรีดเย็นเคลือบอีนาเมลแบบ 2 ชั้น เเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 820 °C เป็นเวลา 3 นาที ให้ผลการวัดจำนวนร่องดังตารางที่ 4.2 ตัวอย่างที่ผ่านการกัดกรด 2 นาที เเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 820 °C เป็นเวลา 3 นาที พบว่าการจุ่มนิกเกิล 4 นาที ให้โครงสร้างบริเวณรอยต่อมีความหนาสม่ำเสมอ มีร่องเกิดขึ้นจำนวนมากและมีการแตกออกของผิวเหล็กน้อย แต่อีนาเมลหลอมเข้าสู่เนื้อเหล็กได้ไม่ลึก โดยอีนาเมลหลอมได้ลึกเพียง 2 ไมครอนเท่านั้น ดังรูปที่ 4.10 วัดจำนวนร่องได้ 644 จุด/เซนติเมตร ซึ่งน้อยกว่าการเผาที่ 4 นาทีเล็กน้อย ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการจุ่มนิกเกิล 8 นาที เเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 820 °C เป็นเวลา 3 นาที มีความหนาบบริเวณผิวเหล็กเช่นเดียวกับการจุ่มนิกเกิล 4 นาที อีนาเมลหลอมเข้าสู่เหล็กได้ไม่ลึกเช่นกัน ดังรูป 4.11 วัดจำนวนร่องได้ 500 จุด/เซนติเมตร น้อยกว่าการเผาที่ 4 นาทีและจุ่มนิกเกิล 4 นาที มีการเกาะติดปานกลาง



รูปที่ 4.7 ความหนาบริเวณรอยต่อ เหล็กแผ่นลวดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล
เวลากัดกรด 2 นาที จุ่มนิกเกิล 8 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที จำนวนร่อง 611 จุด/เซนติเมตร



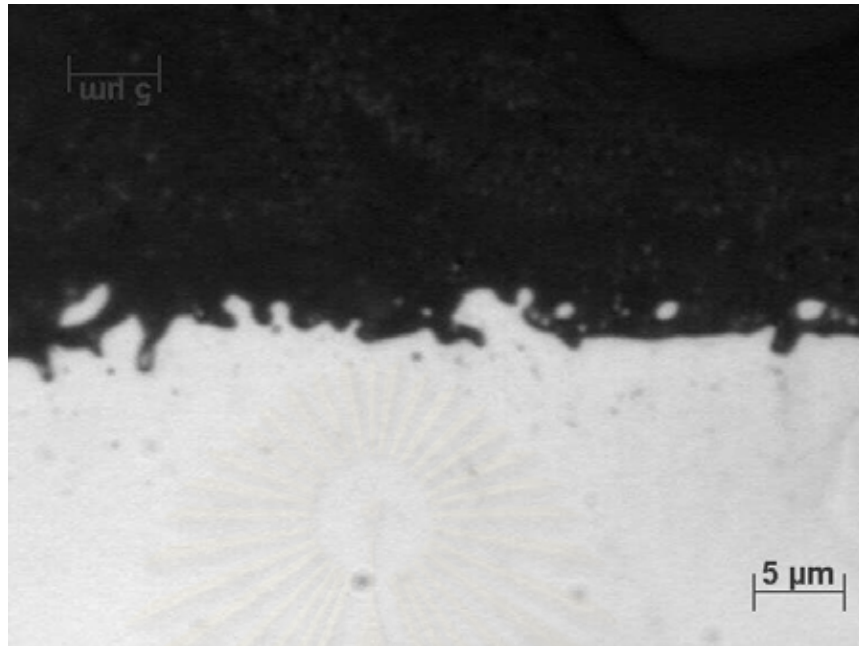
รูปที่ 4.8 ความหนาบริเวณรอยต่อ เหล็กแผ่นลวดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล
เวลากัดกรด 4 นาที จุ่มนิกเกิล 8 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที จำนวนร่อง 400 จุด/เซนติเมตร



รูปที่ 4.9 ความหนาบริเวณรอยต่อ เหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล
เวลากัดกรด 6 นาที จุ่มนิกเกิล 8 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที จำนวนร่อง 411 จุด/เซนติเมตร



รูปที่ 4.10 ความหนาบริเวณรอยต่อ เหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล
เวลากัดกรด 2 นาที จุ่มนิกเกิล 4 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 3 นาที จำนวนร่อง 644 จุด/เซนติเมตร



รูปที่ 4.11. ความหยาบบริเวณรอยต่อ เหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล
เวลากัดกรด 2 นาที จุ่มนิกเกิล 8 นาที เเผาที่อุณหภูมิ 820 °C 3 นาที จำนวนร่อง 500 จุด/เซนติเมตร

ตารางที่ 4.2 การวัดจำนวนร่องของเหล็กแผ่นรีดเย็นที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้ว เปรียบเทียบเวลาที่
ใช้ในการเผาต่างกัน เวลาที่ใช้กัดกรด 2 นาที อุณหภูมิ 820 °C

เวลาที่ใช้จุ่มเคลือบนิกเกิล (นาที)	เวลาที่ใช้ในการเผา (นาที)	จำนวนร่อง (จุด/เซนติเมตร)
4	3	644
4	4	700
8	3	500
8	4	611

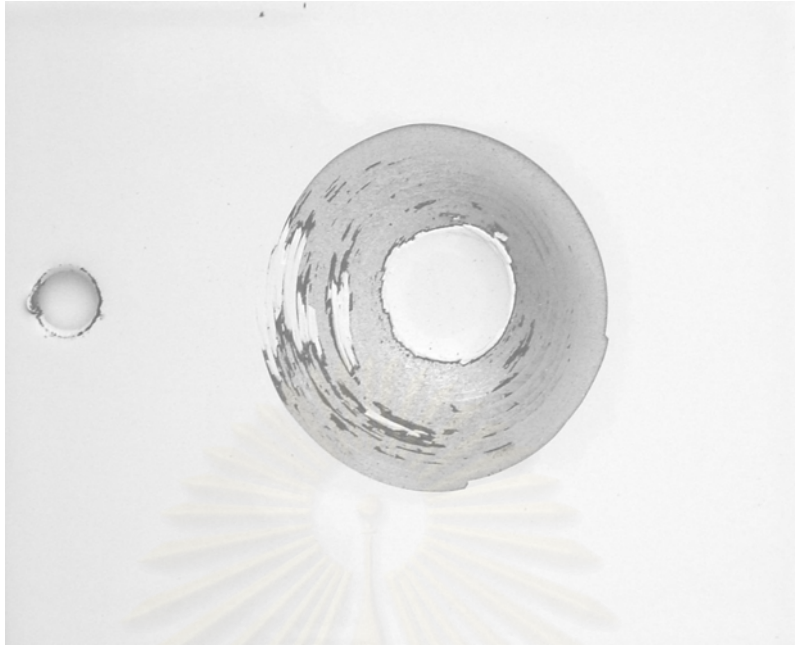
4.2 ความสามารถในการเกาะติดของอีนาเมลกับเหล็กด้วยวิธีทดสอบการกระแทก (Impact Test) ตามมาตรฐาน ASTM B 916-01

จากผลการทดสอบที่ได้ในเหล็กแผ่นลดปริมาณคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมลแบบ 2 ชั้น เมาเคลือบที่อุณหภูมิ 820 °C เป็นเวลา 4 นาที ให้ผลการทดสอบการเกาะติดด้วยการกระแทกดังตารางที่ 4.3 พบว่า ในกลุ่มตัวอย่างที่ไม่ผ่านการจุ่มนิกเกิลก่อนการเคลือบ หลังการทดสอบแรงกระแทกพบการเกาะติดของอีนาเมลกับเหล็กน้อยมาก เนื่องจากพื้นผิวบริเวณที่ถูกกระแทกพบผิวเหล็กซึ่งมีลักษณะเป็นสีเงิน โดยผลการทดสอบการกระแทกนี้เป็นเช่นเดียวกันทุกเวลาในการกักกรด โดยมีข้อแตกต่างเพียงเล็กน้อยในตัวอย่างที่กักกรด 4 นาที พบการเกาะติดของอีนาเมลชั้นแรกเล็กน้อย ในขณะที่การกักกรด 6 นาที นอกจากไม่พบการเกาะติดของอีนาเมลแล้วยังมีการแตกออกของอีนาเมลนอกพื้นที่ทดสอบการกระแทกด้วย ผลการทดสอบการกักกรด 2, 4 และ 6 นาทีแสดงดังรูปที่ 4.12, 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ

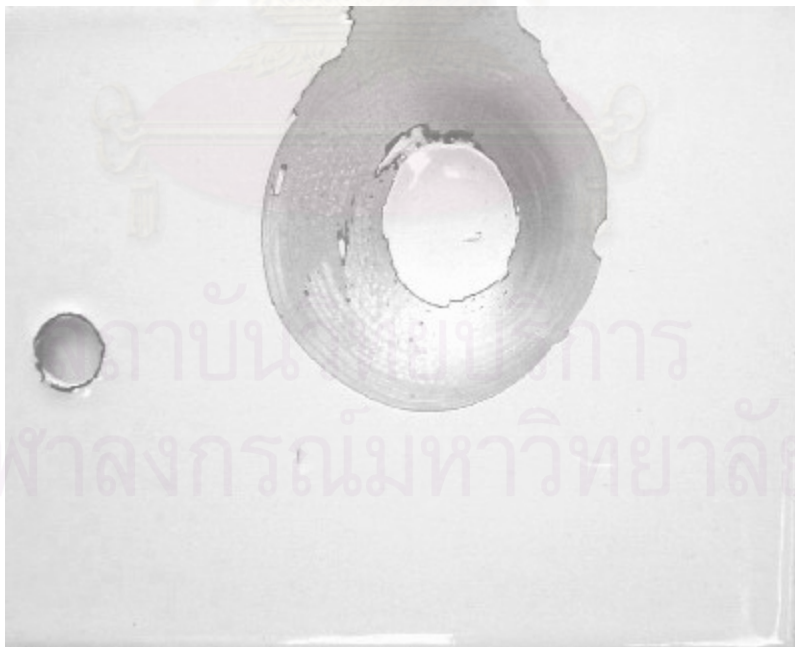
สำหรับการทดสอบในกลุ่มที่จุ่มนิกเกิล 4 นาที พบว่ามีการเกาะติดของอีนาเมลกับเหล็กเพิ่มขึ้นมากเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่จุ่มนิกเกิล หลังการทดสอบการกระแทกในสภาวะการกักกรด 2 และ 4 นาที พื้นผิวหลังทดสอบการกระแทกพบอีนาเมลสีดำเข้มเคลือบบนผิวหลังการทดสอบอย่างสม่ำเสมอ แต่เมื่อเวลาในการกักกรดเพิ่มเป็น 6 นาที พื้นผิวทดสอบหลังการทดสอบแรงกระแทกมีสีดำของอีนาเมลชั้นแรกเกาะติดไม่มากนัก ทำให้มีการเกาะติดไม่ดี นอกจากนี้ทุกตัวอย่างในกลุ่มการเคลือบนิกเกิล 4 นาที ทุกเวลาในการกักกรดไม่มีการแตกออกของผิวเคลือบนอกพื้นที่ทดสอบ ผลการทดสอบสำหรับการกักกรด 2, 4 และ 6 นาทีแสดงในรูปที่ 4.15, 4.16 และ 4.17



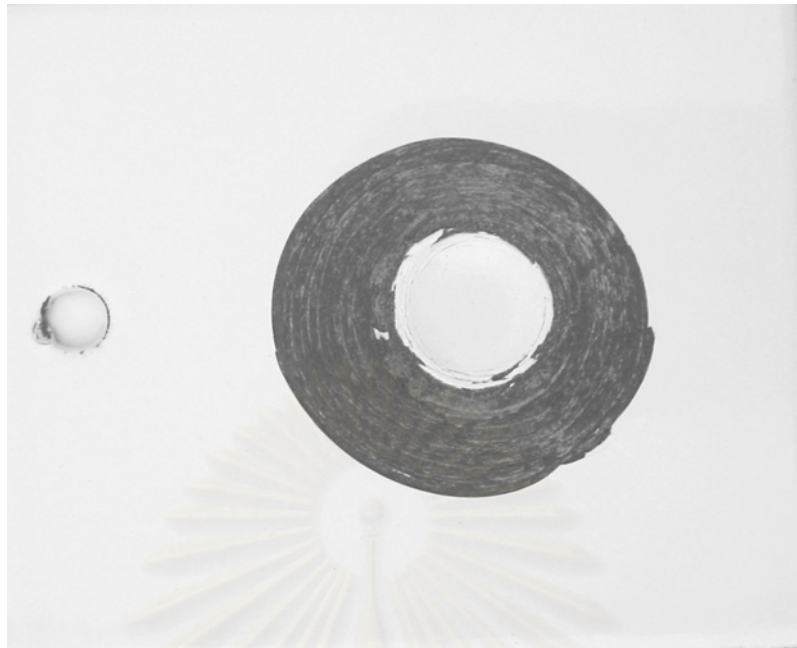
รูปที่ 4.12 พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทกของตัวอย่างเหล็กลดคาร์บอนแล้วกักกรด 2 นาที ไม่จุ่มนิกเกิล เมาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที แสดงการเกาะติดระดับ 0



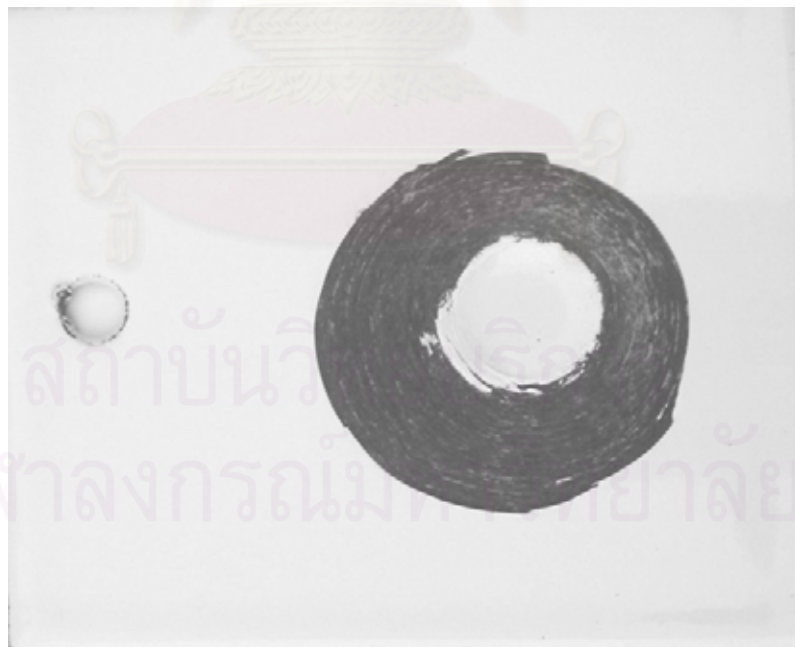
รูปที่ 4.13 พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการระแทกของตัวอย่างเหล็กกล้าคาร์บอนแล้ว
กักกรด 4 นาที ไม่จุ่มนิกเกิล เเผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที แสดงการเกาะติดระดับ 1



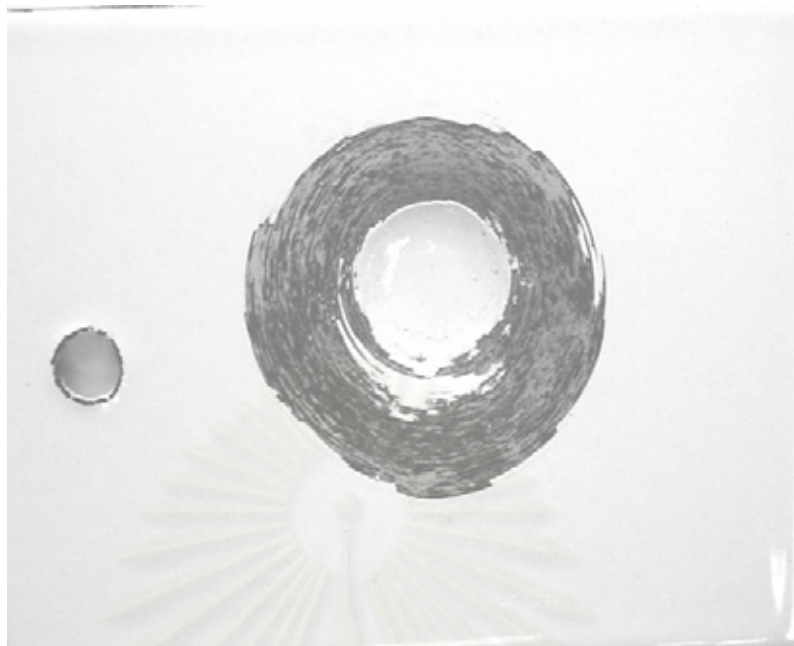
รูปที่ 4.14 พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการระแทกของตัวอย่างเหล็กกล้าคาร์บอนแล้ว
กักกรด 6 นาที ไม่จุ่มนิกเกิล เเผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที แสดงการเกาะติดระดับ 0



รูปที่ 4.15 พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทกของตัวอย่างเหล็กกล้าคาร์บอนแล้ว
กักกรด 2 นาที จุ่มนิกเกิล 4 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที แสดงการเกาะติดระดับ 4



รูปที่ 4.16 พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทกของตัวอย่างเหล็กกล้าคาร์บอนแล้ว
กักกรด 4 นาที จุ่มนิกเกิล 4 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที แสดงการเกาะติดระดับ 4

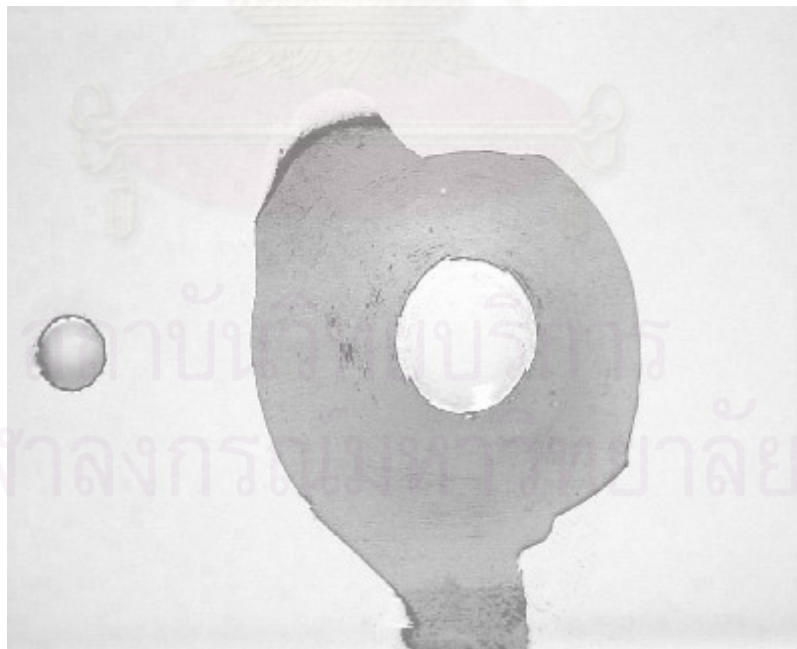


รูปที่ 4.17 พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทกของตัวอย่างเหล็กกล้าคาร์บอนแล้ว
กัดกรด 6 นาที จุ่มนิกเกิล 4 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820°C 4 นาที แสดงการเกาะติดระดับ 2

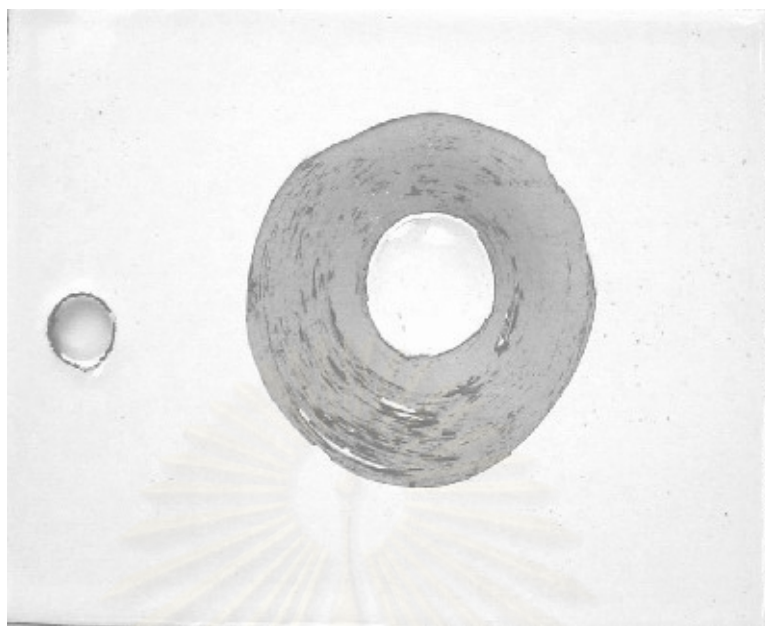
จากการทดสอบในกลุ่มที่จุ่มเคลือบนิกเกิล 8 นาที ที่เวลาการกัดกรด 2 นาที พื้นผิวทดสอบมีสี
ดำของอีนาเมลเกาะติดค่อนข้างดี อีนาเมลสีดำมีการเกาะติดที่ผิวทดสอบเป็นส่วนมาก แต่พบการ
หลุดร่อนของผิวเคลือบนอกบริเวณทดสอบ ทำให้ผลการทดสอบด้วยวิธีนี้สรุปตามมาตรฐานการ
ทดสอบได้ว่าการเกาะติดปานกลาง ในตัวอย่างที่ผ่านการกัดกรด 4 นาที พบว่าพื้นผิวหลังการ
ทดสอบมีลักษณะเป็นสีเทาเข้มและมีการหลุดร่อนออกของผิวเคลือบนอกบริเวณทดสอบใน
ปริมาณมาก ตัวอย่างที่ผ่านการกัดกรด 6 นาที พื้นผิวหลังการทดสอบเป็นสีเทาเข้มเช่นกันแต่ไม่
สม่ำเสมอเหมือนการกัดกรด 4 นาที โดยพบอีนาเมลสีดำเกาะติดเล็กน้อยและไม่มีการหลุดร่อนนอก
บริเวณทดสอบ ผลการทดสอบสำหรับการกัดกรด 2, 4 และ 6 นาที แสดงในรูปที่ 4.18, 4.19 และ
4.20 ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทกของตัวอย่างเหล็กกล้าคาร์บอนแล้ว
กักกรด 2 นาที จุ่มนิกเกิล 8 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที แสดงการเกาะติดระดับ 3



รูปที่ 4.19 พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทกของตัวอย่างเหล็กกล้าคาร์บอนแล้ว
กักกรด 4 นาที จุ่มนิกเกิล 8 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที แสดงการเกาะติดระดับ 0

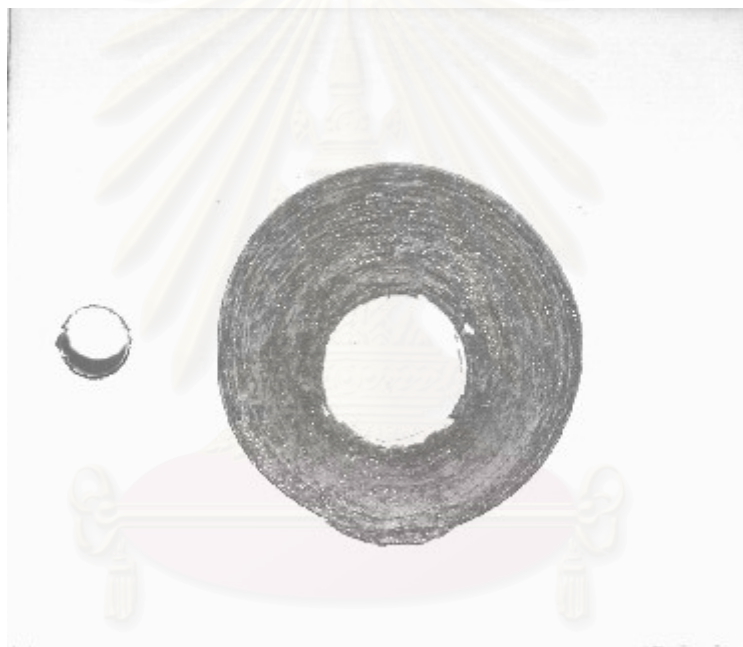


รูปที่ 4.20 พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทกของตัวอย่างเหล็กกล้าคาร์บอนแล้ว
กัดกรด 6 นาที จุ่มนิกเกิล 8 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที แสดงการเกาะติดระดับ 1

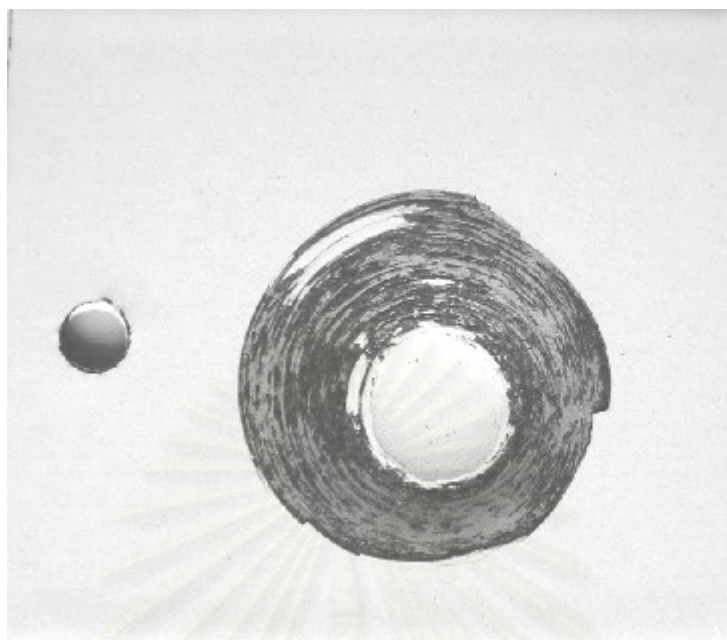
ตารางที่ 4.3 การทดสอบการเกาะติดด้วยการกระแทกของเหล็กแผ่นรีดเย็นที่ผ่านการลดคาร์บอน
แล้ว ที่สภาวะก่อนการเคลือบต่างกัน เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที

เวลาที่ใช้กัดกรด (นาที)	เวลาที่ใช้จุ่มเคลือบนิกเกิล (นาที)	ระดับการเกาะติด
2	0	0
2	4	4
2	8	3
4	0	1
4	4	4
4	8	0
6	0	0
6	4	2
6	8	1

ในตัวอย่างเหล็กแผ่นรีดเย็นเคลือบอีนาเมลแบบ 2 ชั้น ที่อุณหภูมิเผาเคลือบ 820°C เป็นเวลา 3 นาที ให้ผลการทดสอบการเกาะติดด้วยการกระแทกดังตารางที่ 4.4 ในการทดสอบการกระแทกในตัวอย่างที่ผ่านการกัดกรด 2 นาที ที่อุณหภูมิในการเผา 820°C เป็นเวลา 3 นาที พบว่าในการจุ่มนิกเกิล 4 นาที พื้นผิวหลังการทดสอบมีการเกาะติดของอีนาเมลสีดำสม่ำเสมอ แต่มีอีนาเมลสีดำในการเกาะติดน้อยกว่าตัวอย่างที่ทำการเผา 4 นาที ทำให้ผลการทดสอบการเกาะติดน้อยกว่า ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการจุ่มนิกเกิล 8 นาที เผา 3 นาที ที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่าพื้นผิวหลังการทดสอบมีอีนาเมลเกาะติดไม่สม่ำเสมอและน้อยกว่าตัวอย่างที่ทำการเผา 4 นาทีอย่างเห็นได้ชัด ทำให้ผลการทดสอบการเกาะติดน้อยกว่าเช่นกัน ดังรูปที่ 4.21 และ 4.22



รูปที่ 4.21 พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทกของตัวอย่างเหล็กกล้าคาร์บอนแล้วกัดกรด 2 นาที จุ่มนิกเกิล 4 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820°C 3 นาที แสดงการเกาะติดระดับ 3



รูปที่ 4.22 พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทกของตัวอย่างเหล็กกล้าคาร์บอนแล้ว
กัดกรด 2 นาที จุ่มนิกเกิล 8 นาที เเผาที่อุณหภูมิ 820 °C 3 นาที แสดงการเกาะติดระดับ 2

ตารางที่ 4.4 การทดสอบการเกาะติดด้วยการกระแทกของเหล็กแผ่นรีดเย็นที่ผ่านการลดคาร์บอน
แล้ว เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการเผาต่างกัน เวลาที่ใช้กัดกรด 2 นาที อุณหภูมิ 820 °C

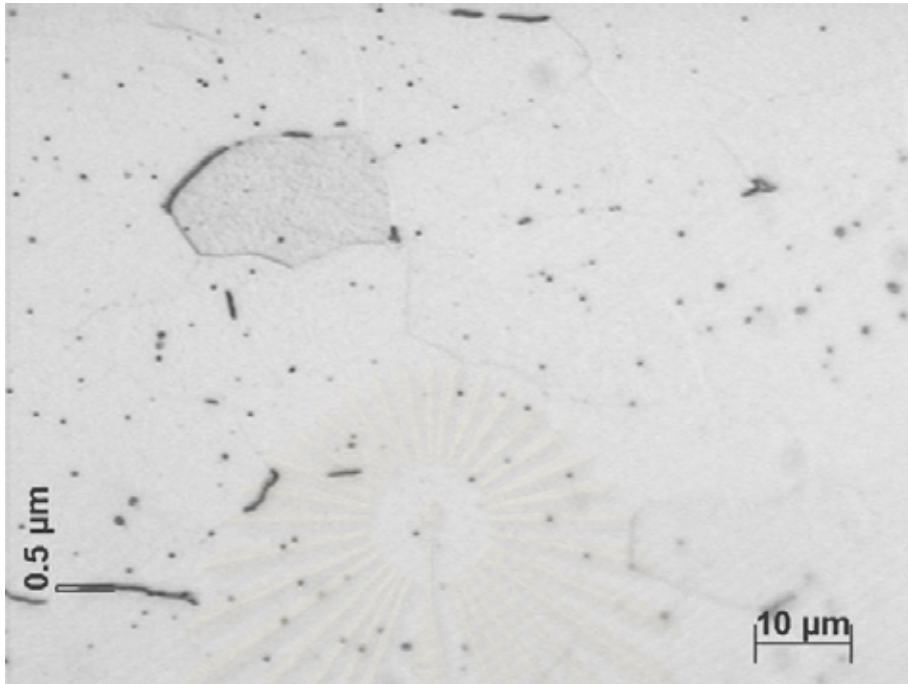
เวลาที่ใช้จุ่มเคลือบนิกเกิล (นาที)	เวลาที่ใช้ในการเผา(นาที)	ระดับการเกาะติด
4	3	3
4	4	4
8	3	2
8	4	3

4.3 ปริมาณซีเมนต์ไต่หนาที่ความลึกจากผิวถึง 210 ไมครอนในชั้นงานของเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC และเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้ว

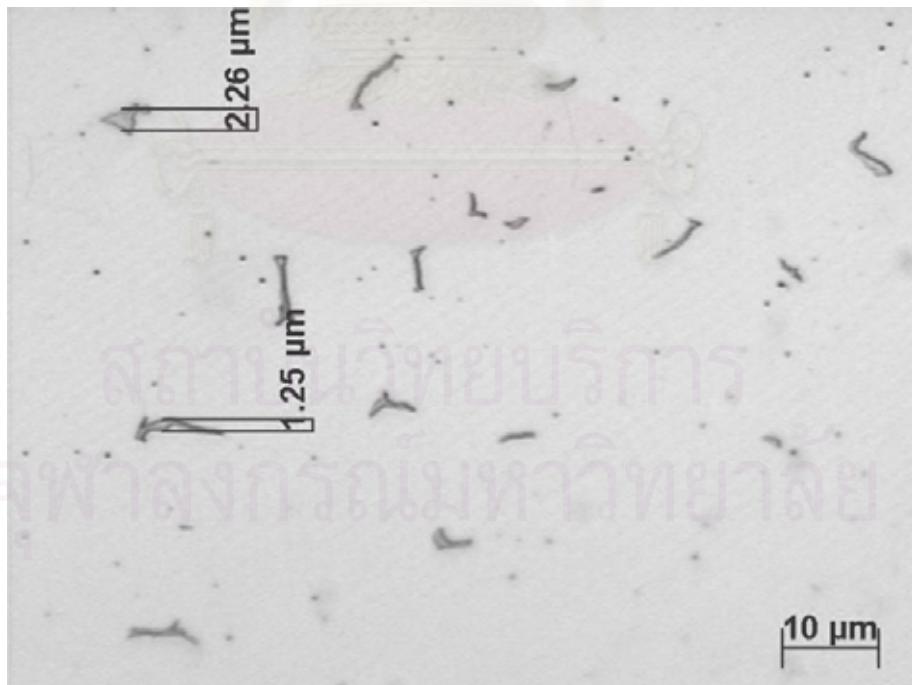
จากโครงสร้างจุลภาคที่พบในเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ที่ความลึกจากผิวถึง 210 ไมครอน พบทั้งซีเมนต์ไต่บาง (Thin film) และซีเมนต์ไต่หนา (Thick film) บริเวณขอบเกรนของเฟอไรต์ โดยลักษณะของซีเมนต์ไต่ทั้งสองแบบแสดงในรูปที่ 4.23 และ 4.24 ซีเมนต์ไต่บางมีลักษณะเป็นเส้นสีดำ มีความหนาน้อยกว่า 1 ไมครอน ในขณะที่ซีเมนต์ไต่หนามีความหนาประมาณ 1-2 ไมครอน ข้อมูลการวัดซีเมนต์ไต่หนาของเหล็กแผ่นรีดเย็นทั้งสองชนิดแสดงดังตาราง 4.5 ในเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC พบซีเมนต์ไต่หนาเป็นจำนวนมากตั้งแต่ระดับความลึกจากผิวถึง 210 ไมครอน โดยจำนวนซีเมนต์ไต่หนาที่วัดได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.25 ในขณะที่ในเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้ว พบว่าซีเมนต์ไต่ส่วนมากเป็นซีเมนต์ไต่บาง โดยพบซีเมนต์ไต่หนามีจำนวนน้อยมากทุกระดับความลึกจากผิวถึง 210 ไมครอน โดยวัดซีเมนต์ไต่หนาได้เฉลี่ย 0.26%

ตารางที่ 4.5 ปริมาณซีเมนต์ไต่หนาในเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC และเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้ว ที่ความลึกจากผิวแตกต่างกัน

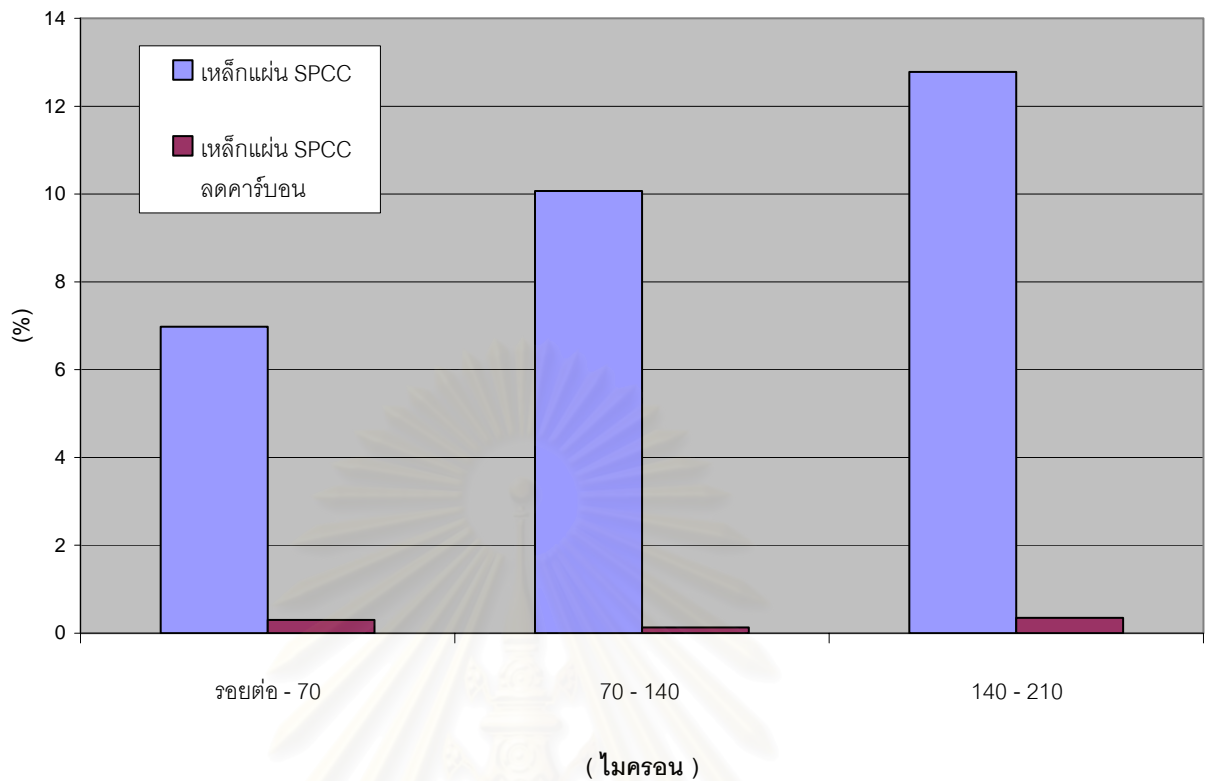
ความลึก (ไมครอน)	ปริมาณซีเมนต์ไต่หนา (%)	
	เหล็กแผ่น SPCC	เหล็กแผ่น SPCC ลดคาร์บอนแล้ว
บริเวณรอยต่อ - 70	6.98	0.30
70 - 140	10.07	0.13
140 - 210	12.78	0.35



รูปที่ 4.23 แสดงลักษณะซีเมนไตต์บาง (Thin film) ในเหล็กแผ่นรีดเย็น



รูปที่ 4.24 แสดงลักษณะซีเมนไตต์หนา (Thick film) ในเหล็กแผ่นรีดเย็น

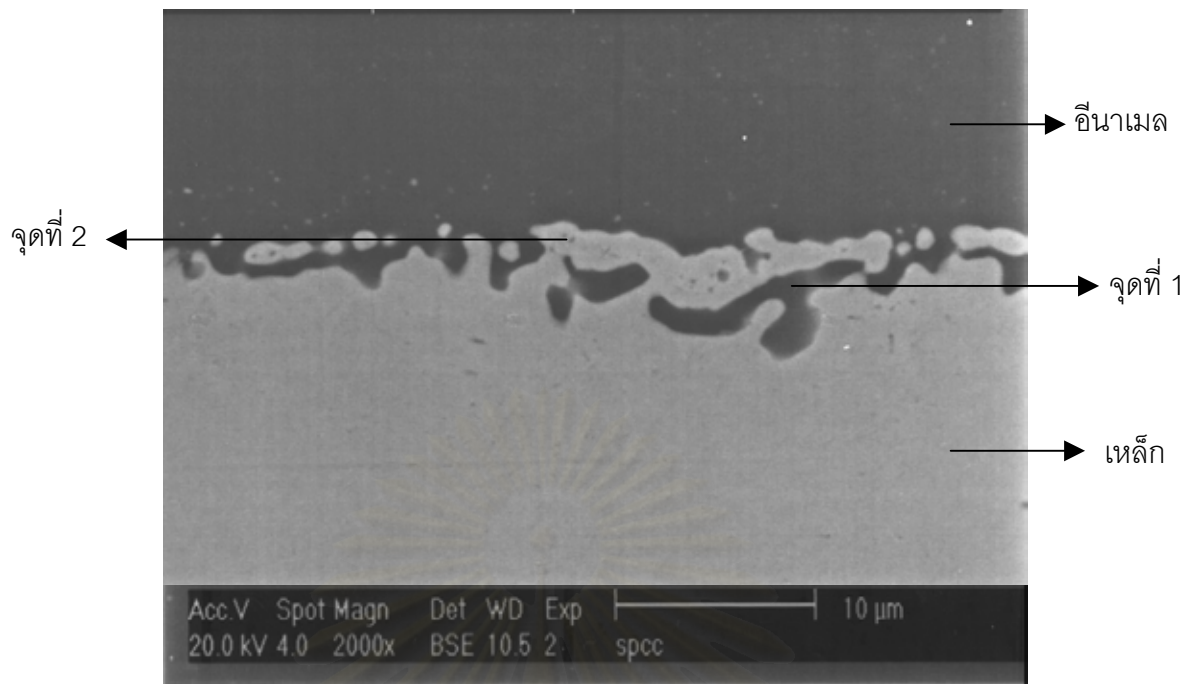


รูปที่ 4.25 ปริมาณซีเมนต์ไครต์หนาที่วัดได้ในเหล็กแผ่นรีดเย็น 2 ชนิด ที่ความลึกจากผิวแตกต่างกัน

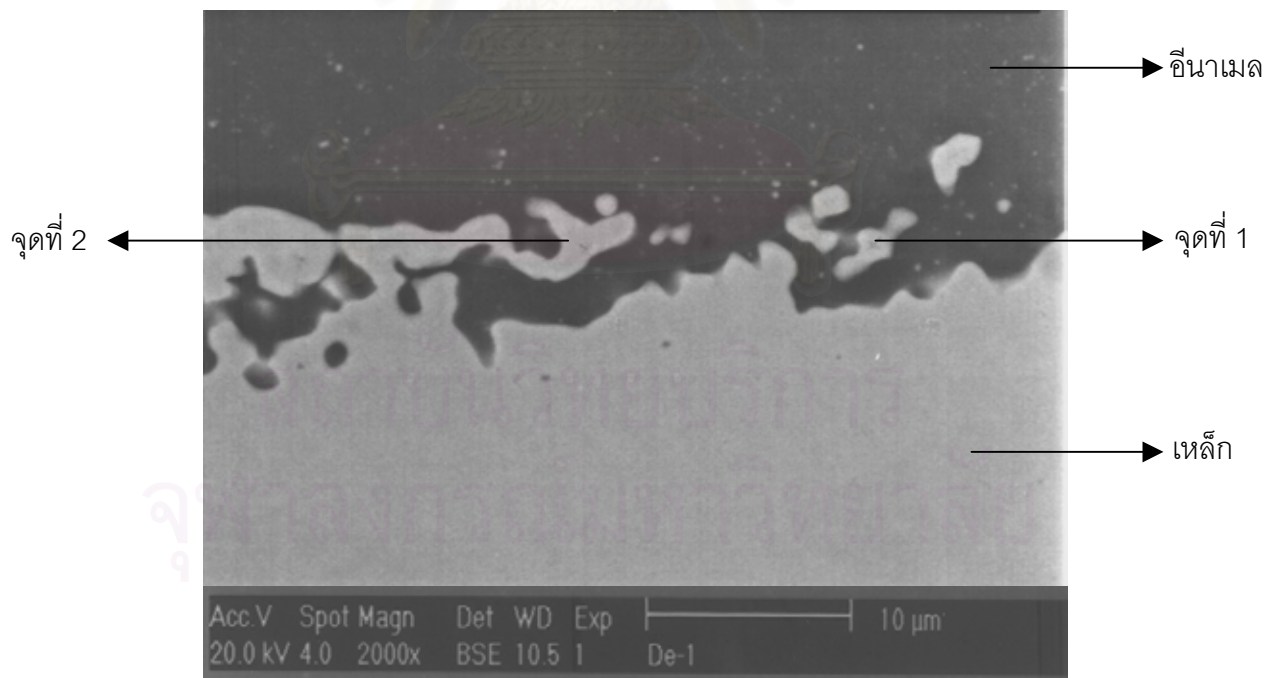
4.4 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีบริเวณรอยต่อของอีนาเมลกับเหล็กด้วยวิธี EDS และ X-RAY mapping

ผลจากการทดสอบด้วยวิธี EDS ในเหล็กแผ่นรีดเย็นทั้งสองชนิดแสดงดังตารางที่ 4.7 ในตัวอย่างเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC เคลือบอีนาเมลแสดงในรูปที่ 4.26 ในจุดที่ 1 ซึ่งมีลักษณะเป็นชั้นส่วนของอีนาเมลสีดำที่หลอมเข้ามาในเนื้อเหล็ก พบว่าประกอบด้วยธาตุ Fe 25.32 wt%, Si 12.75 wt%, O 46.09 wt% และ Ni 0.87 wt% และบริเวณจุดที่ 2 ซึ่งมีลักษณะเป็นเนื้อสีขาวของเหล็กที่อยู่บริเวณรอยต่อของเหล็กกับอีนาเมล พบว่าประกอบด้วยธาตุ Fe 53.63 wt%, Si 5.67 wt%, O 19.68 wt% และ Ni 14.51 wt%

ผลจากการทดสอบด้วยวิธี EDS ในตัวอย่างเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมล โดยวัดบริเวณผิวเหล็กส่วนที่เป็นชั้นส่วนของเหล็กซึ่งแตกออกจากผิวเป็นจุดแรกที่ทำกรวัดและส่วนที่เป็นร่องบริเวณรอยต่อซึ่งเป็นการวัดในจุดที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.27 พบว่าในจุดที่ 1 พบว่าประกอบด้วยธาตุ Fe 73.46 wt%, Si 3.33 wt%, O 14.29 wt% และ Ni 3.55 wt% และบริเวณจุดที่ 2 ประกอบด้วยธาตุ Fe 79.49 wt%, Si 1.79 wt%, O 9.81 wt% และ Ni 4.34 wt%



รูปที่ 4.26 แสดงตำแหน่งการวัดปริมาณธาตุด้วยวิธี EDS ในตัวอย่างเหล็กแผ่น SPCC

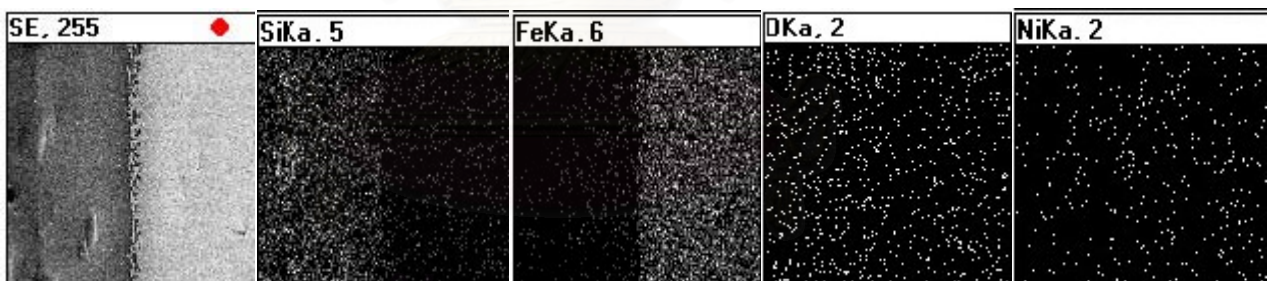


รูปที่ 4.27 แสดงตำแหน่งการวัดปริมาณธาตุด้วยวิธี EDS ในตัวอย่างเหล็กที่ลดคาร์บอนแล้ว

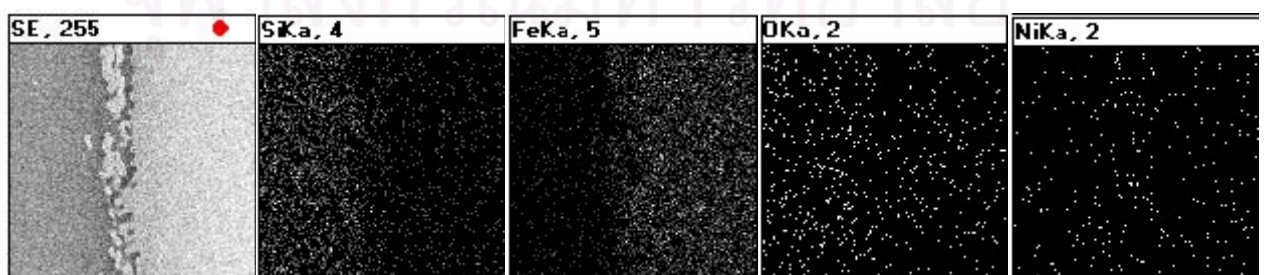
ตารางที่ 4.6 ส่วนผสมทางเคมีส่วนที่เป็นเนื้อเหล็กบริเวณรอยต่อของเหล็กแผ่นรีดเย็นเคลือบ
อีนาเมลด้วยวิธี EDS

ชนิดของเหล็ก	wt%			
	Fe	O	Si	Ni
เหล็กแผ่น SPCC	53.63	19.68	5.67	14.51
เหล็ก SPCC ลดคาร์บอนแล้ว(จุดแรก)	73.46	14.29	3.33	3.55
เหล็ก SPCC ลดคาร์บอนแล้ว(จุดที่สอง)	79.49	9.81	1.79	4.34

ผลการทดสอบด้วยวิธี X-RAY mapping ไม่พบความแตกต่างของธาตุ निकิลและออกซิเจนพบเพียงธาตุเหล็กและซิลิคอนเท่านั้นที่เห็นได้ชัดเจน โดยพบธาตุซิลิคอนในส่วนที่เป็นเนื้ออีนาเมลเท่านั้น เนื่องจากส่วนผสมของอีนาเมลส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิคอนออกไซด์เป็นหลัก ดังรูปที่ 4.28 และ 4.29



รูปที่ 4.28 การทดสอบปริมาณธาตุด้วยวิธี X-RAY Mapping บริเวณรอยต่อของเหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้ว
กำลังขยาย 800 เท่า



รูปที่ 4.29 การทดสอบปริมาณธาตุด้วยวิธี X-RAY Mapping บริเวณรอยต่อของเหล็กแผ่นลดคาร์บอนแล้ว
กำลังขยาย 2000 เท่า

บทที่ 5

อภิปรายผลการทดลอง

5.1 การเกาะติดกับเวลาในการกักกรดและจุ่มนิกเกิลก่อนการเคลือบ

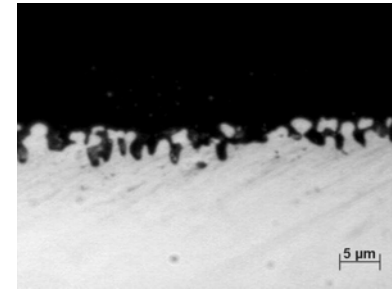
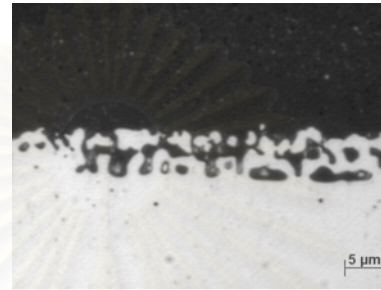
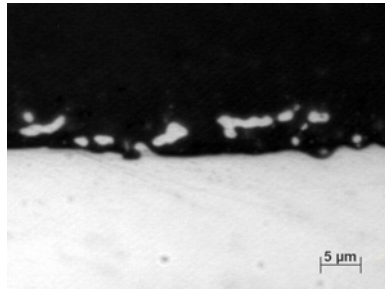
การวัดการเกาะติดของอีนาเมลกับเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้ว ด้วยวิธีการนับจำนวนร่องต่อความยาวเป็นเซนติเมตร ที่อุณหภูมิในการเผา 820 °C เป็นเวลา 4 นาที เพื่อเปรียบเทียบผลเนื่องจากสภาวะก่อนการเคลือบ ให้ลักษณะความหยาบบริเวณรอยต่อแตกต่างกันดังรูปที่ 5.1 ในกลุ่มที่ไม่ผ่านการจุ่มนิกเกิล ผิวเหล็กบริเวณรอยต่อมีลักษณะค่อนข้างเรียบ เนื่องจากเกิดการกัดกร่อนบริเวณผิวเหล็กน้อยมาก จะเห็นได้ว่าแม้จะแปรผันเวลาในการกักกรดตั้งแต่ 2 ถึง 6 นาที ก็ไม่แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความหยาบบริเวณผิวเหล็ก แสดงให้เห็นว่าผลเนื่องจากการกักกรดเพียงอย่างเดียวไม่มีผลต่อการเพิ่มเกาะติดของอีนาเมลกับเหล็กที่ผ่านการลดคาร์บอน เมื่อมีการจุ่มนิกเกิลก่อนการเคลือบ พบการเปลี่ยนแปลงของความหยาบบริเวณผิวเหล็กอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการจุ่มนิกเกิลทำให้เกิดการสะสมของโลหะนิกเกิลบนผิวเหล็ก เมื่อทำการเผาเคลือบ เกิดเซลล์ไฟฟ้าเคมีเนื่องจากความต่างศักย์ระหว่างเหล็กกับนิกเกิลบนผิวเหล็ก โดยผิวเหล็กเป็นแอโนดและผิวเหล็กที่มีนิกเกิลสะสมเป็นแคโทด ทำให้เกิดการกัดกร่อนของผิวเหล็กอย่างมากในขั้นตอนการเผา ช่วยให้เกิดการปรับปรุงการเกาะติดที่ดีขึ้นมากเนื่องจากอีนาเมลหลอมเหลวจะไหลลงไปในร่องที่เกิดจากการกัดกร่อน เมื่ออีนาเมลแข็งตัวทำให้เกิดการเกาะติดทางกล เกิดการเกาะติดอย่างแข็งแรงระหว่างอีนาเมลกับเหล็ก เมื่อจุ่มนิกเกิลนานเกินไป มีการสะสมของโลหะนิกเกิลบนผิวเหล็กเพิ่มขึ้น พบความหยาบที่ผิวเหล็กลดลง เนื่องจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้นน้อยลงเป็นช่วงกว้างและไม่สม่ำเสมอทำให้การกัดกร่อนเกิดได้น้อยลงเป็นผลให้การเกาะติดลดลง ดังนั้นต้องมีเวลาในการจุ่มนิกเกิลที่เหมาะสมจึงจะทำให้การเกาะติดของอีนาเมลกับเหล็กดีที่สุด ในการทดลองนี้ได้แก่การจุ่มนิกเกิล 4 นาที เมื่อเพิ่มเวลาในการกักกรดของกลุ่มที่มีการจุ่มนิกเกิล พบว่าทำให้ความหยาบของผิวเหล็กลดลง เป็นผลให้การเกาะติดของอีนาเมลกับเหล็กลดลงเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าในกลุ่มของตัวอย่างที่ผ่านการจุ่มนิกเกิล การเพิ่มเวลาในการกักกรดทำให้การเกาะติดลดลง ดังผลการเปรียบเทียบจำนวนร่องซึ่งสอดคล้องกับการเกาะติดในรูปที่ 5.2 นอกจากนี้ผลการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีทดสอบการกระแทกให้ผลการทดสอบการเกาะติดสอดคล้องกับการวัดด้วยวิธีการนับจำนวนร่องด้วยเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพื้นผิวหลังการทดสอบเป็นผิวสีเงินของเหล็กซึ่งเป็นลักษณะการเกาะติดที่ต่ำมากในกลุ่มที่ไม่จุ่มนิกเกิลและพื้นผิวสีดำเมื่อมีการจุ่มนิกเกิล แสดงถึงการเกาะติดของอีนาเมลชั้นแรกกับเหล็ก

ไม่ผ่านการจุ่มเคลือบนิกเกิล

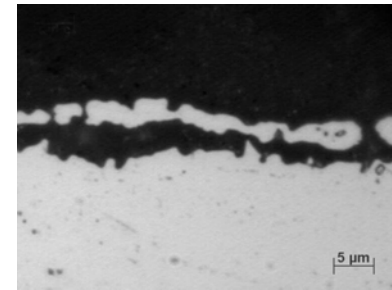
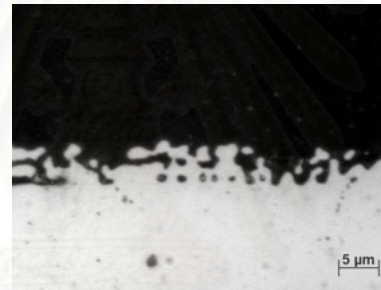
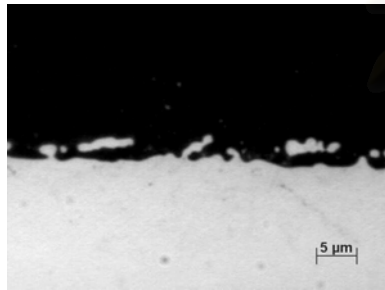
เวลาที่ใช้จุ่มเคลือบนิกเกิล 4 นาที

เวลาที่ใช้จุ่มเคลือบนิกเกิล 8 นาที

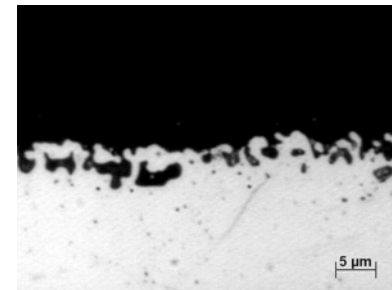
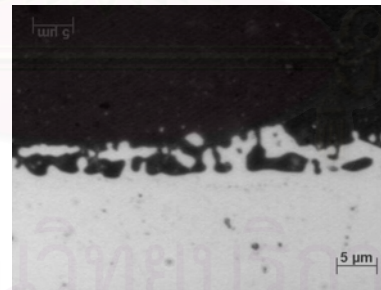
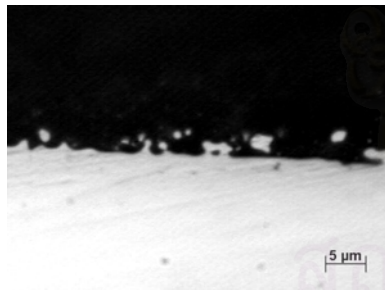
เวลาที่ใช้กัดกรด 2 นาที



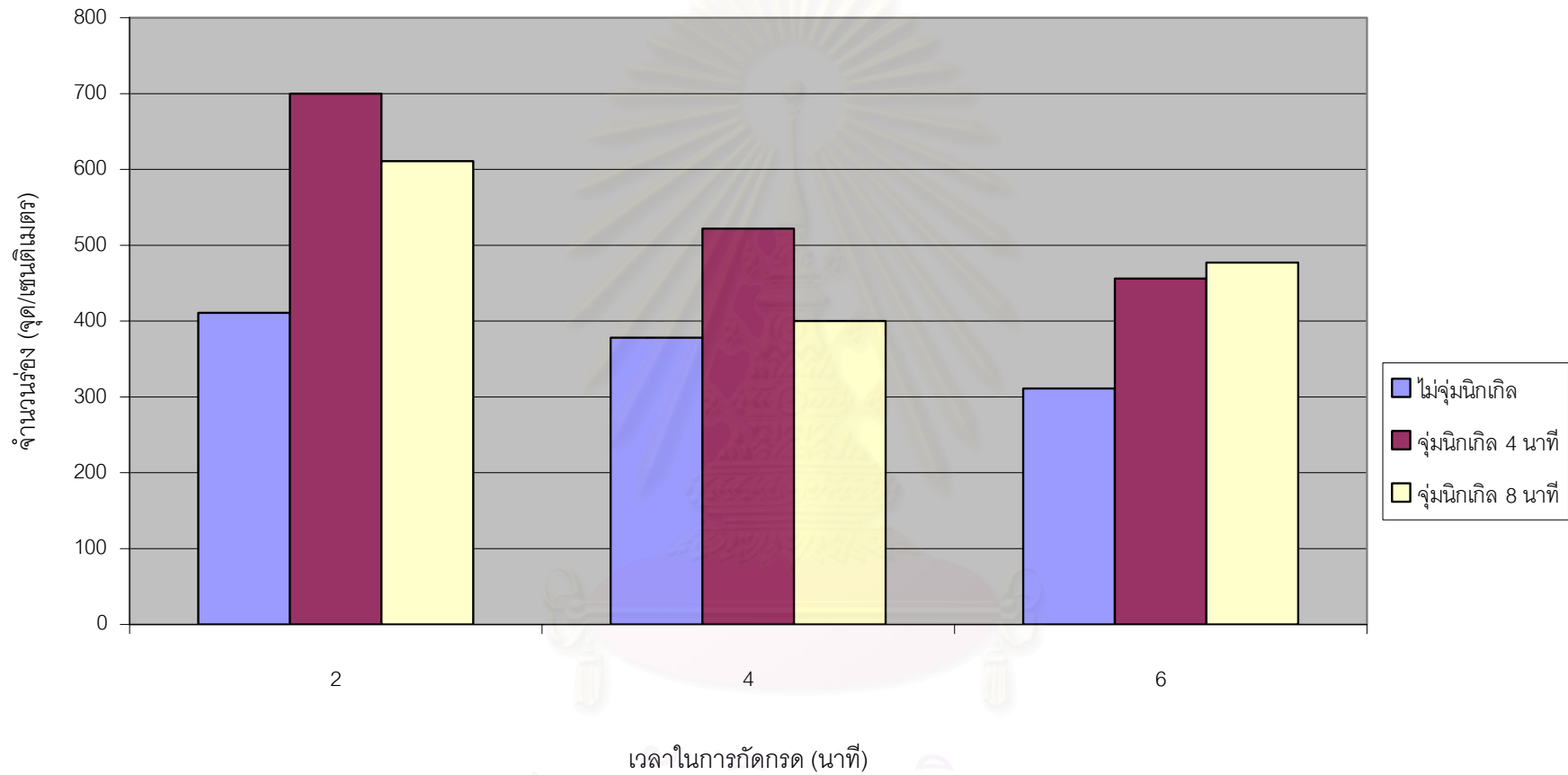
เวลาที่ใช้กัดกรด 4 นาที



เวลาที่ใช้กัดกรด 6 นาที



รูปที่ 5.1 ความหยาบของเหล็กแผ่นรีดเย็นเคลือบอีนาเมลที่ได้จากการกัดกรดและการจุ่มเคลือบนิกเกิล ที่เวลาต่างๆ กัน



รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบจำนวนร่องที่วัดได้ที่เวลาในการกักรวดและจุ่มเคลือบนิกเกิลต่างกัน

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.3 ผลการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทก เปรียบเทียบผลจากการกัดกรดและการจุ่มนิกเกิลที่เวลาต่างๆกัน

ในการเปรียบเทียบเวลาในการเผาเคลือบอีนาเมลที่อุณหภูมิ 820 °C เป็นเวลา 3 และ 4 นาที ที่สภาวะในการกัดกรด 2 นาทีและเวลาในการจุ่มนิกเกิล 4 และ 8 นาที ซึ่งสภาวะนี้ให้ผลการเกาะติดที่ดีที่สุดในการทดลองที่แล้ว พบว่าการวัดการเกาะติดด้วยวิธีการวัดจำนวนร่อง ให้ผลการเกาะติดแตกต่างกันไม่มาก โดยความสามารถในการเกาะติดอยู่ในเกณฑ์ดี จากรูปความหยาบที่ได้ดังรูปที่ 5.4 พบว่าแม้การเผาที่ 3 นาทีและผ่านการจุ่มนิกเกิล 4 นาทีจะแสดงให้เห็นความหยาบของผิวเหล็กที่สม่ำเสมอเช่นเดียวกัน แต่มีการกัดกร่อนเข้าสู่เนื้อเหล็กได้ไม่ลึก แสดงให้เห็นถึงเวลาในการเผาที่ไม่เพียงพอ เป็นผลให้การกัดกร่อนของผิวเหล็กยังเกิดได้ไม่เพียงพอ ทำให้การเกาะติดน้อยกว่าการเผาที่ 4 นาที ในขณะที่ตัวอย่างที่จุ่มนิกเกิล 8 นาที ความหยาบบริเวณผิวเกิดขึ้นได้น้อยกว่าการจุ่มนิกเกิล 4 นาที เนื่องจากเกิดการสะสมของนิกเกิลในปริมาณที่มากกว่า เกิดการกัดกร่อนน้อยกว่าตามหลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ทำให้ความหยาบบริเวณผิวเหล็กน้อยกว่าและผิวเหล็กบางส่วนค่อนข้างเรียบ วัดจำนวนร่องได้น้อยกว่าการจุ่มนิกเกิล 4 นาที แต่เมื่อเวลาในการเผาเพิ่มขึ้นเป็น 4 นาที การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นก็ให้ความลึกมากกว่าเช่นเดียวกัน ซึ่งผลการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีทดสอบการกระแทกก็ให้ผลการทดสอบการเกาะติดสอดคล้องกับการวัดด้วยวิธีการวัดจำนวนร่องด้วยเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 5.5 โดยตัวอย่างที่มีเวลาในการเผาเคลือบ 3 นาที ผิวหลังทดสอบการกระแทกมีการเกาะติดของอีนาเมลชั้นแรกซึ่งมีสีดำเกาะติดน้อยกว่าตัวอย่างที่มีการเผาเคลือบ 4 นาที แสดงให้เห็นถึงการเกาะติดของอีนาเมลกับเหล็กที่น้อยกว่า

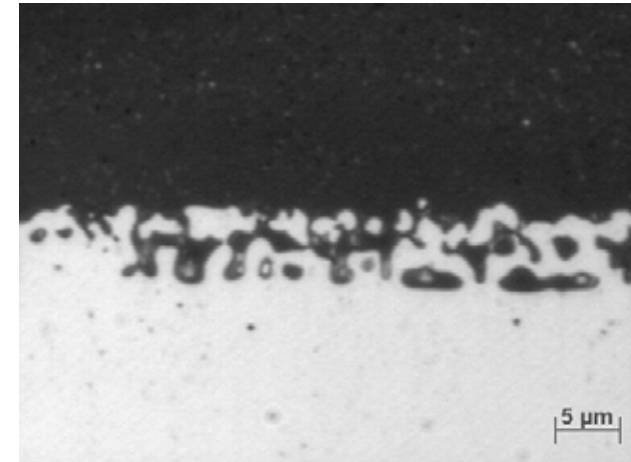
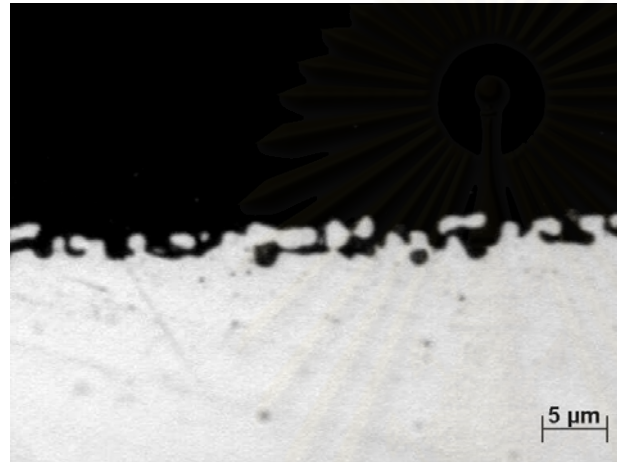
5.2 ผลของซีเมนต์ไตนต่อการเกิดข้อบกพร่องที่ผิวเนื่องจากก๊าซในเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCCเคลือบอีนาเมล

หลังการเคลือบอีนาเมลแบบ 2 ชั้นบนเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC พบข้อบกพร่องที่ผิวเคลือบบริเวณมุมซ้ายบนของชิ้นงานดังรูปที่ 5.6 ซึ่งเป็นลักษณะข้อบกพร่องที่เกิดจากก๊าซ โดยข้อบกพร่องชนิดนี้ไม่พบในการเคลือบอีนาเมลบนเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้วทุกตัวอย่างที่เคลือบอีนาเมล เนื่องจากในโครงสร้างจุลภาคของเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC พบปริมาณซีเมนต์ไตนซึ่งมีความหนา 1-2 ไมครอนเป็นจำนวนมากตลอดความหนาของเหล็ก ในขณะที่พบซีเมนต์ไตน้อยมากในเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้ว พบเพียงซีเมนต์ไตนบางที่มีลักษณะเป็นเส้น หนาประมาณ 0.5 ไมครอนเท่านั้น ดังรูปที่ 5.7 ซึ่งซีเมนต์ไตนขนาด 1 - 2 ไมครอน บริเวณใกล้ผิวของเหล็กเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในระหว่างกระบวนการเผา นอกจากนี้ซีเมนต์ไตนที่จับตัวเกิดขึ้นในเหล็กกล้า ทำให้เกิดช่องว่างที่จะดูดซับก๊าซไฮโดรเจน เป็นสาเหตุให้การเคลือบอีนาเมลบนเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC เกิดข้อบกพร่องที่ผิวเนื่องจากการก๊าซ

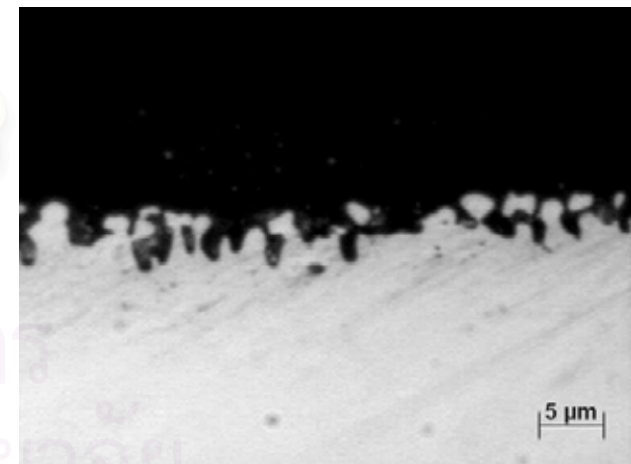
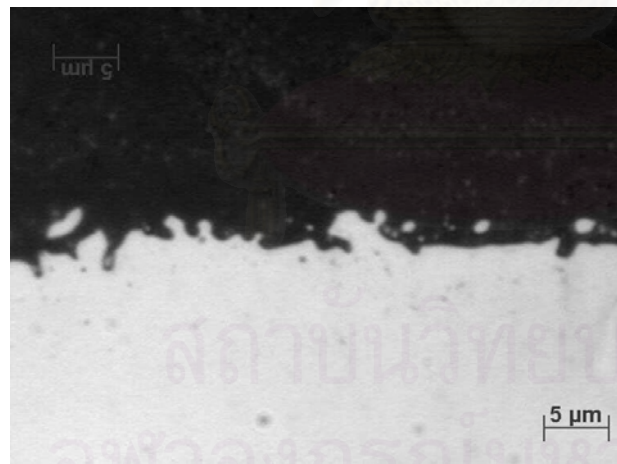
เวลาในการเผา 3 นาที

เวลาในการเผา 4 นาที

จุ่มเคลือบนิกเกิด 4 นาที



จุ่มเคลือบนิกเกิด 8 นาที

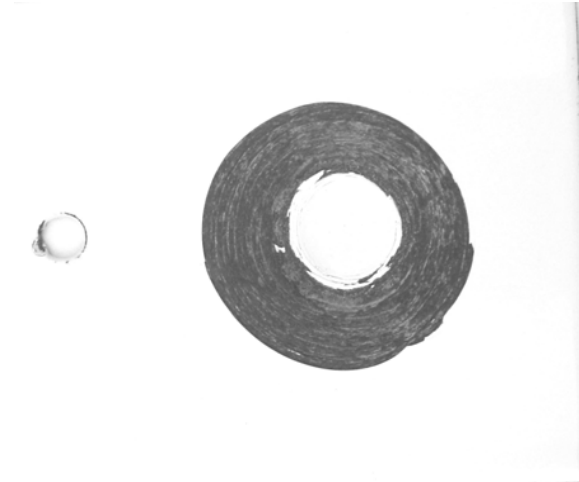
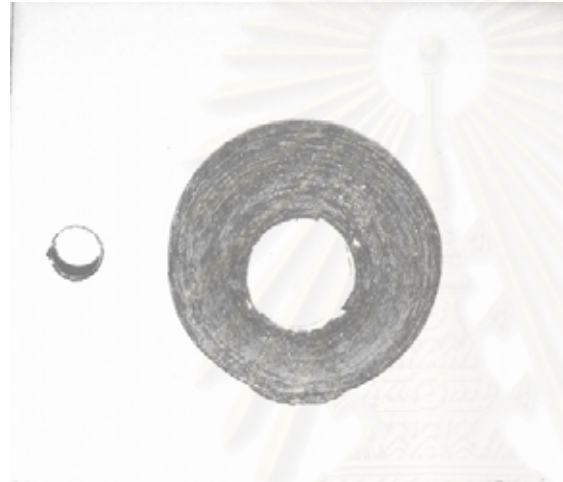


รูปที่ 5.4 ความหยาบที่ได้จากการจุ่มเคลือบนิกเกิด ที่เวลาเผาเคลือบต่างๆ กัน อุณหภูมิในการเผาเคลือบ 820 °C กัดกรด 2 นาที

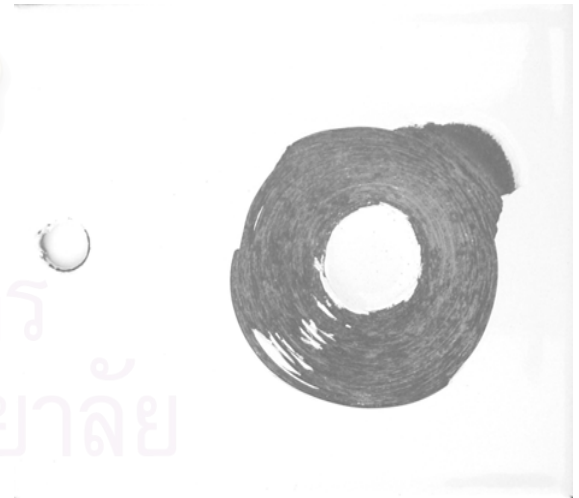
เวลาในการเผา 3 นาที

เวลาในการเผา 4 นาที

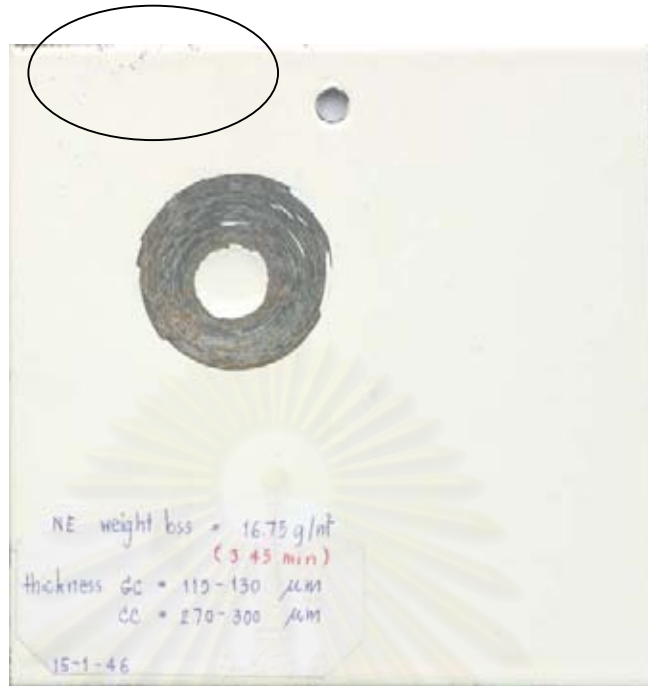
จุ่มเคลือบนิกเกิด 4 นาที



จุ่มเคลือบนิกเกิด 8 นาที



รูปที่ 5.5 ผลการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการกระแทก เปรียบเทียบผลจากเวลาในการเผาและการจุ่มเคลือบนิกเกิด ที่เวลาต่างๆ กัน

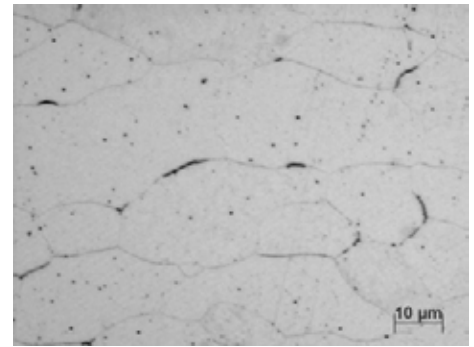
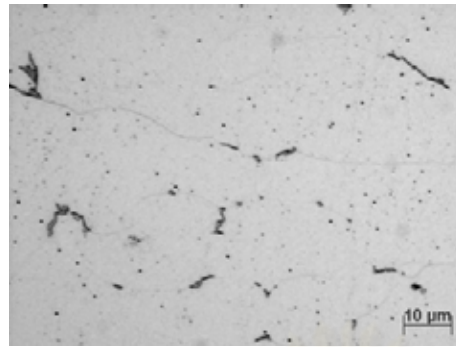


รูปที่ 5.6 พื้นผิวหลังการทดสอบการเกาะติดด้วยวิธี การกระแทก ของตัวอย่างเหล็กกล้าคาร์บอนแล้ว
กัดกรด 4 นาที จุ่มนิกเกิล 8 นาที เผาที่อุณหภูมิ 820 °C 4 นาที พบข้อบกพร่องที่ผิวที่เกิดจากก๊าซ

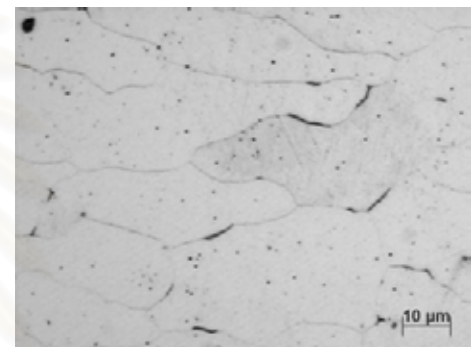
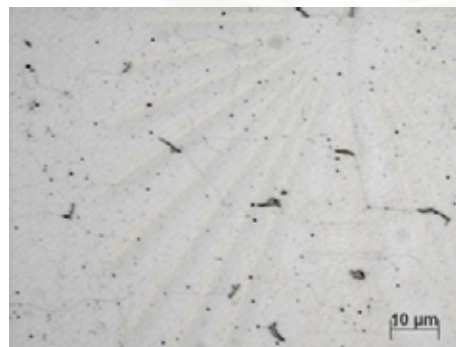
เหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC

เหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ลดคาร์บอนแล้ว

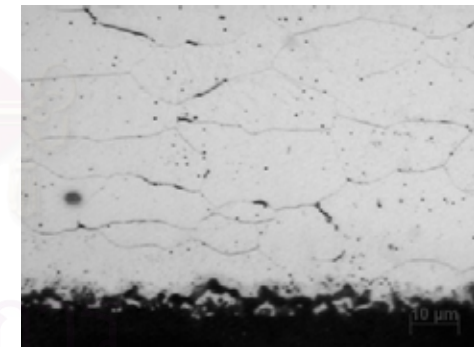
ช่วง 140-210 ไมครอน



ช่วง 70-140 ไมครอน



รอยต่อชิ้นงาน - 70 ไมครอน



รูปที่ 5.7 โครงสร้างจุลภาคเปรียบเทียบปริมาณซีเมนต์ไต้ที่ความลึกจากผิวต่างๆ กัน

5.3 ส่วนผสมทางเคมีบริเวณรอยต่อของอีนาเมลกับเหล็ก

จากการวัดส่วนผสมทางเคมีบริเวณรอยต่อด้วยวิธี EDS บริเวณส่วนที่เป็นอีนาเมลสีดำ พบการละลายของเหล็กในอีนาเมล ซึ่งการละลายของเหล็กในอีนาเมลจะละลายในรูปของเหล็กออกไซด์ โดยพบส่วนผสมของธาตุเหล็กและออกซิเจนในปริมาณมาก พบเหล็ก Fe 25.32 wt%, O 46.09 wt% โดยส่วนหนึ่งเป็นซิลิกา (SiO_2) ซึ่งเป็นส่วนผสมหลักของอีนาเมล โดยเหล็กออกไซด์เกิดขึ้นในระหว่างการเผา ผิวเหล็กถูกออกซิไดซ์ทำให้มีความสามารถในการเปียกด้วยอีนาเมล หลอมเหลวได้ดี เหล็กออกไซด์ต้องถูกละลายในอีนาเมลบางส่วนเพื่อทำให้เกิดการเกาะติด ซึ่งการละลายของเหล็กออกไซด์ในอีนาเมลนี้ช่วยส่งเสริมให้เกิดการเกาะติดระหว่างอีนาเมลกับเหล็ก เนื่องจากพันธะเคมี ในการวัดส่วนที่เป็นผิวเหล็กซึ่งเป็นผิวสีขาวบริเวณรอยต่อ พบว่าประกอบด้วยส่วนประกอบของธาตุเหล็กและออกซิเจนเป็นหลัก แสดงให้เห็นว่าบริเวณผิวเหล็กถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ โดยพบธาตุซิลิกอนและนิกเกิลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

6.1 เหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้ว สามารถเคลือบอีนาเมลด้วยกระบวนการเคลือบแบบ 2 ชั้น ที่อุณหภูมิในการเผาเคลือบ 820°C เป็นเวลา 4 นาที โดยมีขั้นตอนก่อนการเคลือบได้แก่ เวลาในการกักรวด 2 นาทีและเวลาในการจุ่มนิกเกิล 4 นาที ให้การเกาะติดของอีนาเมลกับเหล็กดีที่สุดในการทดสอบ โดยวัดจำนวนร่องได้ 700 จุดต่อเซนติเมตรและระดับการเกาะติดในการทดสอบการกระแทกในระดับที่ 4

6.2 เวลาในการกักรวดไม่มีผลต่อการเปลี่ยนความหยาบของผิวเหล็กในกลุ่มตัวอย่างที่ไม่จุ่มนิกเกิลและทำให้ความหยาบของผิวเหล็กลดลงเมื่อเวลาในการกักรวดเพิ่มขึ้นในกลุ่มตัวอย่างที่ผ่านการจุ่มนิกเกิลซึ่งเป็นผลให้การเกาะติดของอีนาเมลกับเหล็กลดลง

6.3 การจุ่มนิกเกิลมีอิทธิพลต่อการปรับปรุงการเกาะติดของอีนาเมลกับเหล็ก การจุ่มนิกเกิลในเวลาที่เหมาะสมจะทำให้ผิวเหล็กเกิดการกักร่อนเป็นร่องสม่ำเสมอตลอดผิวเหล็ก เมื่ออีนาเมลหลอมเหลวไหลลงไปร่องของเหล็ก หลังจากการเย็นตัวทำให้อีนาเมลแข็งตัวยึดเกาะกับเหล็ก เวลาในการจุ่มนิกเกิลที่เหมาะสมในการทดลองนี้คือ 4 นาที

6.4 เวลาในการเผาเคลือบที่ 820°C มีอิทธิพลต่อการปรับปรุงการเกาะติดของอีนาเมลกับเหล็ก เมื่อเวลาในการเผาเหมาะสมจะทำให้เกิดการพัฒนากการเกาะติดเนื่องจากการกักร่อนที่ผิวเหล็กสามารถเกิดได้สมบูรณ์ ได้ผิวเหล็กหยาบสม่ำเสมอและการกักร่อนลึกพอ ในการทดลองการเผาที่ 4 นาทีให้การกักร่อนดีกว่าการเผาที่ 3 นาที

6.5 พบซีเมนต์ไฮดรอกไซด์จำนวนมากในเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ในขณะที่พบซีเมนต์ไฮดรอกไซด์ในเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ที่ผ่านการลดคาร์บอนเล็กน้อยมาก ซึ่งซีเมนต์ไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดก๊าซในขั้นตอนการเผา เป็นสาเหตุให้เกิดข้อบกพร่องที่ผิวในเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC เคลือบอีนาเมล

รายการอ้างอิง

1. Ferro Toyo Company. The seminar of porcelain enamel in Bangkok, Thailand, 1993.
2. Edwards, J. Coating and Surface Treatment Systems for Metals. ASM International. Finishing Publication LTD., England, pp.298-301.
3. Cold Strip Committee. Cold Rolled Steel Sheets. The Iron and Sheet Institute of Japan, pp.103-106.
4. Zakharov B. Heat Treatment of Metal. Moscow: Peace Publisher, pp. 94-98.
5. United States Steel Corporation. Vitreous Enamel Sheet[online]. Available from: <http://www.ussteel.com/corp/sheet/cr/enamac.html> [2002, October 8]
6. Kyri, H. Handbook for bayer enamels. Leverkusen: Bayer AG 5090, 1976.
7. Fuh, S. S.; Kuen, C. L.; and Jen, C. W. Microstructure and adherence of porcelain enamel to low carbon steel. Ceramics international 25 (1999): 27-34.
8. Vargin, V. V ; Shaw, K. Technology of Enamels. USA: Maclaren&Sons, 1968.
9. Pask, J. A. Chemical Reaction and Adherence at Glass-Metal Interfaces. Porcelain Enamel Inst. 33 (1971): p. 1.
10. Clay, D.B.; Jamieson, R. M. The Adherence of Porcelain Enamel to Low Carbon Steel. Porcelain Enamel Inst. 28 (1966): p. 211.
11. Cook, R. L. Concepts of Adherence and Bonding Mechanisms in Porcelain Enamel. Porcelain Enamel Inst. 36 (1974): p. 1.
12. Moore, D. G.; Pitts, J. W.; and Harrison, W. N. Role of Nickel Dip in Enameling of Sheet Steel. National Advisory Committee for Aeronautics. NACA 3207 (June 1954): 1-27.
13. Moore, D. G.; Pitts, J. W.; Richmond, J. C.; and Harrison, W. N.; Galvanic Corrosion Theory for Adherence of Porcelain Enamel Ground Coats to Steel. Journal of the American Ceramic Society. 37 (January 1954): 1-6.
14. Richmond, J. C.; Moore, D. G.; Kirkpatrick, H. B.; and Harrison, W. N. Relation Between Roughness of Interface and Adherence of Porcelain Enamel to Steel. National Bureau of Standards, Report 1166 (October 1952): 239-247.
15. Standard Test Method for Adherence of Porcelain Enamel Coatings to Sheet Metal. Annual Book of ASTM International. vol. 08.12 (2001): 706-710.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก. ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ที่ผ่านการลดคาร์บอน
ที่อุณหภูมิ 680 °C ที่เวลาต่างๆกัน (% โดยน้ำหนัก)

เวลาที่ใช้ (นาที)	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu
2	0.0404	0.2575	0.0103	0.0127	0.0046	0.0359	0.0090
15	0.0250	0.2513	0.0093	0.0139	0.0050	0.0321	0.0080
35	0.0179	0.2562	0.0102	0.0107	0.0044	0.0352	0.0080
75	0.0091	0.2576	0.0104	0.0112	0.0048	0.0386	0.0090
100	0.0056	0.2584	0.0095	0.0142	0.0044	0.0311	0.0080
110	0.0037	0.2546	0.0097	0.0114	0.0050	0.0344	0.0078

ทำการลดคาร์บอนในเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ในเตาท่อ ที่อุณหภูมิ 680 °C ภายใต้
การไหลของก๊าซอาร์กอน 99.99% ให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตา แล้วตรวจสอบส่วนผสมทาง
เคมีของเหล็กแผ่นด้วยเครื่อง Emission spectroscopy

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข. ข้อมูลดิบที่ได้จากการนับจำนวนร่องในเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้วเคลือบอีนาเมลแบบ 2 ชั้น

รูปที่	P2N0F4 (จุด)	P2N4F3 (จุด)	P2N4F4 (จุด)	P2N8F3 (จุด)	P2N8F4 (จุด)	P4N0F4 (จุด)
1	0	2	4	2	2	2
2	1	2	2	1	2	2
3	1	4	3	3	1	1
4	2	4	2	4	2	1
5	3	3	4	2	4	2
6	2	4	2	3	3	2
7	2	3	5	2	3	2
8	2	2	2	3	4	2
9	1	2	2	4	0	1
10	3	3	4	1	2	2
11	2	2	4	1	4	1
12	2	2	7	3	3	1
13	2	2	3	1	3	3
14	1	2	5	3	3	3
15	3	6	3	2	5	2
16	1	3	3	2	4	1
17	2	3	2	2	2	1
18	3	2	2	2	3	2
19	1	3	2	2	3	2
20	3	4	2	2	2	1

ตารางที่ ข. (ต่อ)

รูปที่	P4N4F4 (จุด)	P4N8F4 (จุด)	P6N0F4 (จุด)	P6N4F4 (จุด)	P6N8F4 (จุด)
1	2	1	1	1	2
2	3	1	1	2	2
3	2	1	1	2	3
4	2	2	2	1	2
5	4	2	1	1	3
6	2	2	1	1	2
7	2	2	1	1	1
8	2	3	1	2	2
9	3	1	2	3	1
10	3	2	2	3	2
11	2	1	2	1	2
12	3	3	3	4	3
13	2	2	1	1	4
14	3	2	1	2	2
15	2	2	1	3	2
16	1	1	1	3	1
17	3	3	2	3	3
18	2	1	1	1	3
19	1	2	1	3	1
20	3	2	2	3	2

- P แสดง เวลาที่ใช้ในการกักกรด มีหน่วยเป็นนาที
- N แสดง เวลาที่ใช้ในการจุ่มนิกเกิล มีหน่วยเป็นนาที
- F แสดง เวลาที่ใช้ในการเผาที่อุณหภูมิ 820 °C มีหน่วยเป็นนาที

ตารางที่ ค. 1 จำนวนช่องที่พบซีเมนต์ใต้แบบหนาในเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC
ที่ความลึกจากผิวแตกต่างกัน

รูปที่	รอยต่อ-70 ไมครอน (ช่อง)	70 – 140 ไมครอน(ช่อง)	140 – 210 ไมครอน(ช่อง)
1	6	14	10
2	10	10	12
3	8	6	11
4	2	16	21
5	10	5	13
6	11	14	16
7	5	10	6
8	18	14	12
9	19	6	13
10	13	6	14
11	7	11	14
12	12	5	15
13	10	10	10
14	7	17	15
15	9	8	11
16	13	4	7
17	9	7	19
18	5	11	19
19	12	14	12
20	4	12	9
21	3	6	8
22	5	13	15
23	3	9	8
24	2	10	16
25	3	8	9

ตารางที่ ค.1 (ต่อ)

รูปที่	รอยต่อ-70 ไมครอน (ช่อง)	70 – 140 ไมครอน(ช่อง)	140 – 210 ไมครอน(ช่อง)
26	4	10	13
27	9	9	16
28	9	12	16
29	5	15	9
30	4	11	10
31	2	16	12
32	3	6	12
33	10	11	7
34	9	7	10
35	4	14	11
36	1	3	9
37	6	7	12
38	4	5	12
39	6	12	7
40	3	8	20
41	6	16	25
42	2	10	15
43	3	6	13
44	4	7	9
45	3	19	22
46	9	9	17
47	9	20	15
48	11	9	9
49	12	10	11
50	3	17	13
51	8	15	11

ตารางที่ ค.1 (ต่อ)

รูปที่	รอยต่อ-70 ไมครอน (ช่อง)	70 – 140 ไมครอน(ช่อง)	140 – 210 ไมครอน(ช่อง)
52	8	11	11
53	10	12	18
54	6	6	13
55	4	9	17
56	8	14	13
57	9	6	9
58	7	16	10
59	4	12	14
60	8	6	11
ค่าต่ำสุด	1	2	6
ค่าสูงสุด	19	19	25
ค่าเฉลี่ย	6.98	10.07	12.78
ส่วนเบี่ยงเบน (SD)	3.87	3.96	3.95

ตารางที่ ค. 2 จำนวนช่องที่พบซีเมนต์ใต้แบบหนาในเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC
ที่ผ่านการลดคาร์บอนแล้ว ที่ความลึกจากผิวแตกต่างกัน

รูปที่	รอยต่อ-70 ไมครอน (ช่อง)	70 – 140 ไมครอน(ช่อง)	140 – 210 ไมครอน(ช่อง)
1	0	0	0
2	1	0	0
3	0	2	0
4	0	1	0
5	0	2	0
6	1	1	0
7	0	0	0
8	0	0	3
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	4	0	0
13	2	0	0
14	0	0	0
15	0	0	2
16	0	0	0
17	0	0	0
18	3	0	3
19	0	0	0
20	0	0	0
21	0	0	1
22	0	0	1
23	0	0	0
24	0	0	0
25	0	0	0

ตารางที่ ค. 2 (ต่อ)

รูปที่	รอยต่อ-70 ไมครอน (ช่อง)	70 – 140 ไมครอน(ช่อง)	140 – 210 ไมครอน(ช่อง)
26	0	0	2
27	0	0	0
28	0	0	0
29	2	0	0
30	0	0	0
31	0	0	0
32	0	0	0
33	0	1	0
34	0	0	0
35	0	0	0
36	0	0	1
37	0	0	0
38	0	0	0
39	0	0	0
40	0	0	0
41	1	1	2
42	0	0	0
43	0	0	1
44	0	0	0
45	0	0	0
46	0	0	0
47	1	0	0
48	0	0	2
49	0	0	0
50	0	0	0
51	0	0	0

ตารางที่ ค. 2 (ต่อ)

รูปที่	รอยต่อ-70 ไมครอน (ช่อง)	70 – 140 ไมครอน(ช่อง)	140 – 210 ไมครอน(ช่อง)
52	0	0	0
53	0	0	0
54	0	0	1
55	0	0	0
56	0	0	0
57	0	0	2
58	0	0	0
59	0	0	0
60	3	0	0
ค่าต่ำสุด	0	0	0
ค่าสูงสุด	4	2	3
ค่าเฉลี่ย	0.30	0.13	0.35
ส่วนเบี่ยงเบน (SD)	0.83	0.43	0.78

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-นามสกุล	นาย มารุต บุญประเสริฐ
วัน-เดือน-ปีเกิด	11 มกราคม 2523
ที่อยู่	279/57 ซอยสุขสวัสดิ์ 62 ถนนสุขสวัสดิ์ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2544
โทรศัพท์ติดต่อ	(02)4639113

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย